

NGUYỄN HỮU TÂM

(Biên soạn)

NHỮNG ỨNG DỤNG MỚI NHẤT CỦA LASER



NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT

HÀ NỘI - 2003

Chịu trách nhiệm xuất bản : PGS. TS. TÔ ĐĂNG HẢI
Biên tập : KIM ANH - PHẠM VĂN
Sửa bản in : PHẠM VĂN
Vẽ bìa : HƯƠNG LAN

Mã số $\frac{53}{383 - 9 - 03}$
KHKT - 2003

In 500 cuốn, khổ 14,5 x 20,5 cm, tại Nhà in Khoa học và công nghệ

Giấy phép xuất bản số 383 - 9 - ngày 9/4/2003

In xong và nộp lưu chiểu tháng 7/2003

LỜI NÓI ĐẦU

*Trong cuốn sách nhỏ này, chúng tôi tập hợp và tóm gọn một số bài báo đã đăng thời gian gần đây trên **Scientific American**, một tờ tạp chí phổ biến khoa học nổi tiếng của Mỹ. Để mở đầu, chúng tôi đề cập tới những hiểu biết cơ bản về vật lý laser, có nhấn mạnh các thuật ngữ, khái niệm, hiệu ứng... để bạn đọc tiện theo dõi các phần sau. Sau đó chúng tôi đưa ra các ứng dụng của laser, có nhấn mạnh tới những ứng dụng quan trọng nhất. Mặc dù ở phần đầu đã giới thiệu khá kỹ nguyên tắc vật lý của chúng, nhưng ở mỗi chương chúng tôi vẫn không quên nhắc lại các khái niệm cơ bản để bạn đọc dù chưa quen với vật lý cũng khỏi ngỡ ngàng. Bởi các chương đều mang tính độc lập với nhau, bạn đọc hoàn toàn có thể đọc "nhảy cóc", nghĩa là mở bất kỳ chương nào mà bạn quan tâm. Hy vọng cuốn sách này sẽ bổ ích cho các nhà kỹ thuật, các kỹ sư, bác sỹ, giáo viên... đã hoặc sẽ làm quen với các ứng dụng kỹ thuật laser vào công việc của mình, nhưng trước hết là các em sinh viên các trường đại học và cao đẳng có mong muốn tìm hiểu một ngành hết sức hiện đại và đang càng ngày càng phổ biến ở nước ta, bước đầu đã có những ứng dụng trong tin học, truyền thông, y tế, nghiên cứu khoa học..., nhằm giúp các em khi ra trường vững tin hơn trong công việc.*

Nhân đây, trước hết xin cảm ơn em trai tôi là Kỹ sư Nguyễn Hữu Chí ở Munich đã cung cấp cho tôi những tài liệu gốc vô giá, mà chỉ nhờ có vậy, tôi mới có thể khơi mào được cuốn sách mà tôi hy vọng là chỉ ít, cũng lý thú đôi với bạn đọc, vì nó cho phép cập nhật được một trong những ngành trọng điểm, có ứng dụng hết sức rộng lớn của vật lý.

Xin cảm ơn GS. VS. Đặng Vũ Minh, Giám đốc TTKHTN&CNQG, người đã quan tâm và đặt nhiều hy vọng ở cuốn sách. Xin cảm ơn Nhà Xuất bản Khoa học Kỹ thuật đã giúp đỡ cho cuốn sách ra đời.

Cũng xin cảm ơn GS. Chu Đình Thuý và các đồng nghiệp ở Trung tâm Điện tử học Lượng tử, TTKHTN&CNQG vì sự hỗ trợ tinh thần rất đáng trân trọng. Xin cảm ơn các Anh Nguyễn Hữu Khôi, Nguyễn Ngọc Dũng, TTKHTN&CNQG, Anh Phan Bá, ĐHKTS và Chị Trần Thu Hà, Bệnh viện Hữu nghị Việt - Đức Hà Nội, những đồng nghiệp thân thiết đã nhiệt tình hợp tác trong những phần ứng dụng chuyên ngành tương ứng.

Cuối cùng, xin cảm ơn vợ con tôi đã thông cảm và tạo nhiều điều kiện vật chất cũng như tinh thần hàng ngày để tôi có thể hoàn thành được cuốn sách này.

Tác giả

TS. NGUYỄN HỮU TÂM

MỤC LỤC

	<i>Trang</i>
LỜI NÓI ĐẦU	3
1. Laser: Các cơ sở vật lý hay là nguyên tắc hoạt động, các tính chất và phân loại chúng	7
2. Lịch sử phát triển, tiềm năng, triển vọng	61
3. Xung laser siêu ngắn.....	87
4. Làm lạnh khí bằng tia laser	97
5. Ứng dụng kỹ thuật laser trong y học	109
6. Vi kỹ thuật laser trong công nghệ sinh học.....	141
7. Gia công vật liệu.....	157
8. Điều khiển các phản ứng hoá học bằng tia laser.....	211
9. Ứng dụng kỹ thuật laser vào quân sự.....	233
10. Laser điểm lượng tử.....	247
11. Xử lý thông tin.....	261
12. Đo lường bằng laser	321
13. Những phát kiến mới	367
14. Laser điện tử tự do.....	393
15. Kỹ thuật hiển thị bằng laser để phục vụ phép chiếu ảnh lớn	415

1.

Laser: Các cơ sở vật lý hay là nguyên tắc hoạt động, các tính chất và phân loại chúng

1.1. NHẬP MÔN

Cách đây hơn 40 năm, lần đầu tiên laser ra đời với tư cách là một nguồn sáng có nhiều tính chất kỳ diệu đến mức ngay cả những nhà kỹ thuật giàu trí tưởng tượng nhất cũng

chưa có thể lường tượng được có bao nhiêu ứng dụng để có thể tận dụng hết những đặc tính ưu việt của ánh sáng mà laser phát ra. Thậm chí khi đó còn có người dăm mĩa mai: "Laser là lời giải cho sự tìm kiếm một vấn đề". Ngày nay nói đến laser thì chắc chắn rằng bất cứ ai cũng phải mỉm cười trước một câu ngớ ngẩn như vậy, bởi vì laser đã đi vào đời sống thường nhật tới mức mà trước đây chẳng có ai có thể tưởng tượng nổi.

Rất nhiều gia đình ở nước ta đã có máy vi tính và kèm theo nó tất nhiên là có một máy in laser. Số các gia đình có máy phát CD thậm chí còn đông hơn, và ở các máy đó thì ít nhất cũng phải dùng một laser bán dẫn để đọc những thông tin âm nhạc hoặc hình ảnh VCD (*Video Compact Disk*) đã được ghi bằng kỹ thuật số (*digital*) và chuyển chúng vào máy khuếch đại âm thanh hay lên máy truyền hình (trường hợp VCD). Các pin cho máy ghi âm cũng được hàn bằng laser rắn Neodym để không bị chảy.

Các bác sỹ chuyên khoa mắt dùng laser ion argon để hàn võng mạc, còn các bác sỹ ngoại khoa lại dùng *dao mổ* bằng đầu laser khí cacbonic, với ưu việt của phương pháp là nhờ nó có thể tiết kiệm rất nhiều cho bệnh nhân lượng máu mất đi trong một lần giải phẫu.

Với một trong những căn bệnh thế kỷ là ung thư, nhờ ánh sáng của laser màu đã được điều chỉnh chính xác về vạch cần dùng, truyền qua sợi thuỷ tinh quang học để chiếu lên các khối u của bệnh nhân. Như có phép màu, các khối u sẽ tự huỷ nếu là ác tính và được giữ nguyên nếu là lành tính. Một thủ thuật

dáng lưu ý là các u này trước đó phải được quét chất màu hấp thụ chính bước sóng này, và các nhà khoa học đã phát hiện là chỉ có các u ác mới hấp thụ ánh sáng này, trong khi u lành lại không hấp thụ bước sóng đó. Phương pháp siêu việt này có tên gọi là quang động học.

Trong xây dựng, laser khí heli-neon được sử dụng làm tia định hướng chuẩn (dây dọi) là không thể thiếu được. Trên đây chỉ liệt kê những ứng dụng dễ thấy nhất, còn trong thực tế nếu muốn liệt kê đầy đủ thì bảng liệt kê này có thể kéo dài tùy ý, bởi lẽ mỗi ngày lại có thêm những ứng dụng mới cũng như các loại laser mới.

Ngày nay ngay cả với các chuyên gia laser cũng khó có thể có một cái nhìn khái quát về tất cả những thành tựu mới trong lĩnh vực này. Bởi vì mỗi năm có không biết bao hội nghị với hàng ngàn nhà khoa học tham gia báo cáo và thảo luận về đề tài này, số bài báo đăng trên các tạp chí chuyên ngành nhiều vô kể. Bởi vậy, ngoài những cuốn sách tổng kết các ứng dụng mới nhất của laser, thì điều quan trọng hơn là bất cứ ai quan tâm tới khoa học và công nghệ laser cũng phải trang bị cho mình những hiểu biết cơ bản về các cơ sở vật lý của laser trước khi tìm hiểu thông tin về những thành tựu quan trọng nhất trong lĩnh vực này, bởi vì công nghệ laser ngày nay đã trở thành một công nghệ vừa mang tính mở đường, lại vừa là nền tảng cho các thành tựu khoa học khác trong thế kỷ mới, thế kỷ của khoa học và công nghệ.

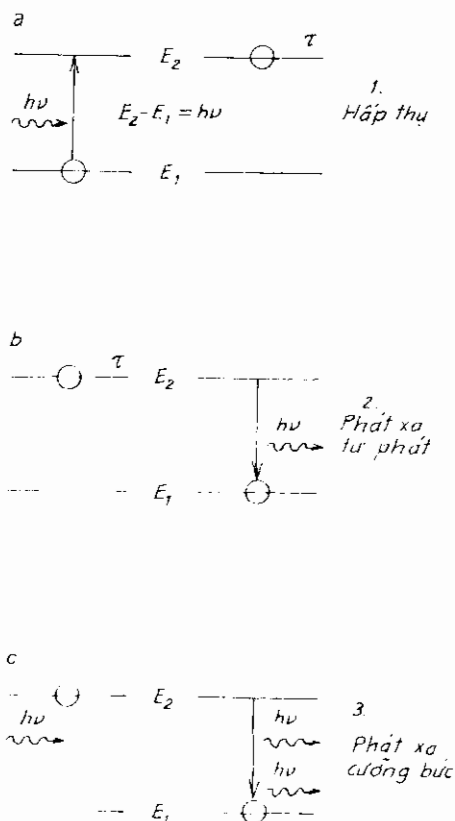
Bởi vậy tác giả mong bạn đọc, trước khi tìm hiểu các chương sau là các ứng dụng cụ thể, hết sức kỳ thú của laser,

hãy dành chút ít thời gian đọc kỹ chương này, nếu bạn đọc đã lỡ quên những kiến thức cơ bản của môn vật lý ở cuối bậc phổ thông hay những năm đầu đại học.

1.2. CƠ SỞ VẬT LÝ CỦA LASER

So với những tiến bộ đặc biệt của vật lý hạt nhân, vật lý vô tuyến và vật lý bán dẫn thì cho đến những năm 50 thế kỷ 20, quang học vẫn là một ngành được coi là cổ điển nhất của vật lý học. Nhưng với phát minh ra laser làm nguồn sáng và khuếch đại ánh sáng vào những năm 60 của thế kỷ 20 thì ngành quang học đã thực sự trải qua một cuộc cách mạng. Cùng với laser, đã hình thành trong vật lý một ngành mới là "*Điện tử học lượng tử - Quantum electronics*", nó phát triển như vũ bão làm cho chúng ta đều cảm thấy rất khó nắm bắt. Cũng từ ngành điện tử học lượng tử này, với tốc độ phát triển chóng mặt vì những ứng dụng vô biên của nó mà gần đây lại hình thành thêm một ngành mới là "*Quang tử - Photonics*". Ở các chương sau sẽ đề cập tới ảnh hưởng của laser đến các lĩnh vực quan trọng nhất của khoa học và công nghệ.

Cơ sở lý thuyết của laser chính là tiên đề của Einstein, phát biểu vào năm 1917 để dẫn ra công thức bức xạ Planck. Einstein giả thiết rằng, khi có tương tác giữa ánh sáng với các nguyên tử thì cùng với sự hấp thụ một lượng tử ánh sáng, còn xảy ra hai loại bức xạ khác nhau: đó là *bức xạ tự phát* và *bức xạ cưỡng bức* một lượng tử ánh sáng được gây ra bởi một lượng tử ánh sáng khác trong nguyên tử đã được kích thích.



Hình 1.1:

Ở đây thể hiện các quá trình tương tác cơ bản giữa bức xạ điện từ với vật chất đối với một nguyên tử giả định chỉ có hai trạng thái năng lượng cho phép. Hấp thụ (a) xảy ra khi năng lượng của lượng tử bức xạ $h\nu$ chính bằng hiệu năng lượng giữa hai trạng thái. Sau thời gian tồn tại trung bình τ , hệ đã được kích thích sẽ trở về lại trạng thái cơ bản (b), đồng thời bức xạ tự phát một photon $h\nu$. Thông qua tương tác của một photon $h\nu$ với một nguyên tử đã được kích thích, sẽ dẫn tới bức xạ kích thích hay cưỡng bức (c), ở đó sẽ có một photon $h\nu$ được trao cho trường bức xạ, khi đó nguyên tử trở về lại trạng thái cơ bản.

Như đã biết, theo lý thuyết lượng tử, các nguyên tử chỉ có thể tồn tại ở những trạng thái năng lượng gián đoạn, và dĩ nhiên điều đó cũng đúng cho cả các ion và các phân tử, nhưng để ngắn gọn, chúng ta gọi chung là các nguyên tử. Bình thường các nguyên tử sẽ nhận các trạng thái ổn định và vì vậy có năng lượng thấp nhất, đó chính là trạng thái cơ bản. Ở trạng thái đó, chúng có thể hấp thụ bức xạ của một điện từ trường, nếu như các lượng tử năng lượng $h\nu$ của trường này vừa đúng bằng hiệu số năng lượng giữa hai trạng thái nguyên tử. Trong tích số $h\nu$, ký hiệu h là hằng số Planck ($h = 6,6261 \times 10^{-34}$ J/s), còn ν là tần số của bức xạ điện từ. Quá trình hấp thụ như vậy được thể hiện trên hình 1.1a cho trường hợp riêng là một nguyên tử chỉ có hai trạng thái năng lượng là E_1 và E_2 . Khi đó nguyên tử sẽ chuyển lên một trạng thái năng lượng cao hơn, đó là trạng thái kích thích. Nhưng nói chung nó không thể tồn tại mãi ở đó được, mà sau một thời gian đặc trưng cho hệ đó - là thời gian tồn tại ở trạng thái τ - nó sẽ trở lại trạng thái cơ bản (xem hình 1.1b.). Vì điều đó xảy ra là tự phát, không có tương tác với trường bức xạ và nói chung cũng không có liên hệ gì với nó, nên chúng ta gọi quá trình này là *không kết hợp*.

Theo Einstein, cũng sẽ có được bức xạ cưỡng bức (hay kích thích), nếu còn có một photon nữa tham gia vào tương tác với nguyên tử đã được kích thích. Photon này cưỡng bức để gây ra dịch chuyển về trạng thái cơ bản do rút ngắn thời gian sống ở trạng thái kích thích (xem hình 1.1c.). Khi đó năng lượng đã được tích lũy trong nguyên tử sẽ được cung cấp ngược trở lại trường bức xạ ở dạng một photon có năng lượng $h\nu$. Theo tính

lượng nguyên (ánh sáng vừa mang cả tính chất sóng vừa mang cả tính chất hạt) đã được chứng minh trong cơ lượng tử thì các photon mang năng lượng $h\nu$ (các hạt) cũng phải mang các tính chất của sóng điện từ tần số ν . Nhưng trong trường hợp bức xạ cưỡng bức thì sóng này sẽ đồng pha với sóng của photon gây ra sự cưỡng bức. Bởi vậy ở đây đang nói tới một quá trình *kết hợp*.

Bức xạ được kích thích – trong các điều kiện bình thường xảy ra trên Trái đất chúng ta – là một quá trình hết sức hiếm khi xảy ra. Nếu chúng ta hun nóng một khối rỗng, chẳng hạn một quả cầu bằng sắt mà chỉ để hở ra một lỗ để quan sát, lên 1000° , thì bên trong quả cầu sẽ chứa đầy bức xạ và vật chất ở thể khí mà vật chất này sẽ tồn tại ở nhiệt độ đó ở trạng thái cân bằng nhiệt. Lý thuyết cho thấy rằng, ở điều kiện này tỷ lệ của các quá trình bức xạ cưỡng bức so với tự phát vào khoảng $1:10^{10}$. Với bức xạ tia X thậm chí còn nhỏ hơn vài bậc độ lớn. Về phía tần số thấp hơn thì tỷ lệ này thuận lợi hơn rất nhiều; trong cùng điều kiện, với sóng cực ngắn có tần số 25 MHz, tỷ lệ đó vào khoảng $1:10^8$. Từ các kết quả vừa nêu chúng ta rút ra được nguyên tắc: để thiết kế được một laser nhất thiết phải đưa vật chất về một trạng thái không cân bằng nhiệt “bất bình thường”. Chẳng hạn các điều kiện này là phải có trong sự phóng điện.

Ngay từ năm 1928, R. Ladenburg và các cộng tác viên ở Viện Hoá lý và Điện hoá mang tên Hoàng đế Wilhelm ở Berlin-Dahlem đã chứng minh được bức xạ cưỡng bức. Họ cho thấy có bức xạ cưỡng bức trong sự phóng điện ở dòng điện rất cao trong một ống thuỷ tinh có chứa khí hiếm là neon. Chỉ có điều còn cần rất nhiều thời gian cho tới khi người ta có thể dùng bức xạ

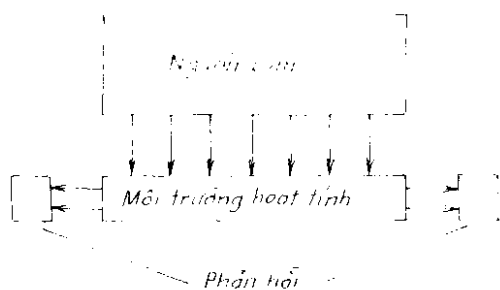
cường bức này để khuếch đại ánh sáng. Vì có sự phụ thuộc vào tần số của tỷ lệ giữa bức xạ cường bức và tự phát vừa nói trên nên lúc đầu người ta mới chỉ thành công trong miền sóng cao tần. Mãi tới năm 1954, C. H. Townes và các sinh viên của ông tại Trường Đại học Tổng hợp Columbia ở New York mới chế tạo ra được maser amoniac đầu tiên trên thế giới (maser chỉ khác laser là trong khi laser phát bức xạ trong miền ánh sáng khả kiến: $l = \text{light}$ (ánh sáng), thì maser phát xạ trong miền sóng vô tuyến cao tần: $m = \text{microwave}$ (sóng cao tần). Maser cũng có trong tự nhiên: maser vũ trụ đầu tiên được phát hiện năm 1965 trong bức xạ tia vũ trụ ở dải ngân hà Orion. Ngày nay người ta còn tìm ra rất nhiều nguồn sáng maser như vậy trong các dải ngân hà khác hay các đám khí của các ngôi sao khổng lồ hay siêu sao khổng lồ. Bức xạ này là phát xạ của các phân tử OH, H₂O và SiO, và được bơm bằng ánh sáng hồng ngoại).

Mặc dù đã có nhiều nỗ lực về mặt lý thuyết cũng như thực nghiệm để có được những hệ thống thiết bị thích hợp và những điều kiện kích thích thuận lợi, song vẫn phải cần đến 6 năm cho tới khi T. Maiman (Hughes Research Laboratories-Viện nghiên cứu của Công ty năng không Hughes, Mỹ) thành công trong việc cho phát một bức xạ đỏ hết sức mạnh trong một thanh đơn tinh thể hồng ngọc nhân tạo và chứng minh được rằng bức xạ này chính là do phát xạ cường bức gây ra. “Maser quang học” đầu tiên đã được phát minh như vậy! Sau này người ta quen gọi là laser thay cho maser, chỉ thay chữ m bằng l là *light* (ánh sáng). Sau cú “vượt cạn” thực nghiệm ngoạn mục này đã có sự phát triển như vũ bão để bù cho thời gian đã mất. Liên tục sau

đó, người ta cũng chứng minh được bức xạ laser trên các chất rắn khác, các chất khí, rồi cả trên chất lỏng và chất bán dẫn.

Mọi thiết bị laser nhất thiết phải gồm ba thành phần chính sau (xem hình 1.2):

1. Một môi trường laser (thường còn gọi là môi trường hoạt tính)
2. Một nguồn năng lượng phát xạ rất mạnh, thường gọi là nguồn bơm vì qua đó năng lượng được “bơm” vào môi trường laser
3. Thiết bị phản hồi cho phép mỗi dao động (gây sự phát xạ) trong môi trường laser.



Hình 1.2:

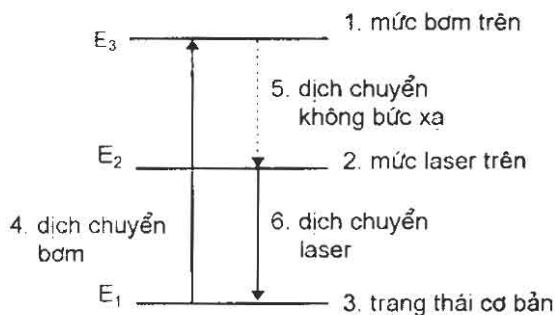
Ba thành phần chính của một laser. Môi trường hoạt tính gồm một chất khí nguyên tử hay phân tử, một dung dịch màu hữu cơ hay một chất rắn. Nguồn bơm kích thích môi trường hoạt tính bằng cách cung cấp năng lượng điện tử hay hóa học để nó phát xạ. Các yếu tố phản hồi, ở đây chẳng hạn là các gương phản xạ cao, tạo thành một buồng cộng hưởng mà ở đó có thể xảy ra sự phát laser.

Môi trường laser ít nhất phải có hai mức năng lượng được ghép nối với nhau bởi một dịch chuyển bức xạ mạnh, sao cho trên bước dịch chuyển này có thể gây ra một bức xạ cưỡng bức. Và làm sao phải đạt được mục đích là ở tất cả các nguyên tử, sự cư trú (phân bố) ở mức trên cao hơn ở mức dưới. Chúng ta có thể bằng nhiều biện pháp khác nhau để đạt tới một sự *cư trú đảo*, mà giới vật lý Việt Nam quen gọi là *phân bố đảo* để so sánh với cân bằng nhiệt động thường có ở phân bố Boltzmann, ở đó mức cơ bản được cư trú nhiều nhất. Các phương pháp này sẽ được xét tới qua những ví dụ về các loại laser quan trọng nhất. Một trong những phương pháp đó, rất thường xuyên được dùng ở môi trường laser ra, và lỏng, là sự "bơm quang học". Phương pháp này dùng một nguồn ánh sáng mạnh để cung cấp cho môi trường laser một lượng lớn photon cho nó hấp thụ.

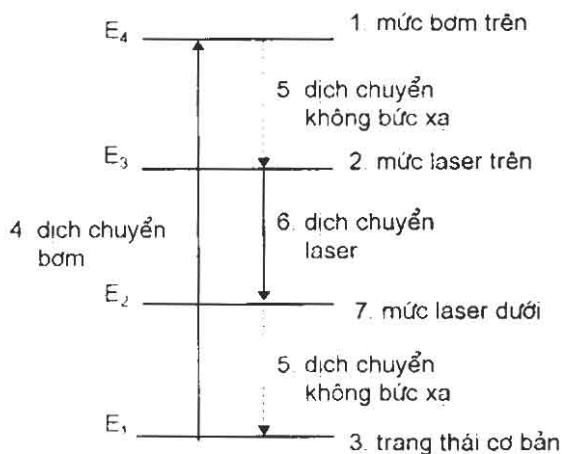
Ở một hệ mà chỉ có hai mức năng lượng, sẽ không thể nào tạo ra được một sự phân bố đảo như vậy, bởi vì các quá trình hấp thụ và bức xạ cưỡng bức đều có xác suất xảy ra như nhau. Như vậy, trong một hệ gồm hai mức, tương tác giữa trường bức xạ và hệ nguyên tử rõ ràng là sẽ triệt tiêu nhau vào thời điểm mà phân bố ở hai mức là như nhau. Trong trường hợp này, nếu lấy trung bình, số dịch chuyển từ mức dưới lên mức trên sẽ bằng số của quá trình ngược lại.

Để có thể tạo ra được một sự phân bố ở trạng thái năng lượng trên cao hơn phân bố dưới nhờ phương pháp bơm quang học, môi trường laser ít nhất phải có ba mức năng lượng (xem hình 1.3a.).

a)



b)

**Hình 1.3:**

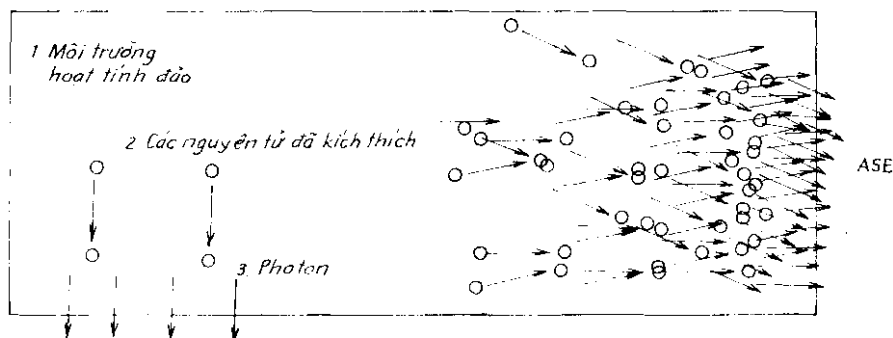
Ít nhất thì môi trường hoạt tính phải có ba mức năng lượng cho phép để sao cho bằng cách bơm sẽ tạo ra được phân bố đảo giữa mức laser trên và dưới, ở trường hợp này mức dưới sẽ là trạng thái cơ bản (phần a). Mức bơm trên có thời gian tồn tại trung bình ngắn, bởi vậy trên thực tế nó luôn luôn trống. Ở hệ ba mức thì phân bố đảo sẽ chỉ xảy ra sau khi đã có $1/2$ số nguyên tử được kích thích. Một hệ bốn mức (phần b) sẽ thuận lợi hơn bởi vì mức laser dưới cũng có thời gian tồn tại ngắn và qua đó luôn được làm trống ngay. Bởi vậy phân bố đảo hình thành ở hệ bốn mức trực tiếp ngay khi hệ được bơm.

Nhưng thuận lợi hơn sẽ là một hệ cấu trúc gồm thậm chí tới bốn mức như ta thấy trên hình 1.3b, bởi vì trong trường hợp trước người ta phải đợi cho tới khi có quá 50% các nguyên tử ở trạng thái trên mới xảy ra sự phân bố đảo. Điều này dễ dàng nhận thấy ngay khi so sánh các hình 1.3a và hình 1.3b với nhau. Các dịch chuyển giữa mức bơm trên với mức laser trên, cũng như giữa mức laser dưới và trạng thái cơ bản phải rất nhanh sao cho cả mức bơm trên lẫn mức laser dưới, trên thực tế luôn luôn trống. Từ năm 1960 cho tới nay, người ta đã tìm ra rất nhiều hệ thoả mãn các tiêu chuẩn này, và dĩ nhiên một số trong đó đã được dùng để chế tạo ra những hệ laser hoạt động rất có hiệu quả.

Điều gì sẽ xảy ra sau khi nguồn bơm đã tạo ra được phân bố đảo trong môi trường laser? Đầu tiên sẽ xảy ra sự bức xạ tự phát theo mọi phương trong không gian và chúng sẽ gây ra những dịch chuyển bức xạ tiếp theo ở các nguyên tử lân cận đã ở trạng thái kích thích. Nếu chúng ta tạo ra một môi trường laser có dạng của một hình trụ dài, thì dọc theo trục của hình trụ đó dĩ nhiên sẽ xuất hiện nhiều dịch chuyển cưỡng bức hơn là vuông góc với trục đó (xem hình 1.4).

Như vậy sẽ xảy ra sự gia tăng có tính thác lũ của bức xạ theo một phương ưu tiên trong không gian. Chứng nào quá trình bơm còn bị giới hạn về mặt thời gian, thì theo cách này, phân bố đảo sẽ mất đi rất nhanh, nghĩa là sẽ tạo ra một xung ánh sáng ngắn, mạnh và phát ra theo một góc không gian có giới hạn tương đối hẹp. Song nói một cách chính xác đó chưa phải là bức xạ laser, mà đó mới chỉ là quá trình *bức xạ tự phát*

đã được khuếch đại (*amplified spontaneous emission*), gọi tắt là ASE.



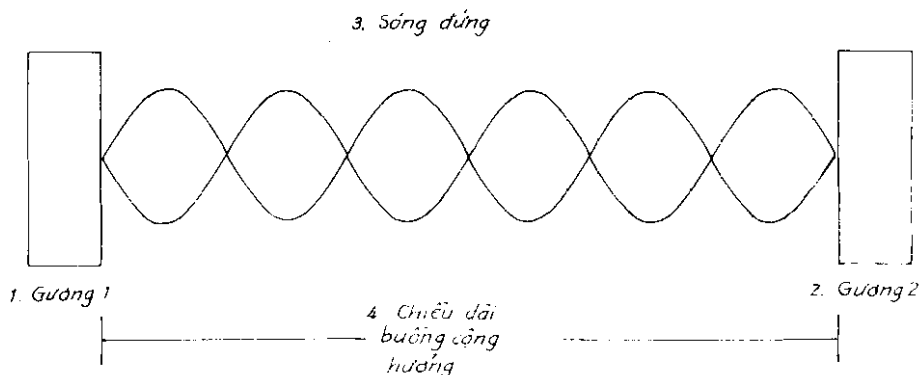
Hình 1.4:

Trong một môi trường đã có phân bố đảo do được cung cấp, sẽ xuất hiện nhanh, mạnh như thác lũ trong một không gian hẹp dọc theo trục chính bức xạ tự phát được khuếch đại (Amplified Spontaneous Emission - ASE) nhờ các dịch chuyển bức xạ cưỡng bức (mũi tên nhọn theo chiều nằm ngang). Trái lại thì vuông góc với trục, hầu như chỉ có bức xạ vuông góc với trục.

1 môi trường hoạt tính đã được phân bố đảo, 2 các nguyên tử đã được kích thích, 3. photon.

Nhưng nếu chúng ta đưa môi trường laser vào một hệ thống phản hồi quang học thích hợp, trong trường hợp đơn giản nhất là hai gương đặt song song và thẳng góc với trục hình trụ. Cũng nên chú ý là ở đây, tuy hai gương song song là cấu hình đơn giản và dễ hiểu nhất, nhưng lại không phải là cấu hình thông dụng. Thường thì người ta sử dụng những khả năng khác, chẳng hạn như các gương lõm hay các thấu kính, vì chúng dễ điều chỉnh hơn và ít gây mất mát quang học hơn, chẳng hạn do nhiễu xạ ánh sáng ở các biên. Vì vậy các gương và

linh kiện quang học này cũng có ý nghĩa lớn cho thực tiễn. Trong buồng cộng hưởng vừa được tạo ra, chúng ta đạt được mục đích là các photon sau khi đã được phát xạ lại phải đi qua đi lại nhiều lần giữa các gương, vì vậy có thể ở lại lâu hơn trong môi trường laser trước khi thoát ra ngoài.



Hình 1.5:

Trong một buồng cộng hưởng quang học tốt, giữa các gương phẳng, phản xạ cao thì giữa các sóng sáng chạy song song với trục và qua lại liên tục, có thể chồng chất lên nhau thành một sóng đứng. Muốn vậy thì chiều dài buồng cộng hưởng L phải bằng số nguyên lần nửa λ , bởi vì trên bề mặt gương luôn luôn có điểm nút của cường độ điện trường

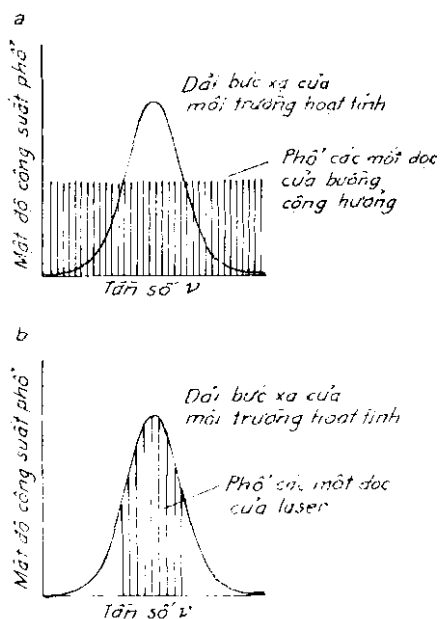
1; 2. gương, 3. sóng đứng; 4. chiều dài buồng cộng hưởng L

Nếu nhìn theo góc độ sóng thì do sự chồng chất các sóng mà giữa các gương sẽ xuất hiện một sóng đứng có cường độ càng ngày càng gia tăng, một khi chúng ta chọn khoảng cách giữa các gương sao cho vừa đúng bằng số nguyên lần nửa bước sóng của sóng đó (xem hình 1.5). Vì trên thực tế khoảng cách gương này thường từ vài centimét đến khoảng một mét nên

điều đó có nghĩa là trong một buồng cộng hưởng quang học nói chung sẽ đồng thời xuất hiện nhiều bụng sóng như thế. Nếu chẳng hạn chúng ta quan sát bức xạ trong miền phổ ánh sáng màu đỏ có bước 700 nm, với một buồng cộng hưởng dài một mét, được đổ đầy một môi trường hoạt tính có chiết suất $n = 1$, con số này vào khoảng ba triệu.

Người ta gọi các sóng đứng khác nhau là các *mốt dọc* (*longitudinale mode*) của buồng cộng hưởng. Trên thang đo tần số người ta có thể tính khoảng cách giữa hai mốt khác nhau một nửa bước sóng bằng cách chia vận tốc ánh sáng cho khoảng cách gương đã được nhân đôi. Với buồng cộng hưởng vừa nêu trên, theo tính toán sẽ cho khoảng cách tần số là $1,5 \cdot 10^8$ Hz. Vì môi trường laser bên trong buồng cộng hưởng chỉ có thể bức xạ ánh sáng nằm trong miền phổ đặc trưng cho dịch chuyển tương ứng, nên phổ của bức xạ laser sẽ được đặc trưng bởi một dãy các vạch nằm rất gần nhau (các mốt dọc của buồng cộng hưởng) (xem hình 1.6a). Các mốt trong miền bức xạ sẽ được tạo ra với cường độ lớn nhất, và cường độ sẽ giảm dần như dựng đứng ở hai phía biên của miền này. Bởi vì khi laser bắt đầu dao động thì những mốt mạnh nhất ở gần cực đại sẽ xuất hiện trước tiên rồi làm cho sự phân bố dư thừa bị giảm đi rất nhanh, do vậy các mốt yếu hơn sẽ không còn nữa (xem hình 1.6b).

Thực vậy, trong buồng cộng hưởng quang học không chỉ hình thành các dạng sóng dao động song song với mặt gương, mà cả các sóng tạo một góc nhỏ so với đường thẳng góc với gương. Qua đó mỗi mốt dọc còn có thêm một phân bố cường độ theo không gian mà người ta gọi là "*mốt ngang (transversal mode)*".

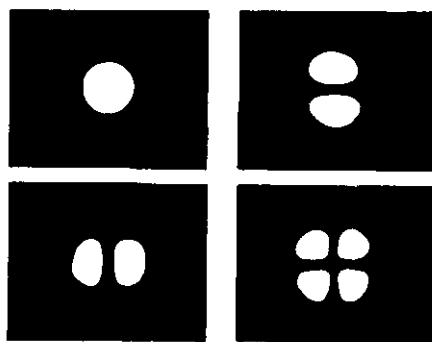


Hình 1.6:

Tần số riêng (các một dọc) của một buồng cộng hưởng quang học cách đều nhau trên thang tần số (a) Độ rộng dải bức xạ của môi trường hoạt tính là một đại lượng đặc trưng cho môi trường tương ứng Ở các chất khí nói chung độ rộng băng rất hẹp, nhưng ở các chất màu hữu cơ lại rất rộng. Thường sẽ phát laser được trên các một dọc cộng hưởng nằm trong miền cực đại của dải bức xạ (b) Nhưng bằng các biện pháp đặc biệt chúng ta có thể đạt được kết quả là chỉ có một một duy nhất dao động

Để có thể quan sát và sử dụng được bức xạ laser ngoài buồng cộng hưởng, một trong hai gương của buồng cộng hưởng nhất thiết phải có độ truyền qua tối thiểu vài phần trăm. Nhờ

vậy chúng ta có thể nghiên cứu sự phân bố ngang của cường độ, chẳng hạn đơn giản bằng cách đưa một thấu kính vào quang lộ, và đặt một màn chắn hay một tấm kính ảnh vào tiêu điểm của thấu kính đó. Như vậy ta đã có ngay một bức tranh về phân bố ngang của cường độ (xem hình 1.7).



Hình 1.7:

Các môđ phân bố có phân bố cường độ trong mặt phẳng vuông góc với quang trục của buồng cộng hưởng, có thể nhận những dạng rất phức tạp. Với phân lớn ứng dụng thì chỉ có một cơ bản (TEM_{00} , hình trên bên trái) là đáng quan tâm, cường độ của nó giảm theo phương xuyên tâm và với bình phương của đường cong Gauss

Như thấy trên hình 1.7, các phân bố này có thể có cấu trúc rất phức tạp. Nếu không dùng tới những biện pháp đặc biệt thì tất cả những môđ này sẽ cạnh tranh với nhau, chúng sẽ đồng thời dao động, hoặc sẽ chồng chất lên nhau theo trình tự thời gian không quy luật. Chế độ đa môđ này sẽ lý thú khi chúng ta không cần để ý tới độ thuần khiết của bức xạ mà chỉ quan tâm duy nhất tới năng lượng xung thật lớn..., chẳng hạn như khi phải dùng laser để hàn hoặc gia công những vật lớn.

Với rất nhiều ứng dụng thì một cơ bản hay còn gọi là một TEM₀₀. TEM là gọi tắt của thuật ngữ điện từ ngang (*transversal-electromagnetic*), còn chỉ số 00 cho biết số các vạch nút của phân bố theo hai phương vuông góc với nhau trong mặt phẳng thẳng góc với phương truyền bức xạ. Một này có phân bố cường độ ngang đối xứng dưới dạng đường cong Gauss. Có những khả năng về mặt thực nghiệm để một mặt thì, trong số các một ngang chỉ tạo ra duy nhất một này, và mặt khác thêm vào đó, đồng thời cũng giới hạn số các một dọc đang dao động.

Một đặc trưng quan trọng khi cho laser hoạt động là khi bơm phải chú ý sẽ có xuất hiện các ngưỡng rất rõ. Từ một nguồn bơm, khi chúng ta cung cấp năng lượng cho môi trường hoạt tính, ngay lập tức sẽ xuất hiện bức xạ tự phát và tất nhiên lúc đầu sẽ gây ra mất mát rất lớn cho bức xạ, vì chưa tồn tại được phân bố đảo. Khi công suất bơm tiếp tục tăng lên, những mất mát này sẽ được bù lại bởi khuếch đại là hệ quả của bức xạ cưỡng bức, và chính ở điểm này dao động laser sẽ ngay lập tức xảy ra. Vì mật độ bức xạ gia tăng như thác lũ nên phân bố đảo ngay tức thì lại giảm đi rất nhanh, dao động sẽ ngừng nếu nguồn bơm không tiếp tục cung ứng đủ công suất bơm để duy trì cho sự cư trú (phân bố) ở mức laser trên đạt trị số yêu cầu. Chừng nào nguồn bơm còn tiếp tục cung cấp năng lượng thì nó lại có thể vượt qua được trị ngưỡng, và do vậy dao động lại có thể bắt đầu từ đầu. Ứng xử theo thời gian như thế được đặc trưng bởi sự xuất hiện không thể kiểm soát được của một dãy những xung bức xạ ngắn, được gọi là *mòm* (*spiking*). Nhờ tiến

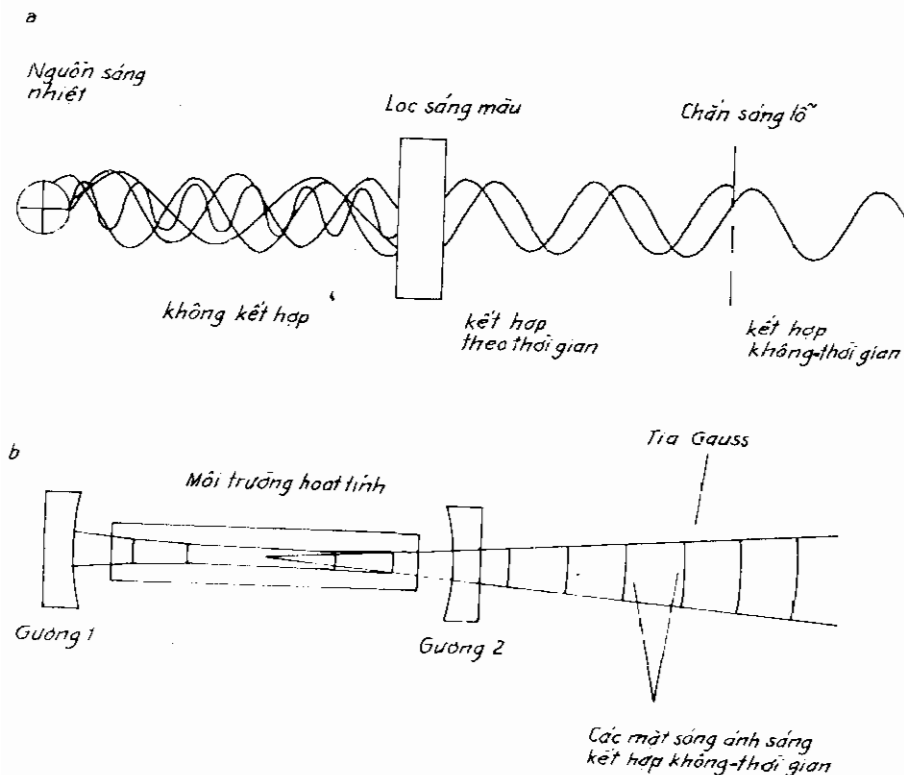
bộ của công nghệ, dần dần các nhà khoa học đã sáng chế ra những nguồn bơm có công suất rất lớn, và các phương pháp hữu hiệu khác để, hoặc duy trì dao động (phát) liên tục (chế độ phát liên tục: *continuous wave*), còn gọi tắt là chế độ CW, hoặc tạo ra các xung có thời khoảng kiểm soát được.

1.3. CÁC TÍNH CHẤT CỦA ÁNH SÁNG LASER

Khi đã hiểu rõ phương thức hoạt động chung của một laser, bạn đọc sẽ tự đặt ngay câu hỏi rằng theo cách hoạt động đó, bức xạ đặc biệt của laser là gì mà đã làm cho laser trở nên một nguồn sáng có ứng dụng đặc biệt và đa dạng đến như vậy ?

a. Tính kết hợp

Trước hết, nhất thiết phải kể đến tính kết hợp của ánh sáng laser. Điều đó có nghĩa là trong trường bức xạ, các sóng có quan hệ pha cố định cả về thời gian lẫn không gian. Nếu dùng các nguồn sáng nhiệt thông thường chúng ta chỉ có thể thu được ánh sáng kết hợp khi đã chịu mất mát rất lớn về cường độ, bởi vì chúng ta phải đặt một phin lọc màu có dải hết sức hẹp, và một diaphragm có lỗ rất nhỏ trước nguồn sáng về mặt không gian là rất lớn. Phin lọc màu tách riêng một miền phổ rất hẹp ra khỏi hỗn hợp bước sóng mà nguồn đã phát xạ ra, còn diaphragm lỗ có tác dụng tạo ra những mặt sóng có dạng gần như hình cầu đi vào nửa không gian (xem hình 1.8a).



Hình 1.8:

Bằng các nguồn sáng nhiệt thông thường chỉ có thể tạo ra ánh sáng kết hợp với mật độ rất lớn về cường độ, bởi vì các quá trình bức xạ tự phát chỉ tạo ra những dãy sóng ngắn trong một miền phổ tương đối rộng. Chỉ nhờ các phiến lọc sáng dải rất hẹp và một diaphragm lỗ rất hẹp ta mới phần nào đi tới đích (a). Bức xạ cường độ xuất hiện trong môi trường hoạt tính trái lại tạo được ánh sáng rất mạnh, có độ kết hợp thời gian cao. Nếu chọn buồng cộng hưởng quang học thích hợp sẽ xuất hiện một tia sáng hình Gauss kết hợp không gian (b) được đặc trưng bởi một góc mở nhỏ, mặt sóng hình cầu và phân bố cường độ hướng tâm ứng với bình phương của một đường cong hình Gauss (b). Với người quan sát điều đó cho họ một "tia laser" đặc trưng, tức là cho thấy trên một màn ở xa laser một vết sáng đơn sắc rất sáng, tương đối nhỏ.

Tính kết hợp thời gian được xác định bằng phương pháp giao thoa. Người ta định nghĩa chiều dài kết hợp là chiều dài ứng với khác biệt tối đa giữa hai sóng giao thoa nhau, mà với khác biệt này chúng ta vẫn còn quan sát được hiện tượng giao thoa.

Trong khi các đèn quang phổ dùng sự phóng điện trong chất khí thông dụng, chúng ta sẽ đo được chiều dài kết hợp ở bậc độ lớn hàng mét, thì với một laser He-Ne đã được ổn định hoá, chúng ta thậm chí có thể đạt tới chiều dài kết hợp khoảng hơn một trăm mét. Chiều dài kết hợp lớn có nghĩa là độ rộng dải phổ của bức xạ rất nhỏ, vậy là hai độ lớn này tỷ lệ nghịch với nhau. Như vậy ánh sáng laser là dải hẹp, nghĩa là thuần nhất về tần số. Bởi vậy những laser đặc biệt được ổn định hoá, rất thích hợp dùng làm chuẩn tần số để xác định các đơn vị cơ bản là mét và giây (xem chương *Ứng dụng laser vào đo lường*).

b. Tia hình Gauss

Từ tính chất kết hợp không gian ta suy ra rằng, trong nhiều trường hợp trường bức xạ của một laser sẽ được mô tả như là một tia sáng có hình Gauss (xem hình 1.8a). Tia Gauss này có đặc trưng là ở gần trục của tia thì mặt sóng là mặt cầu, và biên độ của sóng kể từ trục ra theo hướng bán kính sẽ giảm theo hàm Gauss (như ở một cơ bản). Ở đây một mặt lý giải được cho khả năng hội tụ rất tốt của tia laser, điều đó có nghĩa là góc mở thường chỉ cỡ vài phút góc. Khi chọn được đúng chỉ số cho kích thước của buồng cộng hưởng, ta có thể đạt được ở khoảng

cách 1000 mét xa nguồn laser thì chùm tia laser cũng chỉ mở rộng đến vài centimét. Mặt khác bằng một thấu kính thì một tia như thế có thể hội tụ vào một vết có độ lớn tối thiểu mà tiết diện của nó có bậc độ lớn là bình phương bước sóng.

c. Biến điệu độ phẩm chất (Q-switching)

Như đã thảo luận ở trên, để tạo ra các xung laser ngắn, chúng ta có thể áp dụng nhiều phương pháp khác nhau. Một trong các phương pháp đó là.

Biến điệu độ phẩm chất (Q-switching), Q là viết tắt của quality. Nhờ một khoá quang học bên trong buồng cộng hưởng ta có thể khoá một trong hai gương của buồng cộng hưởng. Qua đó phẩm chất của buồng cộng hưởng có thể đóng (đưa về một trị số rất nhỏ) sao cho không thể phát laser được (không xuất hiện dao động), và như vậy là năng lượng bơm được tích lại trong môi trường laser. Khi khoá quang học mở, buồng cộng hưởng bỗng dưng có độ phẩm chất rất tốt, và năng lượng đã tích sẽ được phóng ra theo một dao động dạng xung. Một cách đặc trưng thì một xung ánh sáng như vậy sẽ kéo dài vài nanô-giây (10^{-9} s).

d. Khoá một (mode-locking)

Kỹ thuật thứ hai được gọi là *khoá một*. Ở đây bổ sung cho Q-switching, các pha của các một của buồng cộng hưởng cũng sẽ được ghép với nhau. Khi người ta chổng chất một sóng hình sin với các hoạ ba của nó sao cho các cực đại trùng với nhau một cách tuần hoàn, thì xét về toàn bộ, sẽ rút ra được một chuỗi

tuần hoàn các xung hết sức ngắn: ở những nơi mà các cực đại trùng nhau, các biên độ sẽ tổng hợp lại thành những trị rất lớn; trong khi ở miền giữa do có sự liên tục đổi dấu mà các biên độ sẽ triệt tiêu nhau, khi đó thời khoảng của một xung riêng lẻ tỷ lệ nghịch với số các họa ba đã được ghép. Ở các môi trường laser có độ rộng dải phát xạ lớn (xem hình 1.6b) bên trong dải luôn có một số rất lớn các mode mà pha của chúng có thể ghép với nhau. Ở cả hai trường hợp người ta đều dùng các linh kiện quang điện, chẳng hạn các tế bào Pockels, các môđulato quang âm, hoặc một số chất màu hữu cơ có độ hấp thụ phụ thuộc một cách phi tuyến vào cường độ ánh sáng.

e. Hiệu suất

Nói chung các laser đều có hiệu suất hiệu dụng tương đối nhỏ. Hiệu suất hiệu dụng được định nghĩa là tỷ số giữa công suất quang học và công suất điện vào. Các giá trị sẽ dao động giữa vài phần nghìn (laser He-Ne, laser ruby...), 15 đến 20% (laser CO₂) và thậm chí xấp xỉ 50% (laser bán dẫn). Khi đó hiệu suất hiệu dụng được xác định qua hiệu suất khi kích thích môi trường laser và khi chuyển đổi năng lượng kích thích thành năng lượng photon (hiệu suất lượng tử). Chỉ duy nhất laser bán dẫn là có hiệu suất cao (xem chương *Laser vi chip*).

f. Công suất

Tuy hiệu suất nhỏ, nhưng công suất của laser lại rất cao. Ở chế độ CW (liên tục) công suất laser CO₂ có thể đạt tới hàng trăm kilô oát. Còn ở các laser rắn, chế độ mode-locking với thời

gian xung rất ngắn, người ta thậm chí đạt được hàng giga oát (10^9W). Với máy phát laser, rồi khuếch đại laser, sẽ đạt được hàng tera (ngàn tỷ) oát (10^{12}W). Dĩ nhiên khi công suất lớn như vậy được hội tụ lại thì ánh sáng laser sẽ gây ra nhiều hiệu ứng mới trong vật chất. Những laser có công suất lớn như vậy có vai trò quan trọng trong nghiên cứu phản ứng nhiệt hạch, cũng như tạo tia X.

g. Biến đổi bước sóng

Tính chất cuối cùng, nhưng không kém phần quan trọng, là biến đổi bước sóng. Mỗi laser đều có thể điều chỉnh tần số trong một miền nhất định dù rằng nhỏ. Người ta thực hiện điều đó bằng cách đưa một yếu tố chọn lọc tần số vào buồng cộng hưởng, và xác định các mức trong miền phát xạ của môi trường laser bằng cách thay đổi chiều dài buồng cộng hưởng. Riêng laser màu lại cho phép biến đổi liên tục bước sóng trong một miền tương đối rộng. Khi dùng một số chất màu laser thích hợp làm môi trường laser, ta có thể tạo ra bức xạ laser trong toàn bộ miền phổ từ tử ngoại gần đến hồng ngoại gần. Mỗi chất màu cho phép biến đổi trong dải bức xạ của nó từ 20 đến 50 nm nhờ dùng các phương pháp khác nhau. Điều này hết sức ưu việt cho các nghiên cứu quang phổ và cả sự kích thích chọn lọc các phân tử trong các quá trình quang hoá (xem phần ứng dụng).

Nói chung không thể dùng một laser duy nhất để thực hiện được tất cả những tính chất nêu trên. Nhưng kỹ thuật laser đã tiến bộ tới mức đối với phần lớn các mục đích ứng dụng người ta đã có sẵn những laser thích hợp, và dĩ nhiên chúng sẽ hoàn thành tất cả những mục đích được đặt ra.

1.4. CÁC LOẠI LASER CHÍNH

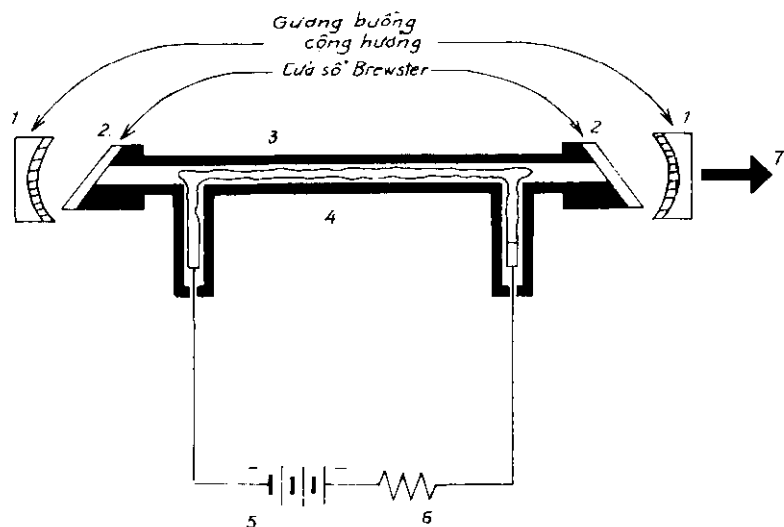
Trong số rất nhiều loại laser khác nhau, chúng tôi thấy cần nêu 4 loại cơ bản để làm ví dụ cho bạn đọc thấy được các đặc trưng của các môi trường laser khác nhau, và phương pháp tạo phân bố đảo, để làm nền cho việc suy luận ra các laser khác.

a. Laser khí

Ngày nay laser khí được sử dụng tương đối phổ biến và có giá bán rất rẻ vì người ta đã chế tạo được số lượng tương đối lớn, trong đó thông dụng hơn cả là laser He-Ne. Laser He - Ne được dùng làm dụng cụ điều chỉnh cho các hệ cơ học và quang học, trước đây cho chỉ thị và cho máy in nhưng nay đã bị laser bán dẫn thay thế. Laser này do A. Javan, W. R. Bennett và D. R. Herriott phát minh vào năm 1960, chỉ sau laser ruby ít lâu.

Môi trường hoạt tính của laser khí là hỗn hợp các chất khí ở thể nguyên tử là heli và neon được bơm vào một ống mao dẫn ở áp suất vài trăm pascal theo tỷ lệ 10:1. Ống này ở bên cạnh có thể tích dự trữ (xem hình 1.9). Hình 1.10 cho thấy sơ đồ số hạng năng lượng đã đơn giản hoá của các nguyên tử này. Để kích thích, người ta áp dụng hiện tượng phóng điện trong khí kìm với cường độ dòng điện vài miliampe và hiệu thế vài nghìn vôn. Các điện tử giàu năng lượng khi phóng điện sẽ kích thích các nguyên tử heli do va chạm (va chạm loại 1) và đưa chúng về một trong các trạng thái có thời gian tồn tại lâu (siêu bền) mà chỉ có thể từ đó thông qua va chạm với các nguyên tử neon (va chạm loại 2) để trở về trạng thái cơ bản. Khi đó năng lượng kích thích sẽ được truyền cho các nguyên tử neon, sau đó chúng sẽ ở

một trạng thái mà từ đây nhờ bức xạ ánh sáng chúng có thể chuyển về các trạng thái năng lượng thấp hơn. Sự hình thành phân bố đảo ở mức laser trên phụ thuộc vào việc chọn được các điều kiện thích hợp (hỗn hợp khí, áp suất khí, sự phóng điện). Vậy các nguyên tử neon mới thực sự là môi trường hoạt tính, trong khi heli thực chất chỉ là “khí bơm”.



Hình 1.9:

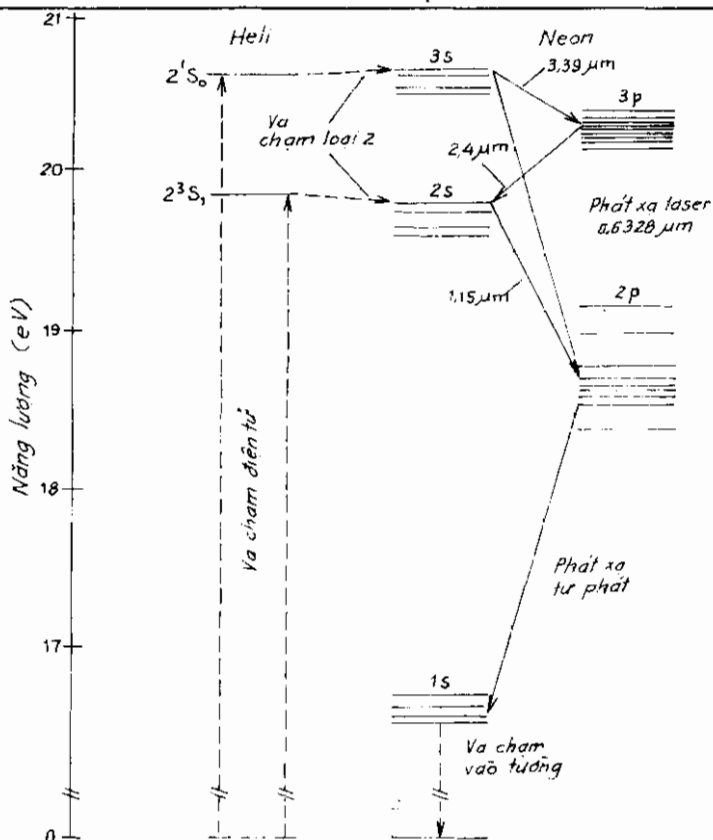
Sơ đồ nguyên tắc của laser He-Ne. Ống phóng laser được bơm đầy hỗn hợp khí nguyên tử heli và neon và được phóng điện cao thế. Một điện trở hạn chế dòng điện là cần thiết với mọi phóng điện hồ quang. Ống mao dẫn với hỗn hợp khí được hàn kín hai đầu bằng các cửa sổ đặt theo góc Brewster. Nhờ vậy ánh sáng có vectơ điện dao động trong mặt phẳng hình vẽ, đi qua mà không bị mất mát phản xạ. ánh sáng phân cực với nó, trái lại phản xạ ra khỏi buồng cộng hưởng và không được khuếch đại. Bởi vậy laser cho ta ánh sáng phân cực thẳng. Buồng cộng hưởng gồm hai gương cầu bằng điện môi trường được bố trí sao cho tâm của gương này nằm trên mặt của gương kia (buồng cộng hưởng đồng tâm). Để lấy bức xạ ra thì gương phải sẽ phải truyền qua một chút.

1. gương buồng cộng hưởng; 2. cửa sổ Brewster, 3. ống mao dẫn thạch anh; 4. phóng điện trong chất khí; 5. nguồn điện thế; 6. điện trở phụ; 7. tia laser.

Mức laser dưới được giải phóng nhanh cho trống nhờ bức xạ tự phát nhanh về một trạng thái nằm ở dưới có thời gian tồn tại dài (trạng thái 1s) sau đó do va chạm mà các nguyên tử neon vào thành ống mao dẫn phóng điện, sẽ được khử hoạt hoá. Đường kính của ống mao dẫn thường từ 1 đến 4 mm, ảnh hưởng tới chức năng của laser. Nếu đường kính lớn quá thì trạng thái 1s sẽ không được làm trống như yêu cầu, và công suất laser sẽ giảm.

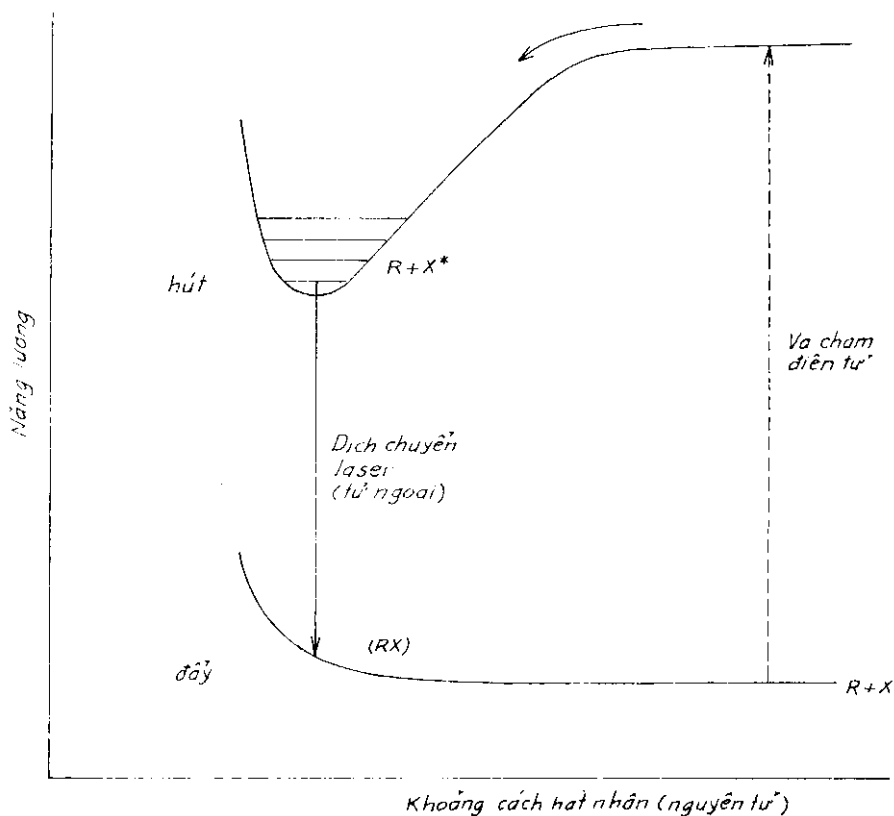
Buồng cộng hưởng thường gồm các gương lõm hoặc được gắn trực tiếp vào các đầu ống, hoặc được cố định bằng những giá đỡ điều chỉnh được, ở ngoài. Các gương này có độ phản xạ gần như 100%. Việc phát minh ra các lớp gương phản xạ cao gồm nhiều lớp bằng vật liệu điện môi trong suốt lần lượt có chiết suất khác nhau (gọi là gương giao thoa) đã đi kèm với sự phát triển của laser. Những cải tiến trong phương pháp chế tạo đã cho phép tạo ra những gương gần như không bị mất mát ánh sáng. Công nghệ chế tạo gương hiện nay đạt đến mức laser He-Ne, ngoài ánh sáng đỏ (632,8 nm), còn phát cả ánh sáng da cam, vàng và xanh lá. Các dịch chuyển này có khuếch đại hết sức nhỏ nên rất nhạy cảm với những mất mát ánh sáng của buồng cộng hưởng. Nếu dùng gương ngoài thì ống được gắn ở hai đầu với hai tấm thuỷ tinh theo góc Brewster (gọi là cửa sổ Brewster). Cửa sổ này chỉ cho ánh sáng phân cực theo phương nhất định đi qua, còn các ánh sáng khác sẽ có mất mát lớn.

Hiệu suất hiệu dụng của laser He-Ne là 0,1%, công suất ra nói chung chỉ vào khoảng milioát. Bức xạ của laser He-Ne có tính chất kết hợp cao và chất lượng chùm tia rất tốt nên như trên đã nói, thích hợp cho kỹ thuật đo.



Hình 1.10:

Sơ đồ mức năng lượng của laser khí He-Ne. Các nguyên tử heli do va chạm điện tử trong phóng điện mà được kích thích sơ cấp, nhờ tiếp tục va chạm truyền năng lượng của mình cho các nguyên tử neon, chúng sẽ được kích thích lên trạng thái $1s$ hay $3s$. Từ đây có thể có một loạt các dịch chuyển bức xạ trong miền hồng ngoại và khả kiến về các mức nhất định của các trạng thái $2p$ và $2s$. Bởi vì các mức trên là siêu bền và các mức dưới được giải phóng rất nhanh, nên có thể đạt phân bố đảo và vì vậy trên các dịch chuyển bức xạ có thể xuất hiện bức xạ laser. Vạch nổi tiếng nhất ở miền đỏ là $0,6328 \mu\text{m}$ (vạch đỏ của laser He-Ne), nhưng mạnh nhất lại là vạch hồng ngoại $1,15 \mu\text{m}$. Qua các gương buồng cộng hưởng có tính chọn lọc bước sóng cũng có thể chọn các vạch khác (bước sóng $3,25$, $2,4$ và $1,15 \mu\text{m}$).

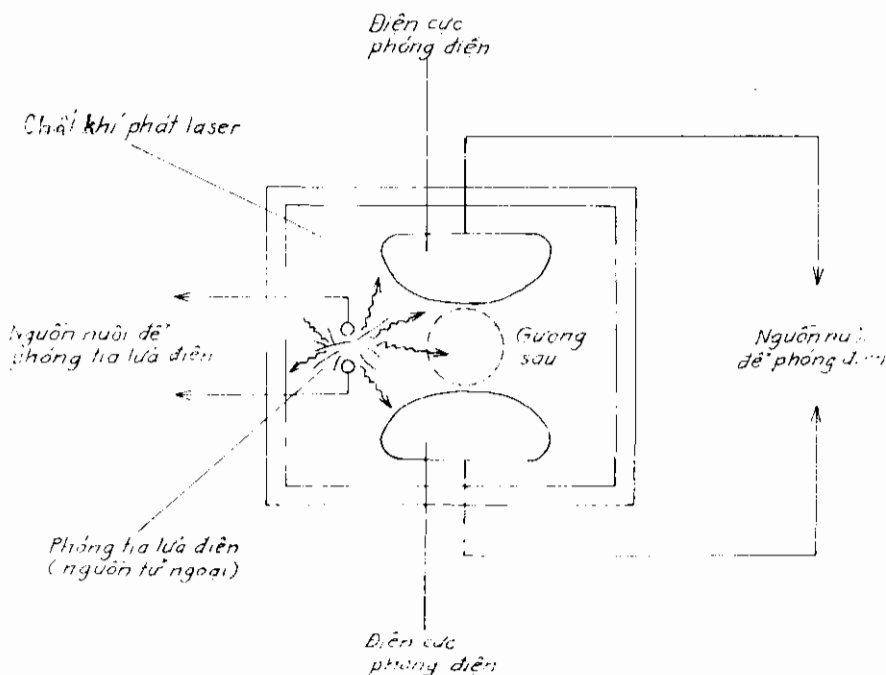


Hình 1.11:

Với laser excimer, môi trường laser là một hỗn hợp khí gồm các nguyên tử khí hiếm (X) và nguyên tử (R). Sau khi được bơm qua phóng điện cao áp, sẽ hình thành những phân tử khí hiếm halogenua kích thích, có thời gian sống ngắn. Thông qua phát bức xạ (phát xạ laser tử ngoại), chúng trở về trạng thái cơ bản (RX) [không cố kết] và lại phân hủy ngay. Với laser excimer, ta dùng các khí hiếm là argon, krypton và xenon, còn các halogen trong laser excimer là clo và flo.

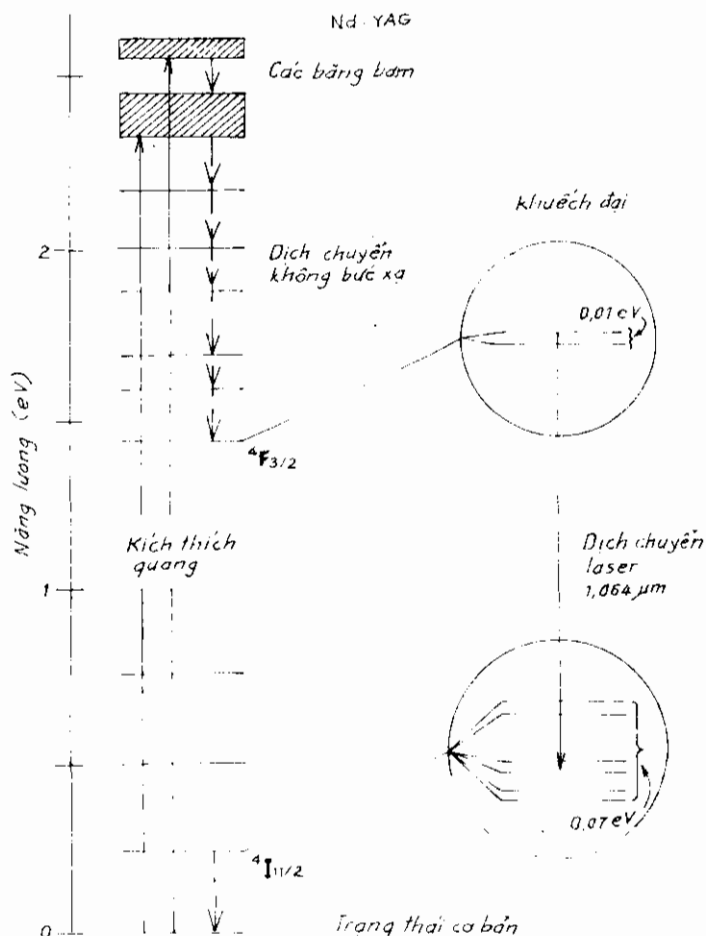
Các loại laser khí phổ biến ngoài laser He-Ne còn có laser CO₂, phát ở miền hồng ngoại trung bình (bước sóng $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$) với công suất rất lớn (chủ yếu có ứng dụng công nghiệp).

Laser argon phát ba bước sóng trong miền xanh lá, và laser excimer (gọi tắt của excited dimer, là dimer-chất nhị trùng, cao phân tử gồm hai phân tử, ở trạng thái kích thích) phát trong miền tử ngoại trung bình (xem chương *Ứng dụng của laser trong ngành y tế*).



Hình 1.12:

Mặt cắt qua một ống laser excimer cho thấy các điện cực có dạng đặc trưng cho phóng điện chính. Vấn đề ở đây chính là sự phóng điện cao thế, năng lượng rất lớn, được nuôi bởi các điện cực đặc biệt. Các điện cực này, ở điện dung lớn lại phải có một độ cảm hết sức thấp, sao cho có thể đạt được xung phóng điện ngắn, có phóng tia lửa điện bổ sung nhằm tiến ion hoá khối khí và qua đó làm cho phóng điện chính đồng nhất hơn. Để có thể sử dụng một cách tối ưu phát xạ được tạo ra bởi cách này, sẽ có một gương nhằm phản xạ phản hướng về phía sau của phát xạ laser, đi ngược trở lại phía trước.



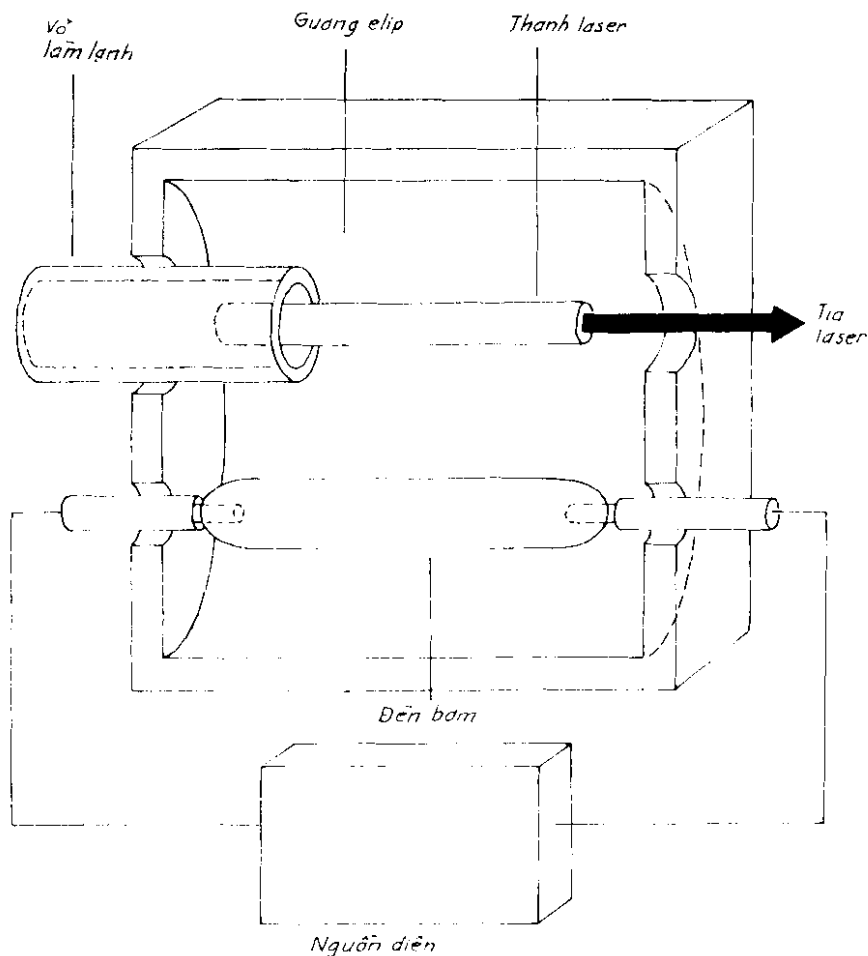
Hình 1. 13:

Ta có thể thông qua sự chiếu xạ ánh sáng để bơm năng lượng vào các đám hấp thụ rộng trong một đơn tinh thể yttri nhôm granat (YAG) có pha tạp các ion neodym tích điện dương ba. Mức laser trên - là một thành phần của mức $4F_{3/2}$ - sẽ được cư trú bởi các dịch chuyển không phát xạ, và nhanh. Từ đó sẽ xảy ra một dịch chuyển phát xạ hồng ngoại xuống mức dưới $4I_{11/2}$, trên đó có thể gây ra sự khuếch đại ánh sáng thông qua phát xạ cưỡng bức. Mức cuối luôn luôn trống, bởi vì nằm quá cao trên trạng thái cơ bản tới mức nó không được cư trú do cân bằng nhiệt, và bởi vì nó cũng sẽ được giải toả nhanh thông qua các dịch chuyển không phát xạ.

b. Laser rắn

Laser rắn là loại laser cổ nhất. “Maser quang học” của Maiman (1960) dùng tinh thể ruby làm môi trường hoạt tính, đó là đơn tinh thể saphir có pha tạp 0,05% ion crôm. Tuy lúc đầu laser ruby được dùng phổ biến, nhưng ngày nay người ta lại hay dùng laser neodym-YAG (Nd:YAG). Môi trường hoạt tính ở đây là một đơn tinh thể nhân tạo ytri-nhôm (al)-granat (YAG) có 1% các ion Y^{13} được thay bởi các ion đất hiếm Nd^{13} . Sơ đồ số hạng năng lượng đơn giản hoá (xem hình 1.13) cho thấy nhiều mức sắc nét bị chồng chất bởi hai dải bơm rộng. Do hấp thụ ánh sáng khả kiến từ một miền phổ rất rộng, năng lượng sẽ được cung cấp vào cho các ion Nd hoạt hóa laser, rồi ngay sau đó, thông qua những dịch chuyển rất nhanh mà không bức xạ, nó được chuyển cho những mức laser trên. Trạng thái này có thời gian tồn tại tương đối dài (vài trăm micro-giây). Nó liên hệ với mức laser dưới qua một dịch chuyển quang học mạnh, bước sóng bức xạ nằm ở miền hồng ngoại. Mức này không bức xạ mà tự giải phóng rất nhanh để về trạng thái cơ bản. Trái với ruby có 3 mức thì Nd:YAG là một hệ 4 mức với tất cả những ưu việt vừa nêu trong sự tạo ra phân bố đảo.

Hình 1.14 cho thấy sơ đồ bơm rất đặc trưng cho loại laser này. Thanh Nd: YAG và nguồn sáng bơm đều được đặt vào một hộp phản xạ tốt, thường là một gương trụ elip có thanh YAG nằm ở một tâm, nguồn bơm nằm trên tâm kia (đường tiêu) của trụ elip. Để có chế độ phát laser liên tục, người ta dùng đèn hồ quang krypton hay đèn halogen, còn chế độ phát laser xung dùng đèn chớp xenon. Thường thì do chất lượng quang học tốt

**Hình 1.14:**

Có nhiều phương pháp để bơm một laser rắn. Ở đây thì hệ thiết bị gồm một vỏ ngoài phản xạ có dạng hình trụ elip. Thanh laser và đèn bơm được bố trí dọc theo các đường tiêu. Để bơm một laser Nd:YAG, ta có thể dùng cả đèn liên tục cũng như đèn chớp.

của tinh thể Nd:YAG mà người ta dễ dàng đạt một TEM₀₀ có phân bố cường độ rất tốt. Xung ngắn đạt bởi biến điệu độ phẩm chất hay mode-locking, có thể dễ dàng đạt picô-giây.

Laser này bức xạ ở miền hồng ngoại 1,064 μm . Thông qua hiệu ứng quang phi tuyến trong các tinh thể phi tuyến, có thể tạo các họa ba: họa ba bậc hai 532 nm (xanh lá) và các họa ba bậc ba 355 nm (tử ngoại) và họa ba bậc bốn 266 nm.

c. Laser màu

Laser màu cho phép điều chỉnh liên tục bước sóng bức xạ, được phát minh vào năm 1966 đồng thời bởi F. P. Schäfer và các cộng tác viên ở Viện Hoá Lý, Trường Đại học Tổng hợp Marburg (Đức) và P. Sorokin và J. R. Lankard ở IBM Watson Research Center (Trung tâm Nghiên cứu của Cty IBM) ở New York. Các dung dịch này (vì vậy loại laser này còn được gọi là laser chất lỏng) dùng các chất màu hữu cơ hoà tan trong cồn hay nước, hoặc các dung môi hữu cơ khác. Ưu điểm chủ yếu ở đây là có số rất lớn các chất màu có hoạt tính quang học, và miền phổ phát xạ rất rộng.

Chất màu (từ thông thường là thuốc nhuộm) hiểu theo nghĩa rộng gồm tất cả các hợp chất hấp thụ và bức xạ trong miền phổ khả kiến và phụ cận, tức là từ hồng ngoại đến tử ngoại gần.

Một cách tổng quát, các tính chất quang phổ chính của các phân tử màu sẽ được mô tả bởi một sơ đồ số hạng năng lượng đã được đơn giản hoá (xem hình 1.16). Sơ đồ số hạng năng

lượng này phản ánh những tính chất chung của các điện tử ở các phân tử màu, ở đó chúng bao quanh khung hạt nhân nguyên tử hết như một đám mây và người ta thường gọi chúng là các điện tử π (Pi). Các trạng thái năng lượng cho phép được đặc trưng bởi một loạt các mức dao động và quay, và chúng liên tiếp chồng chéo lên số hạng điện tử tương ứng.

Mỗi phân tử có hai hệ mức như thế, một hệ đơn (*singlett*) và một hệ bội ba (*triplett*). Các định luật của cơ lượng tử không cho phép xảy ra các dịch chuyển có bức xạ giữa các hệ này. Nhưng thực ra điều cấm kỵ này đã được nối lỏng bởi nhiều tác động khác nhau nên dấu sao những dịch chuyển như vậy vẫn có khả năng xảy ra, dù rằng với xác suất rất nhỏ. Thậm chí trong những điều kiện đặc biệt ta có thể chứng minh được bức xạ từ trạng thái bội ba thấp nhất đã được kích thích xuống trạng thái cơ bản, bức xạ này không phải là ánh sáng nào khác mà chính là bức xạ lân quang. Trong khi đó các dịch chuyển không bức xạ lại cho phép và nói chung xảy ra rất nhanh. Chỉ có dịch chuyển không bức xạ thấp nhất từ trạng thái bội ba về trạng thái đơn là khó thực hiện vì hiệu năng lượng quá lớn, bởi vậy trạng thái bội ba thấp nhất có thời gian tồn tại tương đối dài.

Trái lại, các dịch chuyển bức xạ, dù bên trong hệ đơn hay bên trong hệ bội ba, đều là cho phép. Nhưng bình thường chúng ta chỉ quan sát thấy các bức xạ này, cũng chính là ánh sáng rất phổ biến là huỳnh quang, ở dịch chuyển từ trạng thái đơn thứ nhất đã kích thích về trạng thái cơ bản, bởi vì năng lượng từ các trạng thái trên luôn cạnh tranh với bức xạ được phân bố cực

nhanh mà không có bức xạ. Nhưng ở nhiều chất màu, dịch chuyển đơn thấp nhất có thời gian tồn tại bức xạ ngắn tới mức bức xạ sẽ có thể cạnh tranh tốt với các dịch chuyển không bức xạ (hiệu ứng dập tắt), trong trường hợp này có thể tận dụng dịch chuyển đơn làm dịch chuyển laser. Khi đó sẽ tạo ra phân bố đảo bằng bơm quang học lên một trong số các mức đơn bên trên. Mức laser trên luôn là số hạng năng lượng thấp nhất của trạng thái đơn kích thích đầu tiên. Từ đó sẽ có dịch chuyển laser về một trong số các số hạng năng lượng dao động-quay của trạng thái cơ bản. Bởi vậy sơ đồ số hạng năng lượng này cũng thể hiện một hệ 4 mức.

Với laser màu, các dịch chuyển không bức xạ về hệ bội ba, và các hấp thụ giữa các mức bội ba luôn là những quá trình mất mát chủ yếu, dĩ nhiên đó là điều hoàn toàn không mong muốn. Vì tất cả các phân tử kết thúc bởi kích thích ở trạng thái bội ba thấp nhất, trước hết bị loại ra khỏi việc tiếp tục tham gia vào hoạt động laser, bởi vì chúng được lưu giữ ở đó trong một thời gian dài. Còn các phân tử mà ở đó sự kích thích và sự khử hoạt hoá sau đó giữa các mức bội ba, thậm chí thêm vào đó, lại còn rút các photon ra khỏi môi trường hoạt động, tức là bị tước mất từ nguồn ánh sáng bơm hay bức xạ laser. Để loại trừ các quá trình mất mát này, trong thực tế, người ta có thể giảm rất mạnh thời gian tồn tại ở trạng thái bội ba thấp nhất bằng cách hoà thêm các chất có phân tử dập tắt vào dung dịch, đồng thời gia tốc quá trình laser bằng cách bơm quang học với những xung ngắn có sườn nâng dựng đứng sao cho các dịch chuyển về hệ bội ba không có khả năng cạnh tranh được.

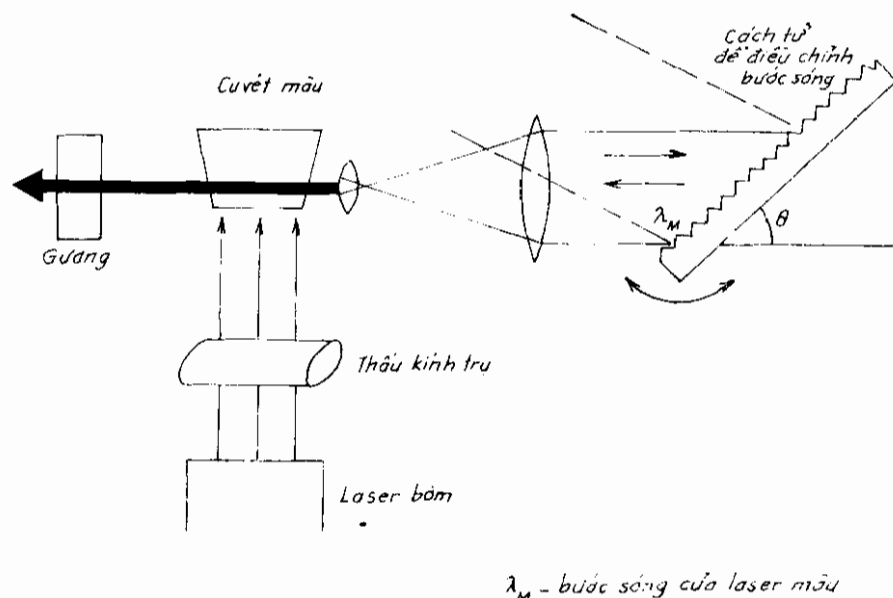
Các laser màu có thể được bơm bằng đèn chớp, cách bố trí tương tự như laser rắn (xem hình 1.14). Nhưng ở đây, thay vì thanh laser sẽ là dung dịch chất màu đựng trong một cuvet hình trụ. Những yêu cầu đặt ra cho sườn nâng dựng đứng của xung bơm đã thúc đẩy sự phát triển công nghệ chế tạo đèn chớp điện tử rất nhiều. Nhưng người ta lại thường hay dùng một laser khác làm nguồn bơm laser màu. Để phục vụ mục đích này, ngoài các laser khí liên tục có công suất rất lớn, đặc biệt là laser ion argon, người ta cũng còn dùng các laser excimer hay laser Nd:YAG.

Nhờ các chất màu hữu cơ cho laser hiện đang có bán trên thị trường là khá đầy đủ, laser màu đã phủ kín miền quang phổ từ 320 đến 940 nm. Bằng cách bố trí hệ thiết bị như trên hình 1.15, chúng ta có thể điều chỉnh liên tục bước sóng trên gần như toàn bộ dải phát xạ của chất màu đã chọn. Thay đổi bước sóng này nhờ quay cách tử nhiều xạ - phản xạ mà ở đây đã thế chỗ cho gương phản xạ thứ hai của buồng cộng hưởng, bởi vì cách tử này sẽ chỉ phản xạ một bước sóng duy nhất về phương trục buồng cộng hưởng.

Những năm qua, nhờ laser màu chúng ta đã đạt được tiến bộ hết sức nhanh trong việc tạo các xung siêu ngắn (xem chương 5). Xung ngắn nhất hiện nay đã đạt tới 4 femtogiây (10^{-15} s). Với bước sóng trung bình 620 nm, xung này ứng với thời khoảng của 5 chu kỳ dao động của sóng ánh sáng.

Khi tổ hợp một laser excimer với một laser màu, người ta có thể xây dựng một hệ laser cung cấp những xung tử ngoại

trong miền femtogiây đạt công suất đỉnh vài tera oát. Với xung này chúng ta có thể bơm một laser tia X để nghiên cứu cấu trúc sinh học bằng một kính hiển vi tia X.



Hình 1.15:

Với laser màu điều chỉnh bước sóng, bơm bằng laser thì dung dịch màu được bơm ngang do ánh sáng của laser bơm được hội tụ qua một thấu kính trụ thành hình một vạch trên cuvet laser. Để điều chỉnh bước sóng, ta dùng một cách tử nhiễu xạ-phản xạ có thể quay được theo cách bố trí Littrow - với vị trí góc đặt đã chọn thì chỉ có một khoảng bước sóng hẹp mà nó tự phản xạ về mình một cách tối ưu. Trong buồng cộng hưởng, còn có một kính viễn vọng gồm hai thấu kính, qua đó chùm tia sẽ được mở rộng để giảm bớt mật độ công suất trên cách tử và ngăn cho nó không bị bức xạ phá hủy. Ngoài ra nhờ cách đó mà sự chọn lọc bước sóng cũng sẽ được nâng cao, bởi vì sẽ có một số lớn hơn các rãnh của cách tử được rọi sáng.

d. Laser bán dẫn

Ngày nay trong truyền thông người ta đã dùng các xung ánh sáng của laser bán dẫn để truyền trong môi trường truyền thông là sợi quang học. Tiến bộ của laser bán dẫn luôn đi cùng với sự phát triển của sợi quang học ít bị mất mát. Ưu điểm của hệ truyền thông quang học là ở chỗ:

- ♦ dung lượng truyền (hệ quang gấp 4 bậc độ lớn so với hệ điện),
- ♦ mất mát truyền (hệ quang nhỏ hơn 2 bậc độ lớn), và
- ♦ tỷ lệ sai hỏng (nhỏ hơn một bậc độ lớn).

Tuy nhiên laser bán dẫn được chế tạo hiện nay vẫn chưa là lý tưởng cho ngành truyền thông quang học. Nhược điểm của nó chủ yếu là tính đơn sắc kém, khi các bước sóng khác nhau chuyển động trong sợi quang học với vận tốc khác nhau thì tín hiệu tất yếu bị méo ngay. Để khắc phục điều đó, phải dùng laser C_3 (*cleaved-coupled-cavity: buồng cộng hưởng ghép nối rồi dính chặt*), đó là một laser có buồng cộng hưởng được tách ra rồi ghép nối lại.

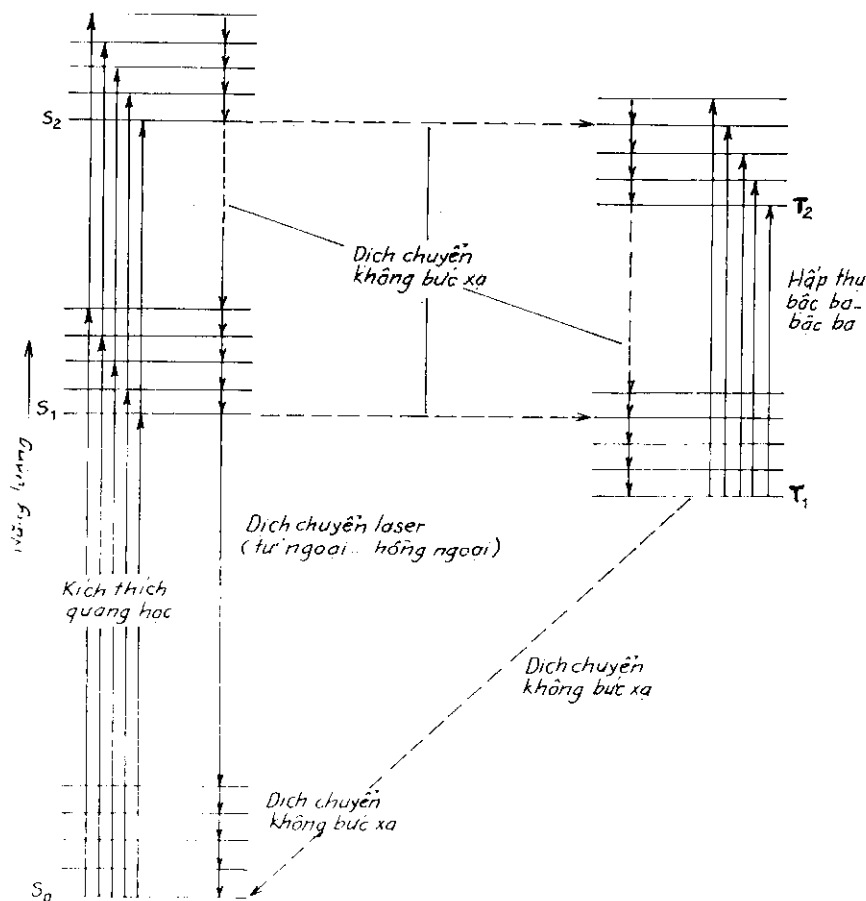
Thực ra, đó chỉ là một sự ghép nối hai laser bán dẫn thông thường có định hướng để sao cho chúng tương tác quang học với nhau, nhưng về mặt điện phải độc lập với nhau. Trong cách bố trí này, do tương tác phổ với nhau sẽ bức xạ một tia sáng có bước sóng duy nhất. Thêm vào đó, chúng ta còn có thể điều chỉnh được bước sóng này, vì vậy, người ta có thể đóng mở rất nhanh từ bước sóng này sang bước sóng khác.

❖ Nguyên tắc hoạt động của laser bán dẫn

Tất cả các laser hiện nay dùng trong các hệ truyền thông quang học đều là laser bán dẫn (xem hình 1.16). Các laser này chỉ nhỏ cỡ một vài milimét, nhưng chúng lại chuyển được xung điện thành xung ánh sáng. Chúng tiêu thụ rất ít công suất điện: dòng điện đặc trưng vài miliampe, còn điện thế 1 đến 2 vôn. Chúng bức xạ ánh sáng ở miền bước sóng mà ở đó các sợi quang học truyền qua. Khác với phần lớn các loại laser khác, laser bán dẫn làm việc rất ổn định và bền, có độ tin cậy cao về mặt cơ học.

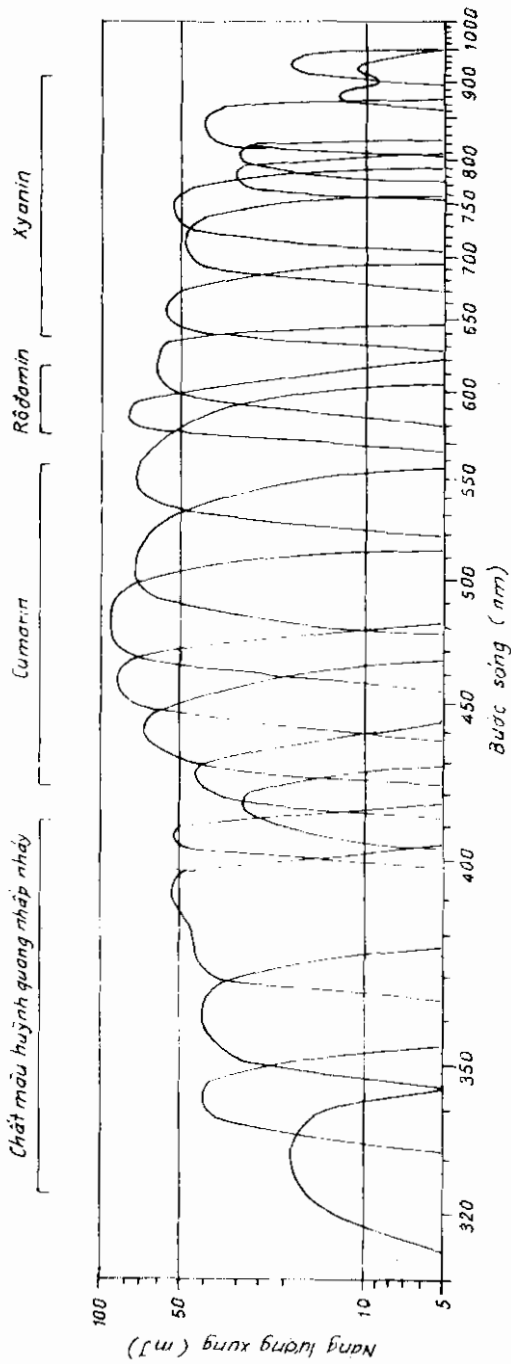
Về nguyên tắc đã gọi là bán dẫn thì chúng phải là vật liệu có độ dẫn điện nằm giữa một chất cách điện và một chất dẫn điện, chẳng hạn kim loại (xem hình 1.2). Trong chất cách điện, các điện tử liên kết chặt với các nguyên tử, còn trong chất dẫn điện thì các điện tử ngoài cũng ở dạng liên kết, nhưng chỉ cần cung cấp một lượng nhỏ năng lượng cũng đủ làm chúng trở thành các điện tử chuyển động tự do và đóng góp vào việc làm cho vật liệu trở thành dẫn điện.

Mô hình dải cho phép mô tả sự khác biệt này trong cách ứng xử dẫn điện của vật rắn. Trong một nguyên tử tách biệt, năng lượng quy cho mỗi điện tử ở một trạng thái nhất định được định nghĩa hết sức rõ ràng. Trái lại trong một vật rắn, các nguyên tử được xếp đặt theo một cấu trúc mạng tuần hoàn. Từ đây xảy ra sự hoà trộn các trạng thái riêng lẻ thành những dải rộng các mức năng lượng cho phép. Các dải này tách biệt nhau bởi các "vùng cấm" các mức năng lượng không cho phép, được gọi là độ rộng vùng cấm.



Hình 1.16:

Sơ đồ mức của một chất màu hữu cơ gồm hai hệ - các trạng thái đơn (S) và các trạng thái bội ba (T). Nhờ bơm quang học mà các phân tử màu được đưa từ trạng thái cơ bản (S_0) lên các mức cao hơn của các trạng thái đơn S_1 hoặc S_2 , mà từ đó thì cuối cùng, thông qua những dịch chuyển không phát xạ, chúng sẽ nhanh chóng chuyển về mức thấp nhất là S_1 . Như vậy trên mức này xuất hiện một phân bố đảo. Dịch chuyển laser sẽ xảy ra từ mức S_1 thấp nhất này về một mức dao động quay của trạng thái cơ bản S_0 , là trạng thái được giữ cho luôn trống nhờ các dịch chuyển không phát xạ. Ở laser màu, các dịch chuyển về hệ bội ba và các hấp thụ bội ba - bội ba là những quá trình mất mát quan trọng nhất mà môi trường hoạt tính có thể gây ra.



Hình 1. 17:

Ở đây nhờ 22 chất màu hữu cơ thuộc 4 nhóm màu khác nhau, ta đã được một laser màu phát liên tục trong một khoảng phổ rất rộng là từ tử ngoại gần đến hồng ngoại gần. Các đường cong biểu diễn các khoảng điều chỉnh liên tục của từng chất màu, mà về nguyên tắc, ta sẽ đạt được với hệ trên hình 1. 15. Khi dùng một laser bơm khác thì việc lựa chọn các chất màu cũng phải thay đổi tương ứng.

Trong một kim loại, dải cao nhất về mặt năng lượng đã bị chiếm giữ, cũng chính đã lấp đầy phần nào bởi các điện tử, cho nên vẫn còn không gian cho các điện tử tự do trở thành vật tải điện. Trái lại, trong chất cách điện, dải cao nhất bị chiếm giữ lại đã hoàn toàn lấp đầy bởi các điện tử, và giữa nó và dải còn trống gần nhất còn một khoảng trống năng lượng rất rộng. Trong một chất bán dẫn thì dải cao nhất bị chiếm giữ (gọi là vùng hoá trị) cũng trống, nhưng vùng dẫn, chỉ thấp hơn chút ít ngay sát đó, lại chỉ bị ngăn cách với nó bởi một độ rộng vùng cấm có năng lượng rất nhỏ.

Một số vật liệu như các nguyên tố hoá học silic, gecmani, hay các chất bán dẫn liên kết hai nguyên tố (chẳng hạn indi với photpho) hay ba nguyên tố (chẳng hạn indi, gali và arsen) hoặc thậm chí số lớn hơn các nguyên tố, được gọi là bán dẫn riêng. Nhưng người ta lại hay pha tạp các khuyết tật vào các bán dẫn riêng để thay đổi tính chất điện và quang của chúng. Các vật liệu được chế tạo theo cách đó được gọi là bán dẫn khuyết tật.

Có hai loại bán dẫn khuyết tật : Ở bán dẫn loại n thì các nguyên tử khuyết tật, gọi là các donator cho một điện tử vào vùng dẫn (xem hình 1.18). Năng lượng cần thiết để đưa các điện tử này vào vùng dẫn nhỏ hơn so với năng lượng của độ rộng vùng cấm. Vì donator đã cho đi một điện tử nên nó sẽ mang điện tích dương.

Bán dẫn thứ hai được gọi là bán dẫn loại p . Ở đây một acceptor với tư cách là nguyên tử khuyết tật sẽ tiếp nhận một điện tử từ vùng hoá trị và để lại đó một điện tử khuyết tật, một

“lỗ trống”. Theo bất cứ phương diện nào lỗ trống này cũng ứng xử như là một điện tích dương. Vậy là về phần mình acceptor mang điện tích âm.

❖ Lớp tiếp xúc $p-n$

Điểm mấu chốt của ngành điện tử bán dẫn là lớp tiếp xúc $p-n$. Sự chuyển hay pha tạp từ bán dẫn loại n sang bán dẫn loại p chỉ xảy ra trong một vùng không gian hết sức nhỏ. Một tranzito chẳng hạn, gồm một tổ hợp tất cả các vật liệu $p-n-p$ hay $n-p-n$.

Nguyên tắc hoạt động của lớp tiếp xúc $p-n$ như sau: Xuất phát điểm là thời điểm khi các vật liệu p và n tiếp xúc với nhau (xem hình 1.19). Vào thời điểm này ở chiều n dư thừa điện tử, còn ở chiều p dư thừa lỗ trống, được kích thích qua độ chênh lệch không gian này về nồng độ nên các điện tử sẽ chuyển động về chiều p , còn các lỗ trống về chiều n .

Trong một chất bán dẫn lý tưởng, một điện tử và một lỗ trống khi gặp nhau sẽ tái hợp với nhau, vì vậy ở lân cận lớp tiếp xúc $p-n$ chỉ có ít vật tải điện tự do (điện tử và lỗ trống). Ở chiều p vậy là xảy ra sự dư thừa các acceptor tích điện âm và về mặt không gian là đứng yên trong tinh thể, còn ở chiều n cũng tương tự có sự dư thừa các donator tích điện dương. Sự phân bố điện tích này sẽ tạo ra ở lân cận lớp tiếp xúc một điện trường có tác dụng chống lại việc tiếp tục khuếch tán điện tử và lỗ trống.

Các chất bán dẫn với lớp tiếp xúc $p-n$ được dùng để thiết kế laser. Khi đó điều quyết định chính là ba quá trình quang học thiết yếu trong một chất bán dẫn :

- ◆ hấp thụ tự phát,
- ◆ bức xạ tự phát và
- ◆ bức xạ cưỡng bức (xem hình 1.20).

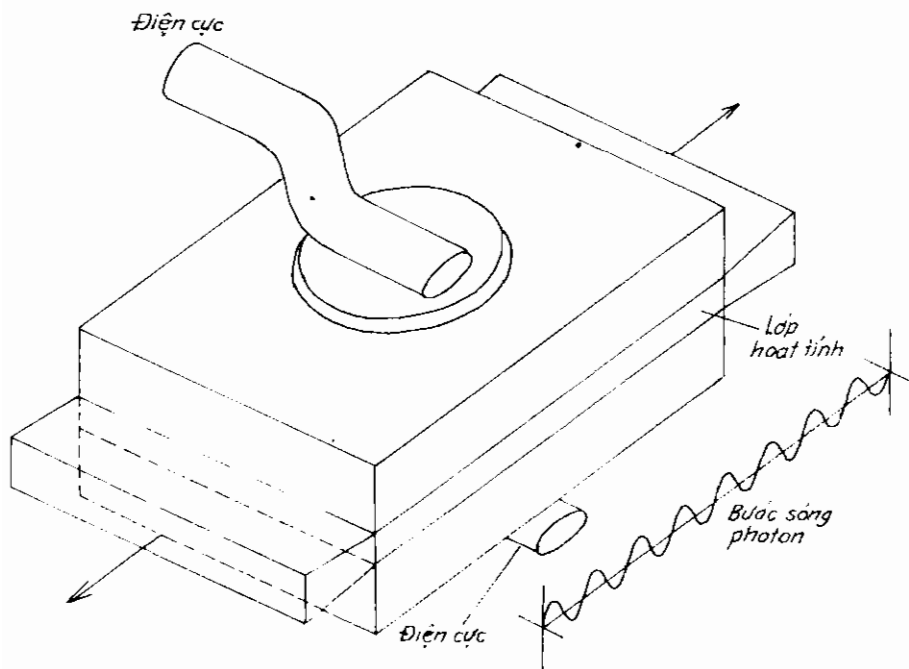
Trong quá trình hấp thụ, một photon mà năng lượng của nó vượt quá độ rộng vùng cấm, sẽ kích thích một điện tử, nâng nó lên vùng dẫn và để lại trong vùng hoá trị một lỗ trống. Một điện tử sẽ gây ra một quá trình ngược lại trong vùng dẫn. Nó đang ở trong một trạng thái kích thích và vì vậy không ổn định. Sau một thời gian rất ngắn, không cần có tác động nào từ bên ngoài, nó chuyển về vùng hoá trị và huỷ một lỗ trống ở đó; một photon có năng lượng bằng chính năng lượng của độ rộng vùng cấm sẽ được phát xạ ra.

Đối với hoạt động laser của linh kiện, điều quan trọng nhất lại chính là quá trình thứ hai: Bức xạ tự phát, xảy ra khi một photon có chính năng lượng bằng độ rộng vùng cấm gặp các điện tử đã được kích thích ở vùng dẫn, và gây ra bước dịch chuyển của một điện tử từ vùng dẫn lên vùng hoá trị, khi đó sẽ có một photon được bức xạ ra.

Trong quá trình này cả năng lượng lẫn pha của photon hấp thụ và bức xạ sẽ trùng hợp với nhau. Nếu nhìn từ góc độ trường sóng, cả hai sóng này đều có một quan hệ pha cố định. Khi đó sự bức xạ photon có thể gây ra dịch chuyển giữa một vùng và một mức năng lượng của khuyết tật, lẫn cả dịch chuyển giữa hai mức khuyết tật.

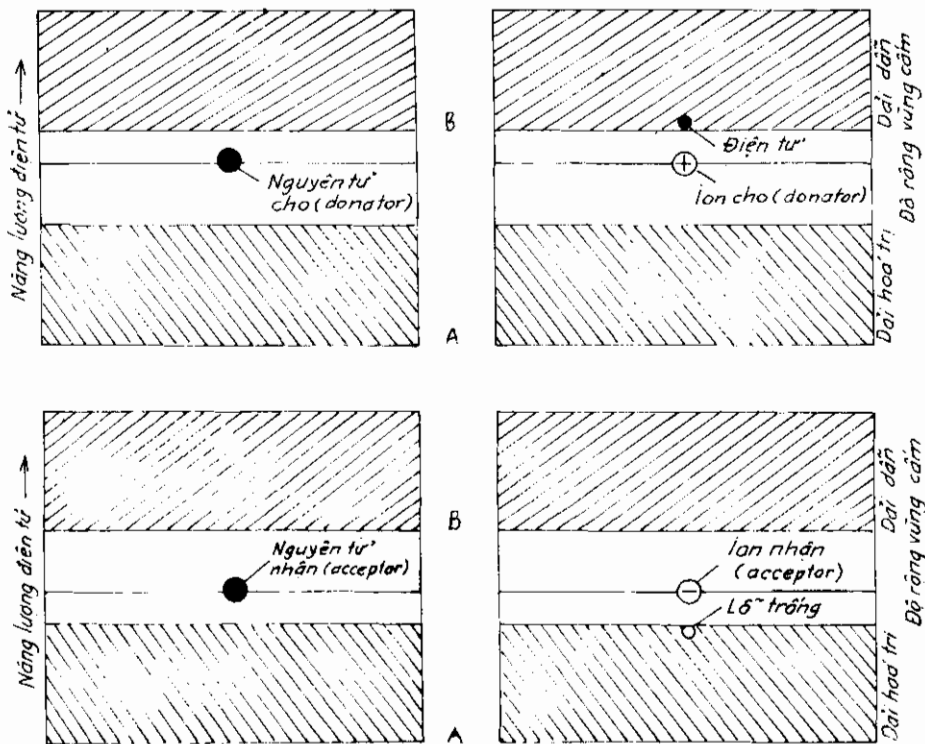
Những vật tải điện trong vùng dẫn và vùng hoá trị đều có một phân bố thống kê, và mức năng lượng của các khuyết tật sẽ

gây ra những vùng năng lượng hẹp. Bức xạ mà một laser bán dẫn phát ra, vì vậy về mặt bước sóng, sẽ phải có một độ rộng dải nhất định.



Hình 1.18:

Laser bán dẫn đơn giản nhất là một lớp chuyển tiếp p - n trong một tinh thể bán dẫn mà các mặt cuối của nó phẳng và song song một cách lý tưởng. Hai mặt cuối này tạo nên một buồng cộng hưởng gồm các gương phản xạ một phần, chúng phản xạ các photon đi qua đi lại trong lớp hoạt tính của tinh thể. Khi có dòng điện chạy qua, do bức xạ tự phát sẽ sinh ra các photon. Các photon đi qua chất bán dẫn gây ra một thác lũ bức xạ cưỡng bức. Phản xạ ở gương tạo ra sự khuếch đại ánh sáng nếu như bước sóng của các photon phù hợp với chiều dài buồng cộng hưởng laser. Bên phải hình là ví dụ cho khuếch đại ánh sáng do phản xạ.



Hình 1.19:

Chất bán dẫn là vật liệu ở đó nếu ta cung cấp một lượng năng lượng nhỏ cho nó, ta sẽ đưa điện tử từ dải hoá trị (A) lên dải dẫn (B). Ở A các điện tử liên kết chặt chẽ với nguyên tử, còn ở B, các điện tử chuyển động tự do. Nếu ta pha tạp các khuyết tật vào một bán dẫn, chẳng hạn silic, ta có thể tạo ra hai loại chất bán dẫn về nguyên tắc là mới: Trong một bán dẫn loại n, các nguyên tử khuyết tật gọi là donator sẽ cung cấp một điện tử cho dải dẫn, khi đó các donator sẽ thành các ion dương. Trong một bán dẫn loại p, các nguyên tử khuyết tật gọi là các acceptor sẽ tiếp nhận một điện tử từ dải hoá trị và để lại đó một "lỗ trống".

Lớp tiếp xúc $p-n$ có thể trở thành một nguồn sáng lý tưởng, muốn vậy người ta chỉ cần nối lớp tiếp xúc $p-n$ với một nguồn điện. Hiệu điện thế rơi ở lớp tiếp xúc $p-n$ sẽ tác động chống lại điện trường ở chính lớp tiếp xúc, qua đó ngưỡng năng lượng đã cản trở dòng điện tử và lỗ trống đi qua lớp tiếp xúc, sẽ được phần nào giải toả (xem hình 1.21).

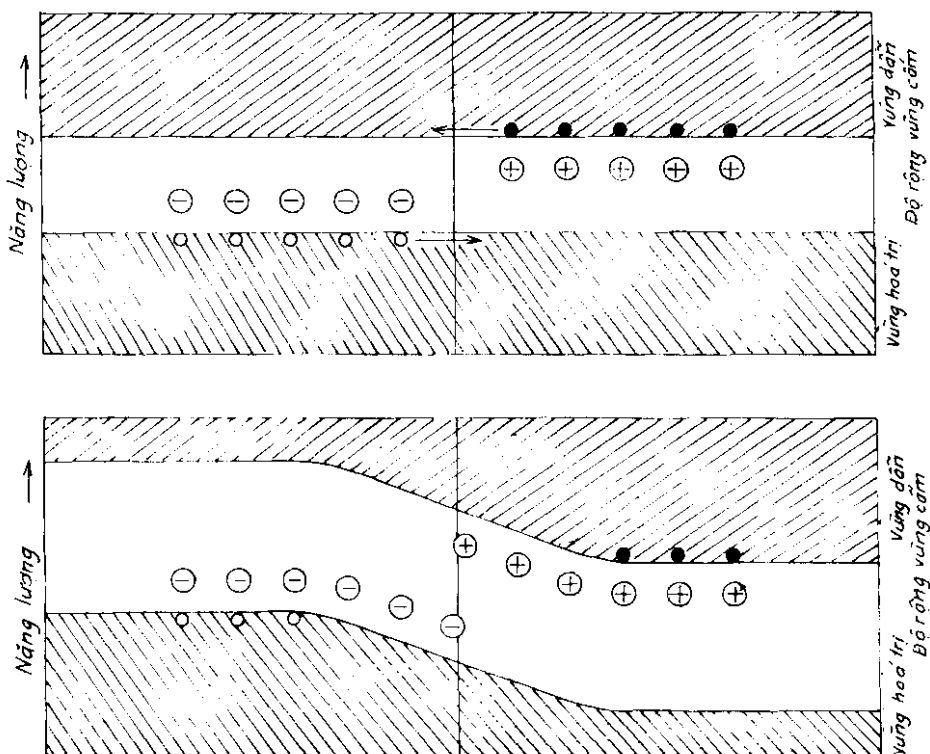
Bây giờ điện tử có thể đi từ chiều n sang chiều p và ở đó chúng sẽ tái hợp với lỗ trống, khi đó photon sẽ được bức xạ một cách tự phát. Điều tương tự cũng xảy ra với lỗ trống đi từ chiều p sang chiều n . Nếu hiệu điện thế áp đặt đủ lớn để giải toả hầu như toàn bộ ngưỡng năng lượng, thì phần lớn những vật tải điện sẽ có thể vượt qua ngưỡng, và qua chính dòng vật tải điện liên hệ với điều đó, sẽ hình thành một sự phân bố mà ta đã quá quen là phân bố đảo.

Quan trọng hơn là ở lân cận lớp tiếp xúc, đó là lớp hoạt tính của tinh thể bán dẫn, số các photon được bức xạ sẽ lớn tới mức làm xuất hiện được bức xạ cưỡng bức. Khi chúng ta ngắt điện, bức xạ photon cũng ngừng ngay. Vậy xung sáng được bức xạ ra sẽ là một đặc tuyến cho xung điện: Linh kiện bán dẫn đã chuyển tín hiệu điện thành tín hiệu quang.

Ngoài bức xạ cưỡng bức, còn phải thoả mãn được điều kiện thứ hai cho sự phát laser thì linh kiện mới có thể hoạt động như một laser: Hai mặt cuối của tinh thể, thẳng góc với lớp tiếp xúc $p-n$, phải hoàn toàn phẳng và song song với nhau (xem hình 1.22). Hai mặt cuối đó sẽ tạo nên một cặp gương phản xạ, chúng đưa các photon đã được tạo ra trong lớp hoạt tính trở lại

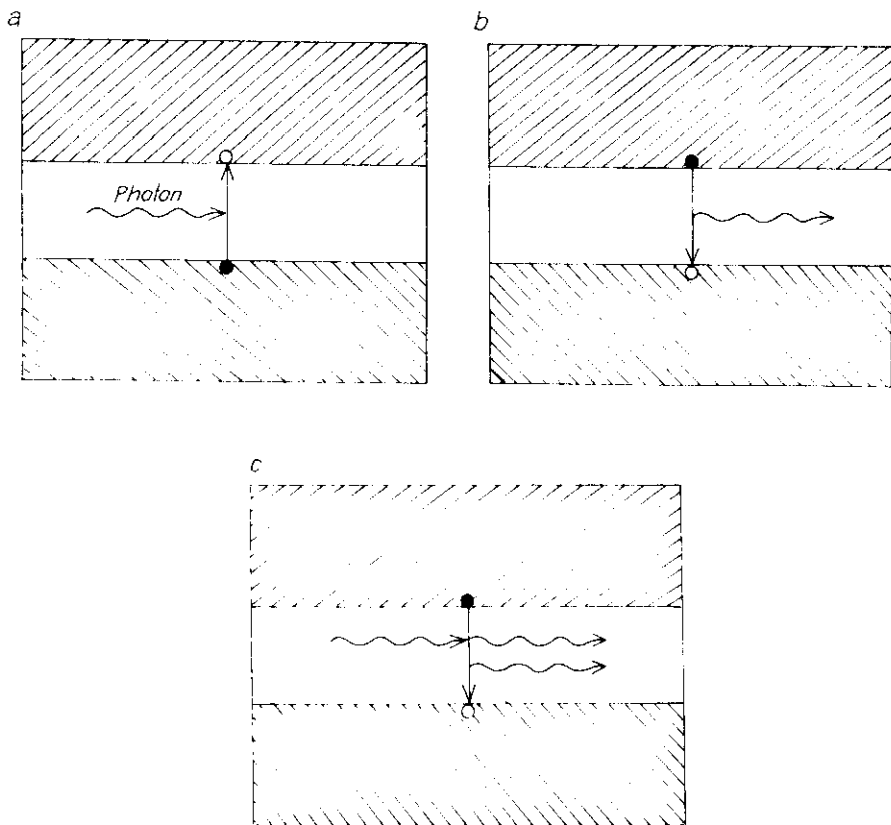
lớp này. Khi đi qua lớp đó, chúng sẽ gây ra một thác lũ bức xạ cưỡng bức, nghĩa là chúng đã khuếch đại ánh sáng. Đó chính là hiệu ứng laser: Khuếch đại ánh sáng nhờ bức xạ cưỡng bức. Các photon đi qua được gương (phần nào là truyền qua), sẽ tạo nên chùm tia ánh sáng laser. Các gương song song phản xạ một phần này chính là buồng cộng hưởng Fabry-Perot theo một linh kiện quang học gọi là *mẫu Fabry-Perot* (do hai nhà vật lý Pháp là Charles Fabry và Alfred Perot phát minh năm 1896). Ánh sáng mà gương phản xạ, chỉ được khuếch đại nhờ giao thoa *cấu thành (constructiv)* một khi sóng tới và sóng phản xạ cùng pha với nhau. Chiều dài của buồng cộng hưởng laser hay đúng hơn là quang lộ hiệu dụng, là tích của chiều dài hình học với chiết suất môi trường trong buồng cộng hưởng phải bằng số nguyên lần bước sóng để cho có thể xảy ra giao thoa cấu thành. Những bước sóng thoả mãn điều kiện này gọi là cộng hưởng, tất cả các bước sóng khác sẽ bị triệt tiêu.

Về nguyên tắc sẽ có vô hạn số các bước sóng cộng hưởng, nhưng vì một dịch chuyển $p - n$ nhất định chỉ tạo ra được ánh sáng trong một khoảng bước sóng hẹp, gọi là profil khuếch đại, nên ánh sáng bức xạ ra chỉ gồm các bước sóng cộng hưởng nằm trong profil này (xem hình 1.23). Khoảng cách đặc trưng giữa các bề mặt cuối của một laser bán dẫn là 200 đến 400 μm . Một laser bán dẫn phát xạ bước sóng ở 1,55 μm , chẳng hạn sẽ bức xạ ra một nhóm các bước sóng cộng hưởng với khoảng cách một là 1 đến 2 nm. Vậy là khi đó thì sự lựa chọn vật liệu làm lớp hoạt tính sẽ quy định rõ ràng bước sóng phát xạ.

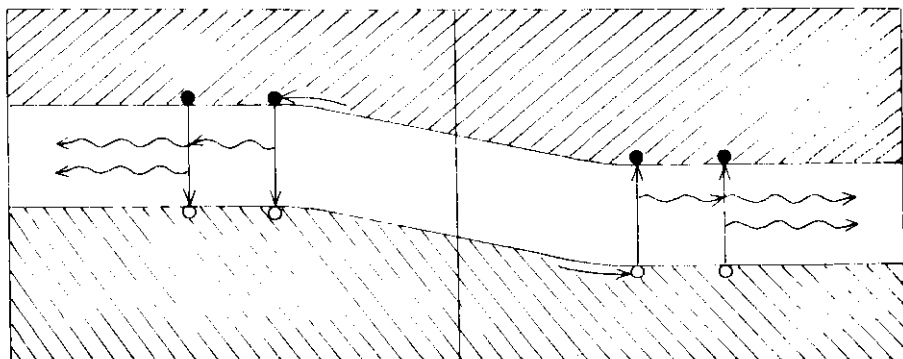
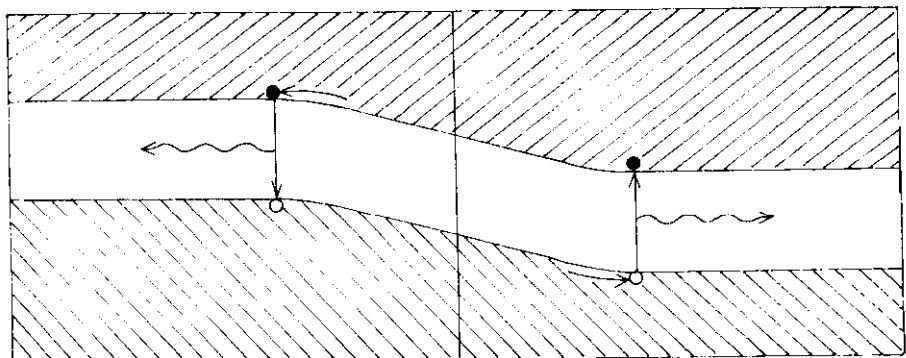


Hình 1.20:

Lớp chuyển tiếp p - n là bước chuyển của một vật liệu loại p thành loại n trong một khoảng không gian rất hẹp. Khi bắt đầu hình thành lớp chuyển tiếp (trên), phía n thừa điện tử còn phía p thừa lỗ trống. Bởi vậy điện tử và lỗ trống có xu hướng khuếch tán vào nhau. Nếu trong một chất bán dẫn lý tưởng một điện tử gặp một lỗ trống chúng sẽ tái hợp. Còn lại (dưới) là các nguyên tử khuyết tật đã ion hoá, chúng tạo một điện trường trực tiếp cạnh và ngay ở lân cận lớp chuyển tiếp. Trường điện tử này có ý nghĩa quyết định.

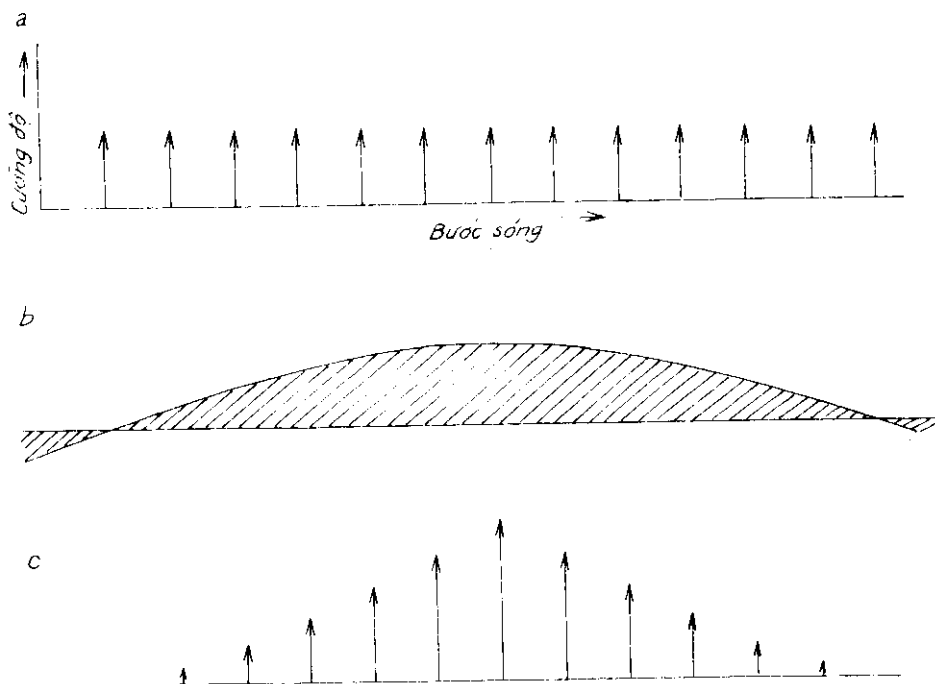
**Hình 1.21:**

Bức xạ ánh sáng từ một laser bán dẫn xảy ra theo hai cách: tự phát hay cưỡng bức. Trong quá trình bức xạ tự phát, các photon (lượng tử ánh sáng) có năng lượng lớn hơn độ rộng vùng cấm (hiệu năng lượng giữa các dải) sẽ kích thích điện tử từ dải hoá trị lên dải dẫn (a). Các điện tử được kích thích là không bền: sau một thời gian kích thích chúng tự phát "rơi" trở lại dải hoá trị, ở đó chúng kết hợp với một lỗ trống và như vậy sinh ra một photon với năng lượng bằng chính độ rộng vùng cấm (b). Trong bức xạ cưỡng bức, các photon với năng lượng bằng độ rộng vùng cấm gây sự chuyển tiếp các điện tử kích thích lên dải hoá trị. Các photon khi đó được bức xạ ra, là kết hợp về năng lượng và pha với các photon tới: hình thành một chuỗi sóng thống nhất.



Hình 1.22:

Lớp chuyển tiếp p - n dưới tác dụng của một hiệu điện thế sẽ bức xạ ánh sáng. Điện thế ngoài làm giảm điện trường ở lớp chuyển tiếp p - n, điện trường này ngăn cản dòng điện tử và lỗ trống, hệ quả là điện tử và lỗ trống khuếch tán qua lớp chuyển tiếp, khi chúng tái hợp, các photon bức xạ tự phát (trên). Nếu hiệu điện thế đủ lớn để gần như triệt tiêu điện trường ở lớp chuyển tiếp sẽ xuất hiện bức xạ cưỡng bức, nếu có đủ nhiều điện tử được kích thích (dưới).

**Hình 1.23:**

Sơ đồ năng lượng của laser bán dẫn đơn giản nhất cho thấy tại sao tia ra của nó chứa nhiều bước sóng như vậy. Về nguyên tắc, laser cho phép bức xạ ra nhiều vô hạn các bước sóng, chỉ cần chúng phù hợp với chiều dài buồng cộng hưởng laser (a): gọi là bước sóng cộng hưởng. Nhưng ở lớp chuyển tiếp p - n chỉ tạo ra được các photon trong một khoảng bước sóng rất hẹp, gọi là profil khuếch đại (b). Vậy ánh sáng phát xạ chỉ chứa các bước sóng cộng hưởng nằm trong profil này (c).

2.

Lịch sử phát triển, tiềm năng, triển vọng của laser

Có thể nói, ngành laser vừa bước qua tuổi 40. Đó là một dịp tốt để thử khắc họa lại bức tranh toàn cảnh hết sức thực tế, và phác họa ra những nét cơ bản cho tương lai. Chương nhập môn này nhằm giúp bạn đọc làm quen với các khái niệm cơ sở về ngành kỹ thuật laser, cũng như tiếp cận những suy nghĩ mang tính ẩn dụ về tiềm năng phát triển và triển vọng ứng dụng của laser trong tương lai.

2.1. MỞ ĐẦU

Ngày nay, laser đã trở thành một công cụ không thể thiếu được trong nhiều lĩnh vực nghiên cứu khoa học cũng như ứng dụng kỹ thuật. Đi sâu vào các ngành như quang phổ, phân tích, chẩn đoán, môi trường, khoa học vật liệu, công nghệ sinh học hay y học, ở đâu đâu chúng ta cũng bắt gặp bóng dáng của laser. Dù cho doanh thu công khai của ngành này trên toàn thế giới mới chỉ vào khoảng 2 đến 3 tỷ USD, nhưng laser lại đóng vai trò then chốt, mang tính quyết định cho nhiều công nghệ quan trọng và những ngành tăng trưởng nhanh, có đầy triển vọng, chẳng hạn như công nghệ thông tin, công nghệ vi cơ khí và kỹ thuật đo.

Thực tế, laser không chỉ là mối quan tâm riêng của các nhà khoa học và kỹ thuật, mà nó còn thu hút trí tưởng tượng của nhiều người, từ các nhà chính trị đến các nhà văn, nhà thơ, đạo diễn điện ảnh... Sức cuốn hút mạnh mẽ đó của laser có lẽ phải giải thích bởi vì nó là ánh sáng, mà ánh sáng lại quá ư quen thuộc và quá ư hữu ích trong cuộc sống thường nhật của chúng ta. Ngoài những thuộc tính bình thường đó ra, laser còn có các tính chất hoàn toàn khác thường, đồng thời với những đặc tính lý thú lại có cả những đặc tính rất bất ngờ: đó là tính kết hợp, tính định hướng và độ sáng rất cao, và liên hệ với chúng là cường độ và tầm xa gần như vô hạn...

Điều đó làm chúng ta liên tưởng tới một ông *Bụt Công nghệ* mọc lên để mang lại may mắn và hạnh phúc cho nhân loại, nhưng đồng thời lại cũng là con *Quý Chiến tranh* với sức mạnh vô biên và sức huỷ diệt khôn cùng.

2.2. LỊCH SỬ

Về mặt vật lý, cơ sở quyết định cho laser đã được Albert Einstein đặt ra từ năm 1917, khi ông đưa ra những ý tưởng cơ bản về bức xạ cưỡng bức và tự phát, tất nhiên khi đó người ta chỉ coi đó là những khái niệm thuần túy của riêng Vật lý lý thuyết, những vấn đề xa vời như vậy thì ngay ngày hôm nay đây, chắc chắn rằng nó cũng chẳng được những người thực dụng (chẳng hạn những nhà hoạch định kế hoạch thiên cận) ủng hộ, bởi vì họ chỉ chấp nhận nghiên cứu và phát minh, nếu như tác giả bảo đảm chắc chắn rằng, trong một vài năm tới, nó sẽ trở thành sản phẩm có khả năng cạnh tranh trên thị trường!

Thực vậy, từ khi những công trình có tính chất quyết định cho bước phát triển của laser ra đời, chúng ta cũng đã phải đợi tới 40 năm sau mới được chứng kiến việc phát minh ra nó. Chính xác là phải cần tới 41 năm (năm 1958) chúng ta mới tiếp cận được phát minh này. Nhưng ngay từ năm 1955, C. H. Townes ở Trường Đại học Tổng hợp Columbia, New York; Basov và Prochorov ở Trường Đại học Tổng hợp Lomonosov, Mátscova, lần đầu tiên đã chứng minh được rằng, trên chất amoniac (NH_3) sóng điện từ (ở đây là sóng vô tuyến) khi đi qua một môi trường đã được xử lý thích hợp (thuật ngữ là môi trường hoạt tính) cũng có thể được khuếch đại (nhờ phân bố đảo, xem ở dưới). Từ thí nghiệm tiên phong này, năm 1958, A. L. Schawlow (giải Nobel vật lý năm 1981) cùng với Townes (giải Nobel vật lý năm 1964 cùng Basov và Prochorov) đưa ra những suy luận và tính toán để mở rộng những kết quả trên vào miền quang học (khả kiến). Năm 1960, T. H. Maiman đã thành công

trong việc chứng minh bằng thực nghiệm cho nguyên lý laser: lần đầu tiên ông đã chế tạo được laser ruby bơm bằng đèn chớp. Laser này phát ra những xung ánh sáng kết hợp trong miền đỏ của quang phổ khả kiến với bước sóng 694 nm.

Tiếp theo đó là giai đoạn phát triển như vũ bão mà nó vẫn giữ được tốc độ đó cho tới tận hôm nay. Tiếp sau laser rắn xung, năm 1961, chúng ta đã có laser liên tục là laser cũng phát ra ánh sáng ở miền đỏ, đó là laser heli-neon, đồng thời đó là chiếc máy đầu tiên của một loại laser mới là laser khí, vì môi trường khuếch đại của nó là chất khí, và trên nguyên tắc nó được kích thích bằng sự phóng điện. Trong số rất nhiều hệ laser cho đến nay người ta đã chế tạo và sử dụng, chúng ta chỉ cần nêu một vài loại điển hình để làm ví dụ: Laser khí ion argon phát xạ ánh sáng xanh lá và xanh lơ được xem là công cụ đáng tin cậy trong nghiên cứu khoa học, kỹ thuật, y học... thậm chí còn cả những ngành có vẻ như chẳng thể liên quan tới khoa học kỹ thuật như văn nghệ-giải trí. Laser khí cacbonic (CO_2) phát ra ánh sáng liên tục trong miền hồng ngoại trung bình (nhiệt) với công suất trung bình rất cao, bởi vậy nó đã được ứng dụng rất hiệu quả trong kỹ thuật hàn, cắt bằng laser. Laser excimer là một nguồn sáng mạnh, bền, phát xung laser trong miền ánh sáng tử ngoại và có công suất trung bình rất cao.

Tất cả các loại laser vừa nêu chỉ phát một loạt những bước sóng (màu) cố định. Nhưng với laser màu - môi trường hoạt tính của nó là một chất lỏng mang màu, đó chính là dung dịch thuốc nhuộm (màu) - năm 1966, Sorokin và Lankard đã có thể biến đổi được bước sóng của laser - điều mà từ lâu, người ta

hàng mong ước. Chính nhờ laser này, quang phổ laser đã có được những thành tựu vĩ đại trong ngành vật lý nguyên tử, vật lý phân tử, vật lý plasma, vật lý chất rắn, hoá lý, phân tích hoá học, và cho tới cả những ngành có vẻ ít liên quan như nghiên cứu môi trường, công nghệ sinh học, y học... Với những phương pháp ngày càng chính xác và phức tạp hơn, các hệ laser càng ngày càng thích nghi hơn; và từ những năm 70 của thế kỷ trước được bán rộng rãi trên thị trường, laser đã trở thành công cụ rất dễ sử dụng trong một phạm vi hết sức rộng ngay cả cho những người không có chuyên sâu về laser.

Nhưng cũng chính nhờ các khách hàng không chuyên sâu về laser sử dụng nên ngày càng có thêm đòi hỏi cao về điều kiện làm việc ổn định, độ bền, chắc chắn và giá thành hạ, kể cả giá vận hành. Để thoả mãn các điều kiện đó, từ những năm 1980 đã ra đời một loạt các laser rắn. Đặc biệt phải kể đến laser YAG (yttri-aluminium-granat). Để phủ kín miền phổ rộng hơn, bằng những phương pháp quan trọng nhất để tạo ra ánh sáng đơn sắc, kết hợp và không phân kỳ, ngày nay chủ yếu người ta dựa trên các vật liệu chất rắn càng ngày càng mới hơn, chẳng hạn titan-saphir. Các phương pháp của ngành quang phi tuyến, chẳng hạn những hiệu ứng quan trọng nhất như nhân đôi tần số, tạo các tần số cộng và trừ, cũng như các quá trình tán xạ phi tuyến (Raman, Brillouin...), càng ngày càng được phổ biến hơn. Đồng thời dải phổ khuếch đại rộng vốn có của các vật liệu laser rắn hiện đại cũng đã giải quyết được vấn đề khó khăn nhất là: những xung ngắn nhất và có cường độ cao nhất, kèm theo một sự lặp lại các thông số của xung, điều trước đây chưa hề đạt tới.

Trước đây, chúng ta vẫn quan niệm rằng laser phải là những hệ thiết bị công kênh với một loạt các linh kiện quang học được điều chỉnh trên bàn quang học đặc biệt chống rung và dao động nói chung. Nhưng ngay từ những năm 1960, nhờ sự kết hợp tài tình giữa laser (quang học) và điện tử người ta đã chế tạo ra laser bán dẫn hay laser diốt, và như vậy lại bắt đầu một bước phát triển làm đảo lộn quan niệm nói trên. Laser bán dẫn hiện đã có riêng cho mình một thị trường lớn tới hàng trăm triệu USD, không những vì chúng gọn nhẹ (toàn bộ cấu trúc laser chỉ vài milimet khối, toàn bộ máy laser chỉ bằng vài centimet khối) mà chúng còn có độ tin cậy cao. Những laser trong các máy phát CD, trong kỹ thuật truyền thông, trong kỹ thuật vi tính (máy in) rõ ràng là những bằng chứng về tính ưu việt và thông dụng của laser bán dẫn. Nhưng ngay từ bây giờ với nhiệm vụ làm nguồn bơm cho các laser rắn thông thường, các laser diốt này đã thay thế cho đèn chóp và các laser khí quá phức tạp và tốn kém, vì chúng dựa trên hiện tượng phóng điện rất khó thực hiện. Điểm nổi bật cho công nghệ *hoàn toàn bằng chất rắn (all solid state)* là sự gọn nhẹ, đơn giản về thiết kế, đó chính là laser sợi được bơm bằng diốt, gồm hai thành phần mini hoá: một laser diốt làm nguồn bơm và một sợi thuỷ tinh chỉ dày cỡ milimet dùng làm môi trường hoạt tính, đồng thời là buồng cộng hưởng và ống dẫn ánh sáng có chiều dài gần như là tùy ý. (Bạn đọc cũng nên lưu ý là, dù tất cả các ưu việt vừa nêu trên của laser màu, nhưng chỉ cần vài năm, nghĩa là đến ngày hôm nay, chỉ trừ việc chế tạo xung siêu ngắn, laser màu đã bị laser

rắn titan saphir bơm bằng laser bán dẫn và nhân tần bằng các tinh thể phi tuyến, nghĩa là công nghệ hiện đại nhất của laser, hoàn toàn lấn sân! Laser trên đang được coi là công cụ thông dụng nhất trong ngành. Chỉ riêng việc đó đã chứng minh cho tốc độ phát triển nhanh tới mức nào của laser).

2.3. THỜI ĐẠI PHOTON

Xét về phương diện khoa học và kinh tế, laser hoàn toàn có thể so sánh với các phát minh có tính cách mạng khác như máy hơi nước hay tranzito. Mặt khác, so sánh 40 năm tồn tại của nó với thời gian tồn tại của một vài chu trình công nghiệp trước đây vẫn chưa thể nói lên được điều gì. Liệu laser còn có tương lai nữa hay không, hay công nghệ này đã đạt tới đỉnh điểm của mình, thậm chí vượt đi quá xa rồi?

Đi tìm câu trả lời cho câu hỏi này ngay lập tức chúng ta nhận thức rằng: Nếu chỉ lần lượt kể ra các công nghệ laser đang tồn tại hay tranh luận về những loại laser mới sẽ chẳng thể có được cái nhìn bao quát, thậm chí sẽ chẳng thể đi đến một kết luận gì. Như đã nói ở trên, trong những thập niên vừa qua công nghệ laser đã trải qua những bước tiến ngoạn mục. Ngày hôm nay thì chắc chắn là: so sánh những máy laser rắn công kênh như một nhà máy để dùng trong nghiên cứu phản ứng nhiệt hạch, với laser diốt chỉ bằng ngón tay dùng cho máy phát CD, và hệ thiết bị laser điện tử tự do mà bên trong nó hầu như chẳng có vật chất, rõ ràng ta chẳng thể thấy được một điều gì chung, cả về mặt công nghệ cũng như lĩnh vực ứng dụng.

Ở đây chúng ta càng thấy rõ được điều đã làm cho laser khác với các phát minh có tính cách mạng khác. Động cơ cho thành công của laser không phải chỉ là một bước phát triển mới về mặt công nghệ, mà trước hết, đó là một ý tưởng về cơ bản hoàn toàn mới mà ta có thể tóm gọn là: ***con người đã "thuần hoá" được photon.*** Lần đầu tiên trong lịch sử loài người, môi trường ánh sáng đã tiếp cận được những ứng dụng hết sức rộng rãi. Ở điểm ấy thì laser chẳng hạn sẽ khác về cơ bản nếu so với tranzito: Trước nó đã có bóng đèn điện tử, và trước đó thì lại còn có động cơ điện và dynamô, tất cả chúng đều đã tìm được cách làm cho điện tử phục vụ con người trên một bình diện rất rộng. Nhưng với photon thì - không kể những nhiệm vụ chiếu sáng hết sức thông thường trước đó - chỉ có riêng một mình laser là đã đi đến được thành tựu ở một tầm cỡ khó mà tưởng tượng ra nổi. Trong bối cảnh này chúng ta hoàn toàn có thể khẳng định rằng: ***Nếu như thế kỷ trước đã là thế kỷ của điện tử, thì thế kỷ này sẽ phải là thế kỷ của photon.***

Như vậy có thể nói, tương lai của laser nằm trong tay những ai tìm ra những phạm vi ứng dụng mới cho môi trường ánh sáng. bằng cách luôn luôn đặt ra cho môi trường này những thuộc tính mới. Đầu tiên đó là độ kết hợp, nghĩa là sự đều nhịp của các sóng ánh sáng đã hứa mang lại những ứng dụng có tính cách mạng trong các ngành quang phổ, holography hay phép đo thời gian siêu chính xác. Thực vậy, ngày nay sự đều nhịp này có thể kiểm tra được với độ chính xác là 10^{-15} giây (tức là với độ chính xác về tần số bằng 0, 000 000 000 000 001)

và điều đó được ứng dụng cụ thể ở các đồng hồ nguyên tử. Sắp tới đây mỗi quan tâm sẽ hướng vào khả năng dùng sóng ánh sáng dao động đều để đạt tới cường độ cao và dùng nó vào việc gia công vật liệu hiệu theo nghĩa rộng nhất: từ việc hàn, cắt, bóc đi qua quang khắc đến các ứng dụng muôn màu muôn vẻ trong y học. Ngày nay, trong các ngành công nghiệp xe hơi, máy bay, tàu thủy, người ta đã dùng người máy để hàn dựa trên cơ sở laser cung cấp một cách thuận thực một công suất liên tục vào cỡ nhiều kilôoát để thực hiện những mối hàn siêu chính xác; nhưng mặt khác lại dùng những công suất đã được định lượng cũng hết sức chính xác trong miền miliôát để (cũng!) hàn những chi tiết vô cùng nhạy cảm là võng mạc phía sau con mắt chúng ta, hoặc tạo dáng cho thấu kính giác mạc trên bề mặt con mắt.

Cuối cùng, người ta còn thành công trong việc điều khiển nhịp đều của các sóng ánh sáng khác nhau sao cho chúng có thể tự tăng dao động của mình thành ra những xung ngắn nhất mà trên thực tế con người có thể tạo ra được bằng kỹ thuật khóa mốt (*mode-locking*) đã nói trên. Hiện người ta đã đạt tới kỷ lục (tháng 2/2001) xung 4 femtogiây, tức là một phần tỷ triệu giây (10^{-15} s). Các xung femtogiây cho phép thực hiện các ứng dụng tương lai trong ngành truyền thông với tốc độ truyền tối đa, hay theo dõi và điều khiển các quá trình siêu nhanh trên thang đo nguyên tử hay phân tử. Laser femtogiây hiện đang được dùng phổ biến và hết sức đa dạng trong lĩnh vực nghiên cứu cơ bản. Đồng thời người ta cũng đã phát triển công nghệ femtogiây FST

(*femtosecond technology*) để mở ra một loạt những lĩnh vực ứng dụng hết sức giàu tiềm năng, ở một số nước như Mỹ, Đức hay Nhật Bản, chúng đang được theo đuổi một cách nghiêm túc và tích cực.

Đồng thời với những xung ngắn như vậy, chúng ta cũng có thể đi tới những kích cỡ hoàn toàn mới cả về công suất lẫn cường độ: Công suất ánh sáng cao nhất hiện nay tùy thuộc kích thước của laser và nằm trong khoảng 10 đến 1000 tera (tera = tỷ kilô hay triệu triệu) oát, nghĩa là 10 đến 1000 tỷ kilôoát, tương đương với 3 đến 30 lần công suất của tất cả các nhà máy điện trên toàn thế giới cộng lại.

Nếu hội tụ nguồn ánh sáng mạnh như thế vào một vết có đường kính chỉ vào cỡ vài phần trăm milimet nó sẽ phát huy được thành những lực mà nếu không, chỉ có thể xuất hiện bên trong các ngôi sao chổi: Chỉ riêng áp suất ánh sáng đã là vài tỷ bar (áp suất khí quyển trái đất chỉ bằng 760 milibar hay đơn vị thông dụng hơn nhưng không theo quy ước quốc tế là mmHg, gần một bar!). Cường độ trường của sóng điện từ do ánh sáng này gây ra không chỉ có khả năng bứt phá tất cả các điện tử ở vòng ngoài của các nguyên tử ra khỏi chúng, mà đồng thời còn gia tốc các điện tử đến mức khi va chạm với vật chất có thể gây ra được cả các phản ứng hạt nhân! Ngay ngày hôm nay chúng ta đã có thể tiên đoán được một số rất lớn các ứng dụng trong trí tưởng tượng của chúng ta, ngoài việc sản xuất năng lượng (thông qua phản ứng nhiệt hạch), hoặc mô phỏng trong phòng thí nghiệm các hiện tượng của vật lý thiên văn (xem hình 2.1.).



Hình 2.1:

Ví dụ cho một laser xung ngắn hiện đại để tạo ra những công suất lớn nhất. Hệ thống thiết bị chúng ta thấy ở đây là laser rắn lai (*hybrid laser*), gồm một máy phát và tiền khuếch đại trên cơ sở dùng titan-saphir làm vật liệu hoạt tính (chúng ta thấy được một phần ở hộp đen bị che ở ngay trước ảnh) và một chuỗi khuếch đại dùng tinh thể neodym làm vật liệu hoạt tính. Những ống trắng sẽ vận chuyển ánh sáng đi qua giữa các khuếch đại thủy tinh [các hộp màu đỏ được đánh dấu (X)] và đồng thời chứa các bộ lọc tần số không gian để tối ưu hoá mặt sóng của sóng ánh sáng. Ở giữa căn phòng là những cáp thẳng đứng dẫn điện nuôi các đèn chớp để bơm các khuếch đại. Công suất ánh sáng ở lối ra là 10 teraoát, tương đương với ba lần công suất sản xuất điện năng trên toàn thế giới. Ở phòng thí nghiệm (Viện Max Born, Berlin, CHLB Đức) hiện nay đang chuẩn bị lắp đặt một laser 100 teraoát.

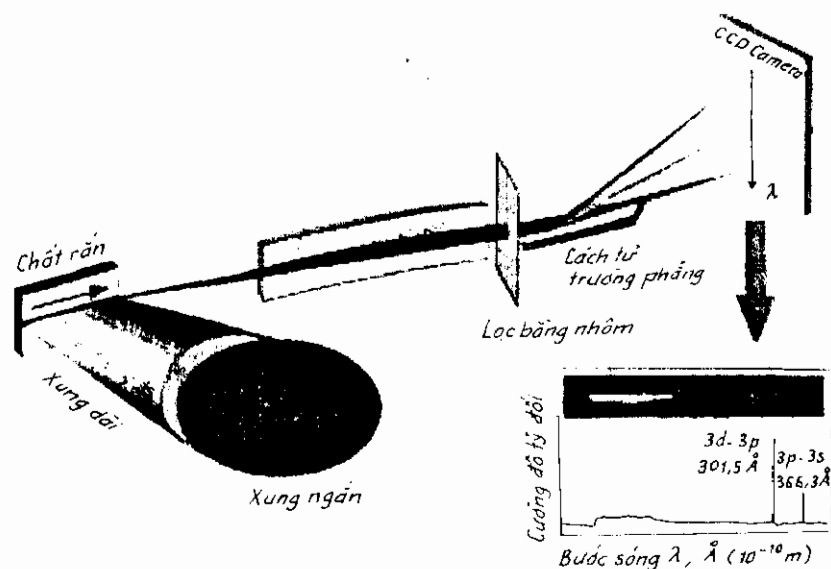
Nhưng để có được những ứng dụng mới cũng như đã có được các ứng dụng khác vẫn phụ thuộc vào công nghệ laser có thể thành công tới mức nào trong việc đưa những đặc trưng (công suất...) như vậy vào những máy tương đối gọn nhẹ và đủ độ tin cậy. Một cách hết sức khôi hài, chúng ta có thể thấy ngay ở ví dụ cuối là việc sản xuất ra một công suất trung bình như ở một bóng đèn điện thông thường (100 W) cũng sẽ là một vấn đề lớn y hệt như việc tạo ra công suất đỉnh là 1 teraoát.

2.4. MỘT VÀI TRIỂN VỌNG VỀ PHÁT TRIỂN VÀ ỨNG DỤNG LASER

Thành công trong khi việc chế ngự môi trường ánh sáng về mặt độ kết hợp, công suất hay thời gian xung ở miền phổ khả kiến hay những miền gần đó (hồng ngoại, tử ngoại) rõ ràng đã khá là khả dĩ. Nhưng để phát huy các thành quả đó trong sự nghiệp nghiên cứu của mình, các nhà khoa học lại đang lao vào thách thức tiếp theo của tự nhiên: việc truyền tất cả các tính chất đã biết trong những miền vừa nêu vào những miền phổ mới, mà ưu tiên là trong miền phổ tia X sóng ngắn và trong miền hồng ngoại cực xa. Để thực hiện ước vọng này, đòi hỏi phải tạo ra được những công nghệ laser hoàn toàn mới, hoặc ít nhất cũng phải là các phương pháp mới cho quang phi tuyến.

Ngoài việc phát triển một laser điện tử tự do có bước sóng rất ngắn, thì cơ chế laser thông thường cũng có thể mở rộng vào cả miền tia X. Những môi trường hoạt tính thích hợp để tạo ra phân bố đảo dưới dạng những ion tích điện rất cao trong plasma, từ lâu đã được biết tới; và từ 1985 nhờ nó mà thực ra,

trong thực tiễn người ta đã thực hiện được một số laser tia X. Nhưng điều đáng lưu ý là cho đến nay, chúng vẫn chưa có được ứng dụng rộng rãi ngay trong các phòng thí nghiệm, nên chưa thể nói gì tới những ứng dụng công nghiệp. Nguyên nhân bởi công suất bơm cần có để tạo được phân bố đảo, hoặc cường độ bơm (mật độ dòng chảy) chẳng hạn phải trên 10^{14} W/cm² cho một bước chuyển 10 nm, ở bước sóng ngắn hơn còn tăng hơn nhiều. Cho tới những năm gần đây, một thể tích plasma với tiết diện chỉ vài milimet vuông đã đòi hỏi phải có những laser bơm lớn như một nhà máy hạt như những laser đặc biệt dùng cho các chương trình phản ứng nhiệt hạch. Chỉ khi chế tạo ra được những laser femtogiây đã nêu trên, mới cho phép người ta tạo ra được công suất ánh sáng cần thiết ở ngay trong những phòng thí nghiệm bình thường. Những năm gần đây, khi đã có thể dựa trên các cơ sở đó, người ta đã tạo ra được nhiều cơ chế bơm hết sức hiệu quả. Một trong số các cơ chế này là cơ chế của Viện Max Born ở Berlin, họ đã kết hợp được khả năng làm việc với xung dài thông thường nhưng năng lượng xung có giảm rõ rệt, để tạo ra một thể tích plasma tương đối lớn, ở đó nhờ một xung có năng lượng tuy thấp, nhưng công suất lại cực mạnh, vì xung chỉ ngắn vào cỡ vài trăm femtogiây để tạo ra phân bố đảo (xem hình 2.2.). Với cùng toàn bộ độ khuếch đại của một hệ như vậy đã giảm được những yêu cầu đối với nội dung năng lượng, nghĩa là chính độ lớn của laser bơm đi khoảng 100 lần so với các laser tia X cho đến nay đã có. Điều này dĩ nhiên đã mở ra các triển vọng tiềm tàng cho ứng dụng công nghệ này ngày càng tiến đến gần chúng ta hơn.



Hình 2.2:

Sơ đồ của một laser tia X được bơm chuyển tiếp (*transient*). ở phía trước vẽ một mặt phẳng của chất rắn trên đó sẽ hội tụ - trên một tiêu điểm có dạng đường cong - một xung laser dài (thời gian: 1 nano-giây) và một xung ngắn (thời gian: nhỏ hơn 1 picô-giây). Xung dài sẽ tạo ra một plasma laser dạng ống dài 5 nm, đường kính 0,1 nm. Plasma này sau đó sẽ được các xung ngắn làm nóng. Thông qua phân bố đảo thời gian ngắn, chuyển tiếp của các ion trong plasma, chúng sẽ được kích thích để phát xạ các tia X kết hợp. Hệ thiết bị này chính là laser tia X, các yếu tố còn lại (gương *toroid*, cách tử và CCD camera có nhiệm vụ làm detector) sẽ chỉ góp phần với tư cách là các yếu tố chuẩn đoán cho ánh sáng đã được bức xạ ra. Trong hình con là phổ đã đo được, đường đậm chính là bức xạ của laser tia X.

Việc nghiên cứu thậm chí còn đi trước một bước. Ở ngay bước kế tiếp, nhờ cùng cộng tác với một nhóm các nhà khoa học

Mỹ (J. J. Roca, Trường Đại học Tổng hợp Quốc gia Colorado) người ta đã hoàn toàn loại được laser xung dài ra khỏi điều kiện để tạo plasma. Laser xung dài này sẽ được thay thế bởi một sự phóng điện mao dẫn cho hiệu quả cao hơn và cũng gọn nhẹ hơn. Người ta đã chứng minh được rằng thậm chí nó rất thích hợp với việc tự độc lập bơm laser tia X. Khi kết hợp với một xung femtogiây cực mạnh của một laser trường siêu cao có công suất 10 teraoát, người ta hy vọng rằng qua đó có thể thực hiện được một sự phân bố đảo trên thể tích lớn, và qua đó là sự bức xạ tia X với hiệu quả mà từ trước tới nay chưa hề đạt tới, và như vậy là sau bao nhiêu năm nghiên cứu đã có thể biến giấc mơ về một laser tia X *table top* (đầu bẳng) có ứng dụng vạn năng thành hiện thực.

Phần thưởng cho nỗ lực này là những thành công không còn phải nghi ngờ gì nữa: Ngày nay, công nghệ tia X đã là một lĩnh vực khẳng định được vị trí của nó vì nó đã được nghiên cứu kỹ và ứng dụng có hiệu quả. Nhờ synchrotron, hiện người ta đã chế tạo ra được những nguồn sáng mạnh, không kết hợp, nhưng có chất lượng và độ sáng rất cao, tuy vẫn còn thua xa laser tia X. Để có thể mở rộng phạm vi ứng dụng của nó, điều chủ yếu là cần có những nguồn bơm gọn nhẹ, hiệu quả và công suất lớn. Nếu có thể so sánh thì ở lĩnh vực này, chúng ta đang ở trình độ phát triển 30 năm trước đây của ngành laser. Chỉ cần sắp tới, công nghệ tia X và ngành laser tia X đạt tới một phần của công nghệ photon bước sóng dài hơn, thì phía trước chúng ta đã mở ra một tương lai sán lạn.



Hình 2.3:

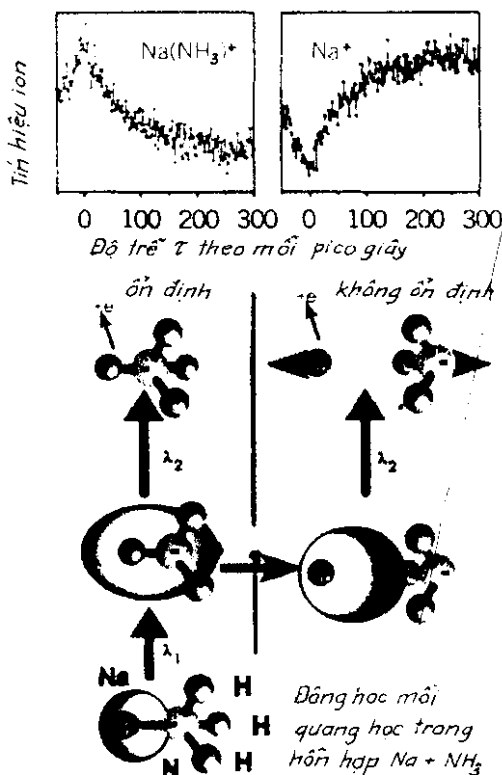
Hệ thí nghiệm để ghép một laser tia X mao dẫn, chúng ta thấy một phần là cấu trúc trắng phía dưới khung kim loại ở đằng trước, với một laser trường lớn nhất (không thấy trên ảnh, phải so với hình 2.1) Qua sự lai ghép này sẽ thử nghiệm được một sơ đồ mới, cực kỳ hiệu quả cho các laser tia X table-top tương lai. J. J. Rocca từ Mỹ sang (người đứng giữa) chính là người đã phát minh ra laser tia X mao dẫn, đang cùng với hai cán bộ của Viện Max Born kiểm tra các máy chuẩn đoán để đo bức xạ tia X phát ra

2.5. HOÁ HỌC FEMTÔ

Từ lâu, quá trình siêu nhanh trong các hệ phân tử đã là mối quan tâm rất lớn để hiểu biết các quá trình cơ bản về mặt hoá lý, dù cho đó có là ở pha khí, trong chất lỏng, trong các chất rắn phân tử hay ở các hệ phân tử sinh học. Việc “sinh và huỷ”

("making and breaking") các liên kết trong các phản ứng hoá học, những bước sơ cấp trong việc phân bố lại năng lượng hay sự di chuyển của điện tử và proton, cũng như sự tiêu tán năng lượng khi tương tác với môi trường xung quanh (đám, chất lỏng, ma trận sinh học, tinh thể) xảy ra trên một thang bậc thời gian phải đo với thời khoảng dao động đặc trưng của phân tử. Tuy theo độ lớn của hệ mà thang này nằm trong khoảng từ vài chục femtogiây (10^{-15} s) tới vài trăm picogiây (10^{-12} s). Từ lâu nay, người ta gọi động học để phân tích những quá trình này là hoá học femtogiây hay một cách ngắn gọn là hoá femtô (xem hình 2.4). Khi đó người ta có nhu cầu phải hiểu các quá trình trên bình diện phân tử, và từ đó xây dựng nên cách điều khiển có chủ đích các tiến trình quan sát được, thông qua việc chiếu những xung ánh sáng siêu ngắn bổ sung vào.

Vậy là chúng ta có thể hy vọng rằng, có thể phân tích không chỉ các quá trình siêu nhanh được khơi mào bằng quang học là các quá trình rất có ý nghĩa thực tiễn quan trọng, thậm chí hơn thế nữa là tiền gần tới giấc mơ muôn thuở của hoá học laser là: Khi chiếu ánh sáng laser với những tính chất đặc biệt sẽ điều khiển được các phản ứng hoá học một cách có chủ đích. Nói một cách ngắn gọn: Ý tưởng của hoá học laser là dùng ánh sáng laser có bước sóng thích hợp để kích thích một cách chọn lọc những một chuyển động, hay trạng thái để chúng gây ra phản ứng mà chúng ta mong muốn, chẳng hạn dao động quay rất đặc trưng cho quá trình izome hoá, hay một trạng thái điện tử khơi mào cho việc bẻ gãy liên kết, qua đó tạo ra các gốc hoá học.



Hình 2.4:

Ví dụ mẫu cho một quá trình phân tử được điều khiển bởi các xung femtô-giây, là bước đầu đi đến hoá học femtô-giây: Hỗn hợp gồm một nguyên tử natri (Na) và một phân tử amoniac (NH_3), trước hết được kích thích bởi một photon đỏ (bước sóng λ_1). Trạng thái kích thích không ổn định và sẽ phân huỷ sau vài picô-giây (10^{-12}s). Điều này được minh chứng bởi một photon thứ 2, màu xanh lơ (bước sóng λ_2) và được làm chậm thời gian là τ (Hình trên: Tín hiệu Na đo được sẽ tăng theo τ , còn tín hiệu NaNH_3 sẽ giảm. Nhưng nếu photon thứ hai đến ngay sau photon thứ nhất thì hỗn hợp lại được ion hoá và sẽ ổn định). Bằng cách này, một sự huỷ liên kết sẽ được điều khiển bởi xung laser.

Vấn đề ở đây là: Bình thường thì năng lượng được chiếu vào hệ phân tử sẽ rất nhanh, cụ thể là vài trăm femtogiây đến vài picogiây, được phân chia lại một cách thống kê trước khi phản ứng chúng ta mong muốn xảy ra. Vậy là trong phần lớn trường hợp một laser nanogiây thông thường, hay thậm chí một laser liên tục lại càng không thể có được tác dụng chọn lọc, và chỉ gây ra hiện tượng làm nóng hệ mà thôi. Bây giờ là lúc có thể đưa vào ý tưởng của hoá học femtô đã được làm chủ: Quá trình quang kích thích phải xảy ra nhanh hơn thời gian hồi phục đặc trưng cho phân tử. Bằng một xung hay cả một dãy xung siêu ngắn thứ hai, trong trường hợp nhất định cũng có thể được điều biến pha, người ta sẽ cố gắng đưa hệ phân tử về một trạng thái trung gian, ổn định, hoặc trực tiếp điều khiển nhanh về một kênh cuối vô công sao cho các quá trình tiêu tán là những quá trình phân chia lại, và như vậy là vô hiệu hoá phần năng lượng tập trung vào một mối liên kết sẽ chẳng đủ thời gian để hoàn thành việc đó.

Cách đặt vấn đề như thế dĩ nhiên làm chúng ta hiểu ngay rằng, trước tiên, vấn đề chỉ mới đề cập tới việc nghiên cứu cơ bản. Nhưng nếu những đề tài được thảo luận ở đây, rồi sẽ được nghiên cứu và sẽ có tác dụng điều khiển các phản ứng theo một định hướng nhất định thì về lâu về dài, từ đây hoàn toàn có thể đưa tới một công nghệ chế tạo hoặc biến đổi các hợp chất hoá học, hoặc thậm chí các đối tượng sinh học phức tạp và hết sức hiếm. Điều này dĩ nhiên cũng đặt ra thêm những đòi hỏi cho các hệ laser sẽ được dùng phải thoả mãn tốt hơn nữa các yêu cầu của người dùng, phải hoạt động với độ ổn định và độ tin cậy cao

hơn, và dù đã đạt được tất cả những tiêu chí đó, giá thành còn phải được duy trì ở mức có thể chấp nhận được.

2.6. QUANG PHỔ CẬN TRƯỜNG QUANG HỌC NHỜ DÙNG CÁC XUNG ÁNH SÁNG SIÊU NGẮN

Càng ngày càng nhỏ hơn, càng ngày càng nhanh hơn, đó là đòi hỏi đặt ra và đã được thoả mãn bởi rất nhiều phát minh mới về các linh kiện bán dẫn dùng trong các chip nhớ cho máy tính, hoặc trong ngành vô tuyến cao tần, chẳng hạn cho các máy điện thoại di động, hoặc truyền những lượng số liệu cực lớn trong các mạng truyền thông quang điện tử.

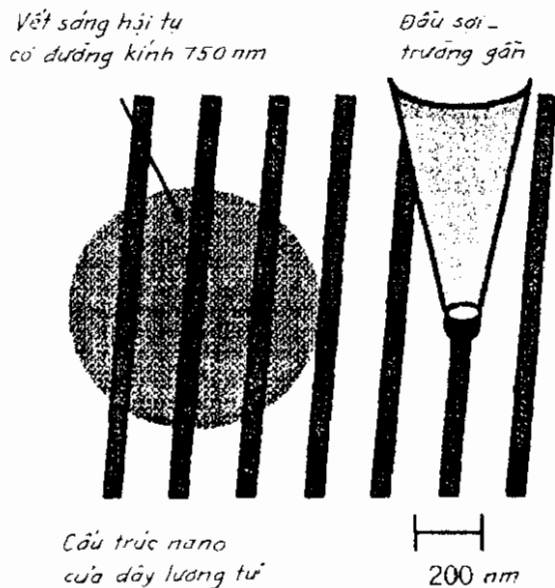
Với đòi hỏi này, các cấu trúc nanô bán dẫn sẽ có ý nghĩa rất lớn. Đó là những linh kiện theo ít nhất một hướng không gian, chúng có kích thước hình học nằm trong miền nanomet ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Bởi kích thước nhỏ như vậy nên một cấu trúc tranzito như thế có thể thực hiện được hàng ngàn tỷ (triệu triệu) quá trình đóng mở trong một giây, điều này có nghĩa là với mỗi quá trình đóng mở chỉ cần một thời khoảng một picogiây. Hiện các mạng sợi quang hiện đại đang cần những linh kiện quang điện tử nhanh như vậy, chẳng hạn cho các biến tử (modulator) hoặc đầu thu (detector) dùng trong ngành truyền thông quang học.

Để có thể tạo ra những linh kiện mới và tối ưu hoá chức năng của chúng, chúng ta phải phân tích được các quá trình vật lý siêu nhanh xảy ra trong các cấu trúc nanô. Quang phổ thời gian siêu nhanh với tư cách là kỹ thuật đo vật lý duy nhất cho

phép khởi mào về mặt quang học cho các hiện tượng như thế, và rồi có thể dễ dàng trực tiếp theo dõi chúng nhờ phép phân giải thời gian. Năng suất phân giải không gian của các phương pháp đo này - tương tự như trong phép soi hiển vi thông thường - bị giới hạn bởi bước sóng ánh sáng đã dùng, và nói chung là nằm trong miền micromet; bởi vậy trên nguyên tắc chẳng thể nghiên cứu được từng cấu trúc nanô riêng.

Trái lại, các phương pháp mới của quang học cận trường lại cho phép vượt qua được giới hạn này và thực hiện các thí nghiệm quang học với độ phân giải không gian hết sức đặc trưng là 100 nanomet.

Nguyên tắc của phương pháp này được mô tả trên hình 2.5. Chi tiết quan trọng nhất của nó là một sợi thủy tinh được chế tạo sao cho nhọn đầu có vỏ ngoài được tráng gương bằng kim loại, và ở đầu nhọn có một cửa sổ nhỏ có đường kính khoảng 100 nm, chiều dài bằng 1/5 đến 1/10 bước sóng ánh sáng. Nếu mẫu nằm trong cận trường của cửa sổ, tức là với một khoảng cách vào cỡ 10 nm ở dưới đầu nhọn của sợi thủy tinh và được rọi sáng qua chính cái cửa sổ này, thì miền được rọi sáng cũng chỉ có đường kính vào khoảng 100 nm. Vậy là mẫu cho phép chúng ta nghiên cứu nó với độ phân giải không gian rất cao. Nếu dùng những xung ánh sáng siêu ngắn để rọi mẫu, ta có thể tiến hành các thí nghiệm với độ phân giải siêu cao cả về không gian cũng như thời gian, và đặc biệt có thể nghiên cứu chuyển động không gian của các vật tải điện trong từng cấu trúc nanô riêng.

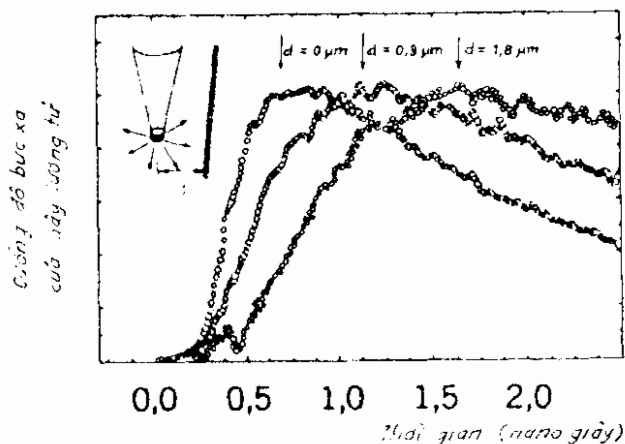
**Hình 2.5:**

Quang phổ cận trường quang học ở các cấu trúc nano bán dẫn. Phân giải không gian của các phương pháp soi hiển vi thông thường bị giới hạn bởi bước sóng của nguồn sáng đã dùng, và thông thường sẽ đặc trưng là nằm ở vào miền khoảng $1 \mu\text{m}$. Bởi vậy, nói chung không thành công trong việc nghiên cứu từng cấu trúc nano bán dẫn riêng. Vì vậy ở đây cho thấy sơ đồ ví dụ gồm nhiều sợi dây lượng tử đặt nằm cạnh nhau. Trong những sợi dây lượng tử, là vật liệu khời mào cho những chi tiết quang điện tử mới, các phần tử tải điện chỉ chuyển động dọc theo chiều của trục sợi dây lượng tử. Nhờ các phương pháp mới của quang học cận trường mà có thể vượt qua được giới hạn phân giải của các kính hiển vi thông thường, thực hiện các thí nghiệm quang học với năng suất phân giải đặc trưng 100 nm . Điều này đạt được nhờ ánh sáng truyền qua một cửa sổ nhỏ ở đầu một mũi nhọn của một sợi thủy tinh đã được kéo, và mặt bên được tráng gương bằng kim loại. Vết ánh sáng được hình thành như vậy sẽ có đường kính khoảng 100 nm , bởi vậy từng chi tiết riêng biệt của cấu trúc nano sẽ có thể nghiên cứu được nhờ năng suất phân giải không gian.

Để làm ví dụ cho ứng dụng kỹ thuật lý thú này, chúng ta hãy nghiên cứu một “sợi dây lượng tử”. Cấu trúc nanô này được Viện Paul Drude ở Berlin chế tạo có chứa các miền hình trụ của chất arsenua gali (GaAs), đặt trong một mặt phẳng GaAs thực tế chỉ có hai chiều, đó chính là một màng mỏng lượng tử. Đường kính của một sợi dây lượng tử chỉ vào cỡ 50 nm. Các sợi dây lượng tử này đặc trưng bởi các tính chất đặc biệt về điện và quang. Do trạng thái năng lượng của chúng thấp hơn chút ít so với ở màng mỏng lượng tử bao quanh, bởi vậy các phân tử tải điện sẽ di chuyển vào vị trí của các sợi dây lượng tử rồi bị giữ lại ở đó và cuối cùng sẽ chiếm giữ các trạng thái năng lượng trong sợi dây lượng tử.

Những quá trình dịch chuyển như vậy có ý nghĩa hết sức quan trọng trong các linh kiện cấu trúc nanô và chúng ta có thể quan sát trực tiếp trong một thí nghiệm quang học. Muốn vậy, bằng cách kích thích với một xung ngắn quang học thông qua mũi nhọn cận trường, chúng ta sẽ tạo ra được những phân tử tải điện trong lớp màng mỏng lượng tử. Việc bắt đầu bức xạ ánh sáng của sợi dây lượng tử sẽ xác định xem bao giờ chúng đi tới sợi dây lượng tử. Điều này có thể theo dõi trong một thí nghiệm phân giải thời gian (xem hình 2.6.). Nếu đặt mũi nhọn cận trường trực tiếp lên sợi dây lượng tử (khoảng cách $d = 0$) chúng ta sẽ quan sát thấy sự tăng rất nhanh của bức xạ ánh sáng, sau đó sẽ giảm đi theo thời gian tồn tại đặc trưng của nó. Khoảng cách của mũi nhọn cận trường tới sợi dây lượng tử càng tăng thì sự tăng bức xạ càng chậm, bởi vì bây giờ các phân tử tải điện trước hết phải vượt qua khoảng cách tới sợi dây lượng

tử, điều này liên hệ với thời gian tới vào khoảng vài nanogiây. Bằng cách này chúng ta có thể nghiên cứu các tính chất của quá trình dịch chuyển, đặc biệt là xác định được vận tốc của các phần tử tải điện. Với năng suất phân giải thời gian cao hơn chúng ta cũng có thể phân tích được một cách chính xác bước chuyển đổi từ màng mỏng lượng tử lên sợi dây lượng tử, nghĩa là lối vào của các phần tử tải điện.



Hình 2.6:

Chuyển động của các hạt tải điện trong các cấu trúc nano bán dẫn đã được phân giải không gian và thời gian. Một xung sáng siêu ngắn truyền qua một đầu nhọn cận trường tạo ra các hạt tải điện trong một thời khoảng nhỏ hơn một picogiây trong một không gian có đường kính khoảng 100 nm trong cấu trúc dây lượng tử cần nghiên cứu. Việc dây lượng tử bắt đầu phát xạ ánh sáng, điều ta theo dõi được qua một thí nghiệm phân giải thời gian, cho chúng ta biết thời gian hạt tải điện đi tới dây lượng tử đó. Khoảng cách d của đầu nhọn cận trường đối với dây lượng tử càng lớn thì việc khởi phát ánh sáng càng chậm hơn, vì các hạt tải điện trước hết phải đi qua quãng đường tới dây lượng tử, điều này gắn liền với thời gian truyền nhiều nanogiây.

2.7. KẾT LUẬN

Nhiệm vụ cơ bản của công nghệ laser hiện đại là không ngừng tạo ra và thay đổi được những phạm vi ứng dụng mới cho môi trường ánh sáng. Đồng thời chính bản thân laser với tư cách là máy, thông qua sự đơn giản về mặt thiết kế, tính gọn nhẹ, dễ dàng sử dụng và tin cậy thì nó lại đã đi sâu vào phía hậu trường. Nhưng với cả hai nhiệm vụ này thì ở một số lĩnh vực nhất định, chúng đã được thực thi một cách đầy ấn tượng. Hiện vẫn đang còn rất nhiều khả năng ứng dụng đang chờ triển khai từ các phòng thí nghiệm và nghiên cứu. Những ví dụ về phương hướng hiện đại nhất đã được nêu ở trên. Dẫu sao cũng phải nêu nhận xét này: Hoàn toàn chưa thấy kết thúc cho tương lai của bước phát triển theo đường thẳng đứng của thời kỳ phát triển dựa vào photon.

3.

Laser xung siêu ngắn

3.1. MỞ ĐẦU

Từ nhiều năm nay, laser màu đã chiếm lĩnh lĩnh vực xung siêu ngắn. Nhưng vì các chất màu già hoá rất nhanh nên khả năng ứng dụng của laser màu trước đây chỉ hạn chế trong các lĩnh vực nghiên cứu thuần túy. Ngày nay, người ta đã đạt tới các xung có độ dài vài femtogiây trực tiếp bằng laser rắn. Qua đó đã mở đường cho việc chế tạo những laser xung ngắn nhỏ nhắn, chắc chắn và được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực thuộc nhiều ngành khác nhau.

Cũng như các loại laser khác, laser xung siêu ngắn có đặc trưng là ánh sáng của nó có thể hội tụ hết sức mảnh. Qua đó người ta có thể hội tụ năng lượng vô cùng lớn vào một điểm vô cùng nhỏ. Nhưng khác với sóng ánh sáng dao động không có kết thúc của một laser liên tục, các xung laser lại là những chớp sáng bị giới hạn về mặt thời gian. Nếu như ta so sánh ánh sáng laser liên tục với một tiếng sáo kéo dài, thì xung laser sẽ ứng với một tiếng trống. Nhưng các xung này kế tiếp nhau nhanh tới mức mà mắt chúng ta, vì quá trơ ý, cứ tưởng như thấy một tia sáng với độ sáng trung bình và không thay đổi. Nhưng thực ra từng xung riêng rẽ lại sáng hơn nhiều và tách biệt với nhau bởi các pha tối.

Ngay các laser đầu tiên vào cuối những năm 60 thế kỷ trước, đã bức xạ ra các xung trong đó điện từ trường dao động vài triệu lần. Nhưng chỉ đến bây giờ trong miền quang phổ khả kiến, chúng ta mới đạt tới giới hạn của một chu kỳ dao động riêng lẻ: một xung mà độ dài của nó không dài hơn thời gian một dao động duy nhất của điện từ trường xảy ra.

3.2. ỨNG DỤNG

Thời gian của xung laser ngắn nhất hiện nay đạt được vào khoảng vài femtogiây (10^{-15} s, một phần triệu tỷ giây). Thời gian này ngắn tới mức ta gần như không tưởng tượng nổi, nhưng ta hãy thử cố hình dung xem: để đi được quãng đường dài 1 mm, dù rằng vận tốc của ánh sáng rất lớn (300.000 km/s), thì nó vẫn còn phải cần tới một thời gian là 3.000 femto giây. Vậy là với các xung siêu ngắn, đường kính của một tia laser

chưa hội tụ sẽ lớn hơn nhiều lần chiều dài không gian của tia đó: xung sẽ bay trong không khí như một tấm phẳng. Nếu vậy ta cần những xung laser siêu ngắn như vậy làm gì?

Một lĩnh vực ứng dụng quan trọng là quang phổ thời gian ngắn, nhờ nó các nhà khoa học có thể nghiên cứu các quá trình xảy ra nhanh theo thời gian: Hệt như một nhà nhiếp ảnh chỉ có thể chụp được một bức ảnh rõ nét của một tàu hoả đang lao nhanh qua, nếu như biết chọn thời gian rọi sáng (*temps de pot*) đủ ngắn thì các quá trình quá nhanh cũng sẽ được rọi sáng bằng các xung ánh sáng siêu ngắn, để hệt như bằng một máy hoạt nghiệm (*stroposcope*), nó sẽ chụp những *bức ảnh chớp nhoáng* có chủ đích của các bước kế tiếp nhau hết sức nhanh. Chẳng hạn, những thí nghiệm như vậy cho ta nhận thức quan trọng về tiến trình của các phản ứng hoá học. Một trong những ví dụ điển hình là nhờ nó mà hiện nay các nhà khoa học có thể đo được khoảng thời gian của từng bước phản ứng của quá trình quang hợp. Thậm chí có thể nhờ các xung laser để điều khiển các phản ứng hoá học một cách định hướng để tổng hợp các hợp chất mà bằng các phương pháp khác rất khó đạt được. Ta cũng có thể kiểm tra các tiến trình chức năng của các linh kiện điện tử nhờ các xung laser siêu ngắn. Nhờ sự trợ giúp của chúng các nhà khoa học đã có thể theo dõi xem, liệu các xung điện sẽ chuyển động như thế nào qua các vi mạch.

Ngay *kỹ thuật điện tử vận tốc cao* tuyệt vời nhất cũng chẳng bao giờ đạt tới độ phân giải thời gian mà ngày nay, người ta gần như rất thông thường đạt được ở các phép đo với xung laser. Điều này đồng thời cũng có nghĩa là: vì chưa có các

detector điện tử thích hợp, nên việc xác định thời gian xung laser chỉ có thể quan sát được thông qua một con đường vòng nhờ kỹ thuật đo.

Một lĩnh vực ứng dụng lớn khác bao gồm tất cả những ngành ở đó cần tới ánh sáng có cường độ rất cao, chẳng hạn ở các thí nghiệm tổng hợp hạt nhân, trong việc gia công vật liệu hay ở ngành phẫu thuật mắt. Ngoài ra, người ta cũng cần tới ánh sáng có cường độ lớn cả trong ngành quang phổ hai photon: nhiều chất màu bình thường chỉ hấp thụ ánh sáng xanh lơ, lại sẽ phản ứng hết sức nhạy cảm với việc chiếu xạ bởi ánh sáng mạnh màu đỏ. Khi cường độ ánh sáng tăng gấp đôi thì sự hấp thụ chúng tăng gấp bốn. Nhưng chỉ ở tiêu điểm của một tia laser - xung màu đỏ mới xuất hiện sự hấp thụ thực sự có thể đo được. Hiện tượng này được dùng để phân tích bằng phương pháp phân giải cao và theo ba chiều sự phân bố của chất màu trong các tế bào sinh học.

3.3. CÂU THẦN CHÚ LÀ: SESAM

Một buồng cộng hưởng xung ngắn tiêu biểu sẽ khác với buồng cộng hưởng của một laser liên tục (thường gồm hai gương đặt đối diện nhau và nằm ở hai đầu của môi trường hoạt tính; hai gương này khuếch đại ánh sáng laser được sinh ra ở đó, và hắt ánh sáng ra ngoài). Sự khác biệt ở đây là bởi một yếu tố phụ cho phép laser hắt ánh sáng ra ngoài theo một tỷ lệ nhất định. Để đạt được mục đích đó, với các xung ngắn nhất người ta dùng một chất hấp thụ bão hoà. Độ hấp thụ của nó giảm khi cường độ ánh sáng tăng, và thậm chí có thể trở nên trong suốt.

Ba thông số đặc trưng cho chất hấp thụ gồm:

- ◆ Miền màu sắc mà nó hấp thụ,
- ◆ Cường độ mà ở đó hấp thụ sẽ bão hoà, và
- ◆ Thời gian mà trong đó chất màu tối trở lại, cũng tức là sự trong suốt biến mất.

Trong lĩnh vực công nghệ chế tạo các *gương dùng chất hấp thụ bão hoà bằng chất bán dẫn SESAM (Semi conductor Saturable Absorber Mirror)*-SESAM có nghĩa là vũng, làm ta liên hệ với: Vũng ơi mở ra !-để làm gương đầu và cuối trong buồng cộng hưởng, thì từ nhiều năm nay, nhóm nghiên cứu ở Trường Đại học Bách khoa Liên bang Thụy Sĩ (Zurich) đang đứng đầu thế giới. Nhờ các SESAM này họ đã thành công trong việc chế tạo những laser xung ngắn rất đáng tin cậy khi dùng các tinh thể và gương thuỷ tinh được pha tạp khác nhau. Một số loại laser này hiện nay đang có bán rộng rãi trên thị trường.

3.4. CÁC XUNG NGẮN NHẤT

Trong một thời gian dài laser màu đã thống trị lĩnh vực các xung siêu ngắn. Với một lượng chi phí khá lớn vào năm 1986, nhờ áp dụng các *Kỹ thuật nén xung ngoài buồng cộng hưởng*, người ta đã đạt được những xung có thời khoảng 6 femtogiây. Nhưng đáng tiếc không thể nào có được khả năng ứng dụng rộng rãi thành tựu này, mà chỉ hạn chế ở lĩnh vực nghiên cứu cơ bản thuần túy, bởi vì các chất màu già hoá quá nhanh. Nhưng đến nay nhóm các nhà khoa học ở Zurich vừa nêu trên cũng đạt tới các xung ngắn như vậy, thậm chí hoàn toàn bình thường nhờ trích trực tiếp từ một laser rắn. Ánh sáng

laser khi đó sẽ không còn là đơn sắc. Y như một tiếng nổ âm học mà ta không còn quy về một âm sắc cố định nữa, những xung ánh sáng ngắn như vậy cũng gồm rất nhiều thành phần về tần số, vậy chúng là "sắc sỡ". Miền bước sóng sẽ kéo dài từ *đỏ khả kiến* (670 nm) đến *hồng ngoại gần* (trên 1.000 nm).

Khi chế tạo *laser màu sắc sắc sỡ* này, nhóm các nhà nghiên cứu ở Zurich đã gặp trở ngại đầu tiên: Đối với các thành phần màu khác nhau thì bình thường, chu kỳ tuần hoàn của ánh sáng chạy giữa các gương cuối của buồng cộng hưởng khác nhau nhiều tới mức các thành phần *đỏ* của một xung, sau mỗi chu kỳ tuần hoàn lại càng chậm hơn. Như vậy là vận tốc ánh sáng trong tinh thể laser sẽ tăng khi chiều dài bước sóng λ tăng, tức là với ánh sáng hồng ngoại thì nó lớn hơn so với ánh sáng *đỏ*. Bởi vậy với thời gian, mỗi xung ngắn sẽ càng ngày càng bị dãn ra. Để tác dụng ngược lại hiệu ứng này, các nhà khoa học ở Trường Đại học Bách khoa Zurich cùng với các nhà khoa học Trường Đại học Kỹ thuật Darmstadt (CHLB Đức) đã chế tạo được những gương laser kiểu mới, trong đó ánh sáng có bước sóng dài sẽ đi vào sâu hơn so với ánh sáng bước sóng ngắn. Qua đó thành phần màu hồng ngoại đang chạy trước sẽ bị hãm lại khi phản xạ, và như vậy xung đang bị dãn ra, nay sẽ bị đẩy dồn lại.

Có thể giảm thời gian xung về các trị số kỷ lục hiện nay, một khi có ảnh hưởng của *hiệu ứng Kerr* bên trong tinh thể laser. Qua sự *ghép nối* một nhờ các *thấu kính Kerr*, tia laser tự nó hội tụ lại, và xung đã được khuếch đại bởi sự *tự hội tụ* của một tia laser mạnh nhờ vào sự thay đổi - phụ thuộc cường độ - của chiết suất trong vật liệu laser.

Tóm lại, chìa khoá để tạo ra được những xung ngắn nhất mà ổn định có thể nói như sau: SESAM khơi mào cho chế độ xung, còn hiệu ứng Kerr quang học rút ngắn thời gian xung, và các gương đặc biệt sẽ ngăn cản sự tách về mặt thời gian của các xung.

Nếu không dùng SESAM phải gây nhiễu cho chế độ hoạt động liên tục của laser bằng những tác động từ ngoài vào để chuyển sang chế độ xung. Điều đó có vẻ như kỳ lạ, nhưng lại hoàn toàn là khả thi khi chúng ta có thể khởi động chế độ xung một cách hết sức đơn giản bằng cách dùng một búa nhỏ đập vào giá đỡ gương trong buồng cộng hưởng.

Ta chỉ có thể tạo được những xung ánh sáng ngắn hơn một chút nữa bằng cách dùng thêm các thành phần màu phụ trợ. Muốn vậy, ta hội tụ xung siêu ngắn vào vật chất. Nhờ cường độ ánh sáng trong tiêu điểm rất lớn nên có thể tạo được những tần số dao động mới thông qua sự tương tác phi tuyến của ánh sáng với vật chất, hệt như khi ta gây ra tiếng lách cách trong một máy tăng âm bị tự kích.

Gần đây một nhóm các nhà nghiên cứu Hà Lan và một nhóm hỗn hợp Áo - Italia đã thành công trong việc tạo ra những xung ánh sáng có độ dài xung 5 femtogiây nhờ về mặt thời gian đã dồn phổ bị dãn rộng ra như vậy.

3.5. TIỂU LASER XUNG (PULSED MINIATUR LASER)

Nhiều khách hàng đòi hỏi những máy laser dễ cầm tay và dễ sử dụng. Đặc biệt là trong kỹ thuật đo, ngoài những đặc tính

yêu cầu trên người ta còn đòi hỏi phải có năng lượng xung rất lớn để có thể làm ngưng khoảng thời gian trôi qua giữa lúc phát và thu xung có một tiếng vọng, thường là yếu đi nhiều.

Buồng cộng hưởng laser ngắn nhất về mặt kỹ thuật có thể thực hiện được, trên thực tế là một tiểu laser, gồm một vật liệu kích hoạt laser hai đầu được mài để trực tiếp làm gương laser. Ở Zurich, người ta dùng vật liệu khuếch đại chỉ dày vài trăm micromet, và gương cuối dùng SESAM để khởi động chế độ xung. Chiều dài buồng cộng hưởng nhỏ cùng với một chất hấp thụ mà độ phản xạ của nó tăng rất nhanh khi đạt bão hoà, gây nên hiện tượng luôn luôn có sự ngắt laser trước khi nó có thể đạt tới trạng thái cân bằng là chế độ liên tục. Cách tạo xung như thế cũng còn được gọi là *biến điệu độ phẩm chất*. Sẽ xuất hiện những xung dài hơn, nhưng với năng lượng cao hơn và tần số lặp lại nhỏ hơn, đến vài nghìn xung/giây.

Ngay với khoảng cách tới mục tiêu vài kilômet thì tiếng vọng vẫn quay trở lại máy phát trước khi máy phát phát đi xung mới. Những xung ngắn nhất thế giới của laser biến điệu độ phẩm chất là 37 ps, chính là sản phẩm của nhóm các nhà khoa học Zurich này. Ngoài ứng dụng trong các phép đo khoảng cách, các tiểu laser xung còn đặc biệt thích hợp trong việc gia công vật liệu.

3.6. TRIỂN VỌNG

Nhờ khuếch đại ánh sáng, laser có thể bức xạ những công suất hết sức lớn, nhưng chỉ theo những xung lẻ. Ngay hiện nay

các nhà khoa học ở những trung tâm laser lớn đã có thể đạt tới những công suất đỉnh, vượt được cả công suất phát trung bình của tất cả các nhà máy điện đang hoạt động trên thế giới gộp lại, nhưng dĩ nhiên chỉ trong một thời khoảng hết sức ngắn. Từ đây vài năm tới sẽ mở ra những lĩnh vực ứng dụng mới cho các nhà khoa học cũng như kỹ thuật. Đó là một loạt các ngành từ vật lý năng lượng cao, vật lý hạt nhân, vật lý phân tử, vật lý nguyên tử và vật lý plasma, qua điện động lực học lượng tử phi tuyến tới những ứng dụng ở những máy gia tốc hạt, hay những nguồn phát mới cho bức xạ tia X cứng.

Mặc dù ngay lúc này chúng ta đã có thể thông qua các quá trình quang phi tuyến để biến các xung ánh sáng khả kiến thành các tia chớp siêu ngắn ở bước sóng tia X, nhưng chúng đang còn rất yếu. Ở đây đặc biệt lý thú là miền bước sóng từ 2 đến 4 nm, vì ở đó độ hấp thụ của cacbon và nước rất khác nhau. Cái cửa sổ nước này như vậy cho phép ta thực hiện ngành *soi hiển vi tế bào sinh học*.

Cho đến hôm nay thì vấn đề femtôgiây lại đã thành vấn đề của thế kỷ trước. Ngay từ năm đầu của thế kỷ 21 này, đã có công bố kỷ lục mới nằm trong vùng attôgiây (as hay 10^{-18} s). Mười nhà vật lý ở ba nước thuộc các châu lục khác nhau cùng công bố là họ đã cho phát và thu nhận được các xung tia X mềm riêng lẻ có độ dài xung 650 as (M. Hentschel et al., Nature, Nov. 29, 2001). Họ là đại diện cho các viện laser thuộc Trường Đại học Tổng hợp Viên (Áo), Trung tâm Khoa học và Công nghệ Quốc gia Ottawa (Canada) và Trường Đại học Tổng hợp Bielefeld (CHLB Đức).

Để tạo xung ánh sáng siêu nhanh này, họ lái chùm tia bước sóng 750 nm, có độ dài 7 fs, cường độ đỉnh xung $9 \cdot 10^{14}$ W/m² vào một ống neon dài 3 mm ở áp suất 200 mbar. Kết quả thu được một chuỗi xung điều hòa trong khoảng từ cận tử ngoài đến tia X mềm (bước sóng khoảng 14 nm). Lớp phản xạ molipden - silic sẽ tách xung tia X mềm, gây trễ so với ánh sáng khả kiến, sau đó chiếu cả hai tia vào tiêu là khí nguyên tử krypton để tạo ra xung tia X cuối cùng, có độ dài 650 ± 150 as.

Kỹ thuật đo là so sánh miền xung ánh sáng khả kiến với miền xung tia X, thực hiện bằng phát xạ tia X phân giải góc với độ chính xác nêu trên.

4.

Làm lạnh khí bằng tia laser

4.1. PHƯƠNG PHÁP LÀM LẠNH KHÍ TỚI NHIỆT ĐỘ SIÊU THẤP

Thông thường ta hay đồng nhất ánh sáng với nhiệt. Bởi vậy mới thoát đầu nghe có vẻ như vô lý nếu nói rằng ta có thể dùng ánh sáng để làm lạnh vật chất, thậm chí còn có thể đạt tới những nhiệt độ thấp hơn rất nhiều nếu đem so với những máy làm lạnh thông thường. Nhưng chính những công trình được nhận giải Nobel về vật lý gần đây đã cho phép thực hiện dùng tác dụng của bức xạ điện từ để đưa các chất khí về nhiệt độ thấp nhất trong điều kiện phòng thí nghiệm có thể đạt được.

Lịch sử của thành tựu khoa học này gắn liền với tên của một nhà bác học rất nổi tiếng. Trong một công trình công bố vào năm 1917, Albert Einstein (1879-1955) đã cho thấy: một chất khí ở dạng phân tử, trong một trường ánh sáng nhiệt do bức xạ của một đèn dây tóc tạo ra (tức ánh sáng trắng có chứa tất cả các màu của quang phổ khả kiến), sẽ hấp thụ nhiệt độ của trường đó. Nguyên nhân là bởi các lượng tử ánh sáng (các photon) khi va chạm với một phân tử sẽ không những truyền năng lượng, mà còn truyền cả xung lượng, thông qua áp suất bức xạ này mà thay đổi vận tốc của đối tác va chạm. Bởi vậy ánh sáng nhiệt gắn liền với một nhiệt độ cao, bằng vài ngàn độ kelvin (K) (chính bằng độ celsius trên độ không tuyệt đối ở $-273,15$ K), vậy thực ra là không thích hợp với việc làm lạnh.

Điều kiện đã thay đổi một cách rõ rệt khi người ta phát minh ra được laser vào những năm 60 của thế kỷ qua. Với nó, lần đầu tiên chúng ta có trong tay một nguồn sáng tuyệt đối đơn sắc. Điều này đã đưa Arthur L. Schawlow (giải Nobel 1981) ở Trường Đại học Tổng hợp Stanford (California) và Theodor W. Haensch (hiện đã từ Mỹ trở về Trường Đại học Tổng hợp Munich) vào năm 1975 tới ý nghĩ về một phương pháp làm lạnh hết sức hiệu dụng cho các nguyên tử trung hòa.

Sáng kiến của họ là: các hạt của một chất khí khi ở nhiệt độ phòng sẽ bay hỗn loạn với vận tốc vài ngàn km/h, sẽ được chiếu sáng theo hai phương ngược nhau, bởi hai tia laser có tần số thấp hơn tần số hấp thụ của các hạt chất khí một chút. Những nguyên tử chuyển động ngược với một trong hai tia, sau

đó sẽ cộng hưởng với nó qua hiệu ứng Doppler và sẽ hấp thụ photon. Khi đó chúng tiếp nhận xung lượng của các photon rồi bị hãm lại. Tuy rằng sau đó chúng cũng cho đi các photon mà chúng đã tiếp nhận - điều sẽ gắn với một cú đẩy lùi lại; nhưng bởi vì điều này xảy ra theo một phương bất kỳ nên sẽ tìm ra được xung lượng do bức xạ quyết định thông qua nhiều chu trình hấp thụ, bức xạ.

Với phương pháp này, theo tính toán của Schawlow và Haensch, có thể đạt tới nhiệt độ vài phần trăm triệu Kelvin, ứng với vận tốc hạt cỡ 1 km/h. Không thể đạt tới một sự làm lạnh thấp hơn cái gọi là giới hạn Doppler này, bởi vì dải hấp thụ có một độ rộng hữu hạn sao cho các nguyên tử đang nằm yên, và tương ứng là chậm, sẽ hấp thụ ánh sáng laser một cách đồng đều.

Vào đầu những năm 80 thế kỷ qua, nhiều nhóm nghiên cứu, nhưng chủ yếu là nhóm của Phillips, đã cố gắng đưa ý tưởng này vào thực tiễn. Thoạt tiên họ đề xướng ra những phương pháp để hãm các hạt của một tia nguyên tử bằng một tia laser có hướng chuyển động ngược lại.

Vấn đề quan trọng nhất là phải bù trừ được sự giảm hiệu ứng Doppler khi hãm các nguyên tử sao cho chúng vẫn còn cộng hưởng với ánh sáng laser. Chính Phillips và các cộng sự của ông đã sử dụng một từ trường thay đổi được theo không gian dọc theo đoạn hãm, trường này thông qua hiệu ứng Zeeman sẽ thay đổi các mức năng lượng của các nguyên tử đến mức mà sự dịch tần số hấp thụ, quy định bởi đó, bằng chính sự dịch

Doppler, nhưng theo hướng ngược lại. Như vậy là năm 1985, lần đầu tiên họ đã có thể hãm hoàn toàn các nguyên tử của một tia.

Trái lại, nhà vật lý Nga Vladislav Letokhov và các cộng sự đã xây dựng được một kỹ thuật để cân bằng với sự dịch Doppler trong khi hãm, bằng cách liên tục tăng tần số của tia laser. Bằng phương pháp “*chirp*” (kêu ri ri) này mà John L. Hall và nhóm của ông tại National Institute of Standards and Technology (Viện Tiêu chuẩn và Công nghệ Quốc gia) ở Boulder (Colorado) vào năm 1985, cũng đã hãm được chuyển động của các nguyên tử.

Cũng vào năm đó, Chu và các cộng sự cũng đã thực hiện được ý tưởng của Haensch và Schawlow theo ba chiều. Khi đó, nhóm các nhà khoa học này đã hãm các nguyên tử của một tia nguyên tử natri bằng phương pháp *chirp* và sau đó đưa chúng vào một trường ánh sáng có sự chổng chéo của 6 tia laser – 3 cặp tia chạy đâm vào nhau và được bố trí thẳng góc nhau (xem hình 4.1). Bằng cách này, các nhà khoa học đã làm lạnh khoảng 100 000 nguyên tử về 0,2 phần nghìn độ Kelvin, kết quả gần như tương ứng với giới hạn mà Doppler đã tính được cho natri. Vì khi chịu tác động của ánh sáng, nguyên tử sẽ chuyển động y như trong một môi trường nhớt, nên các nhà khoa học gọi những tập hợp nguyên tử đã được làm lạnh này là “*xirô quang học*”. Nhưng khi đó các hạt hoàn toàn chẳng được “lưu kho”, mà do ảnh hưởng của trọng trường, sẽ lắng dần xuống; cho nên lớp xirô đầu tiên như vậy cũng chỉ tồn tại vào khoảng 1/10 giây.

Hoàn toàn theo đúng trình tự thì bước kế tiếp sẽ là việc thiết kế một cái bẫy quang - từ mà hiện nay đã là xuất phát điểm cho hầu như tất cả các thí nghiệm với nguyên tử lạnh. David Pritchard cùng Chu và các nhà khoa học khác đã thành công trong công việc này vào năm 1987. Theo sáng kiến của Jean Dalibard ở École Normale Supérieure (Trường Đại học Tổng hợp Paris), họ đã tổ hợp một xirô quang học gồm các tia laser phân cực tròn, với một từ trường 4 cực yếu. Từ trường này luôn làm lệch tần số hấp thụ của các nguyên tử bởi hiệu ứng Zeeman vừa đủ cho chúng bị áp suất ánh sáng cộng hưởng đẩy ra khỏi từ trường và sẽ được giữ lại ở gần điểm không từ tính. Ở đây các nhà khoa học đã tận dụng đặc tính của các tia laser là chúng không chỉ một màu (đơn sắc), mà hơn nữa còn phân cực: Vectơ điện (hay) từ trường dao động trong một mặt phẳng (phân cực thẳng) hay quay theo chiều hay ngược chiều kim đồng hồ (phân cực tròn).

Cũng trong thời gian đó Phillips và các cộng sự của ông đã xây dựng được phương pháp chính xác hơn để xác định nhiệt độ ở các xirô quang học. Qua đó ngay từ năm 1988, họ đã làm giới khoa học phải ngạc nhiên về những trị số rõ ràng nằm dưới cả giới hạn Doppler. Một năm sau Dalibard và Cohen-Tannoudji cũng như Chu và cộng sự đã giải thích được kết quả của thí nghiệm bất ngờ đó: Người ta đã không để ý đến chứng cứ hiển nhiên là trạng thái điện tử cơ bản của những nguyên tử kiềm đã dùng là suy biến, nghĩa là nó gồm nhiều mức con có cùng năng lượng. Các mức này khi tương tác với ánh sáng, tùy theo sự phân cực của chúng mà sẽ bị dịch chuyển theo các mức năng

lượng khác nhau. Đồng thời các mức này cũng được phân bố khác nhau tùy thuộc sự phân cực của ánh sáng.

Trong một trường ánh sáng, cả hai hiệu ứng này liên hệ với sự phân cực thay đổi theo không gian để tạo thành một cơ chế làm lạnh mới, hết sức tinh vi, tuy nó chỉ đúng cho những nguyên tử từ trước đã được hãm, nhưng với chúng thì nó lại có hiệu lực hơn rất nhiều nếu so với việc làm lạnh Doppler. Để đơn giản, ta có thể hình dung như sau: khi chuyển động các nguyên tử trèo lên một mức thế năng cao hơn, ở đó chúng lại hấp thụ một photon rồi bức xạ một lượng tử ánh sáng có năng lượng lớn hơn lượng tử mà chúng vừa hấp thụ, vì vậy chúng đã bị rơi về một mức thế năng thấp hơn. Phần năng lượng mà các nguyên tử đã dùng để trèo lên mức thế năng cao, đã được chuyển thành quang năng và mang đi theo các photon và như vậy là đã rút ra từ "tài khoản" động năng của nguyên tử. Điều này cứ lặp đi lặp lại mãi cho tới khi hạt quá chậm để có thể trèo lên mức thế năng cao hơn.

Do quá trình vừa nêu có sự tương tự như những nỗ lực của vị anh hùng trong thần thoại Hy Lạp bị trị tội, cứ trèo lên đến đỉnh núi thì lại bị tụt xuống, nên các nhà khoa học thuộc nhóm Cohen-Tannoudji gọi cơ chế mới này là *cơ chế làm lạnh Sisyphus*. Vậy là qua đó chúng ta đã đi tới một giới hạn nhiệt độ cơ bản nữa: giới hạn phản hồi tương ứng với năng lượng phản hồi được truyền cho nguyên tử khi nó hấp thụ một photon duy nhất. Rất tiêu biểu là nó nằm dưới giới hạn Doppler theo hai bậc độ lớn.

Vào những năm đầu 90 thế kỷ XX, nhóm các nhà khoa học Pari dưới sự lãnh đạo của Cohen-Tannoudji và Gilbert Grynberg, các nhóm của Phillips, cũng như Haensch (Munich) và Hemmerich (Hambourg) đã thành công trong việc tạo ra những trường ánh sáng theo những hình mẫu phân cực không gian được định lượng theo đúng kích cỡ, ở đó các nguyên tử được làm lạnh tới mức chúng sẽ bị giữ lại ở các cực đại cường độ và tạo nên những cấu trúc được sắp xếp theo trật tự tuần hoàn. Trong các tinh thể quang học như thế, các nhà khoa học đã đo được nhiệt độ dưới phần triệu độ Kelvin.

Phải chăng về mặt nguyên tắc bằng các phương pháp làm lạnh quang học, ta không thể xuống dưới giới hạn phản hồi? Đầu tiên có vẻ như vậy, vì với mỗi phương pháp này nhất thiết phải có bức xạ tự phát photon, chúng sẽ tác động nên một xung lực không thể kiểm tra được về phương của nó. Nhưng có thể tránh được điều này nếu lấy ra khỏi quá trình làm lạnh những nguyên tử mà sau một quá trình bức xạ tự phát tình cờ bỗng nhiên có vận tốc gần bằng không.

Ngay từ những năm 70 của thế kỷ trước, các nhà vật lý Italia đã xác định rằng, các nguyên tử kiềm nhờ tác dụng của ánh sáng có thể được bơm lên những trạng thái lượng tử nhất định (gọi là trạng thái tối) và chúng không còn tương tác với ánh sáng nữa.

Cùng với Annio Arimondo ở Trường Đại học Tổng hợp Piza, Cohen-Tannoudji cùng với cộng sự Alain Aspect có thể cho thấy cả về mặt lý thuyết cũng như thực nghiệm rằng hiệu ứng

Doppler bảo đảm chỉ các hạt chậm nhất mới có thể có những trạng thái tối như vậy.

Trong một loạt thí nghiệm với nguyên tử heli, năm 1984 và sau đó năm 1995, các nhà khoa học đã đạt tới trước tiên là trên một phương, rồi sau cả hai và ba phương, những nhiệt độ rõ ràng thấp hơn cả giới hạn phản hồi. Hiện nay đã có thêm những phương pháp mới, đặc biệt là phương pháp làm lạnh Raman do Marc Kasevich và Chu phát biểu lần đầu tiên vào năm 1992.

Kỹ thuật hãm quang học và dự trữ nguyên tử có nhiều ứng dụng. Chẳng hạn xirô quang học và các bẫy quang tử sẽ rất có ý nghĩa cho thế hệ sắp tới của các đồng hồ nguyên tử siêu chính xác. Các tinh thể quang học có thể sẽ tạo cơ sở cho một ngành quang khắc với nguyên tử lạnh. Giao thoa kế với các tổ hợp nguyên tử được làm lạnh bằng laser mở ra triển vọng cho những thiết bị mới cho phép đo trọng trường và gia tốc chính xác hơn hiện nay nhiều. Cuối cùng là những thí nghiệm để hiểu kỹ hơn vật lý lượng tử mà nếu không có nó thì những kỹ thuật làm lạnh và dự trữ mà các nhà khoa học được giải thưởng Nobel đóng vai trò quyết định, sẽ hoàn toàn chẳng thể thực hiện được. Một ví dụ nổi bật là *ngưng tụ Bose - Einstein* lần đầu tiên được thực hiện trên các chất khí ở dạng nguyên tử thành một hệ lượng tử vĩ mô mà nó nhận một trạng thái chung, và tương ứng thể hiện ra những tính chất lạ kỳ. Ngoài ra, các quan niệm cơ bản của vật lý lý thuyết về chất rắn như quan niệm về dao động Bloch, lần đầu tiên được kiểm tra một cách tuyệt vời trên

thực nghiệm. Việc làm lạnh và lưu trữ các nguyên tử bằng ánh sáng laser đã góp phần làm cho chúng ta ngày nay có thể nghiên cứu vật lý lý thuyết với một độ chính xác mà trước đây ít lâu vẫn chưa thể hình dung được.

4.2. LÀM LẠNH SISYPHUS VÀ CÁC TRẠNG THÁI TỐI

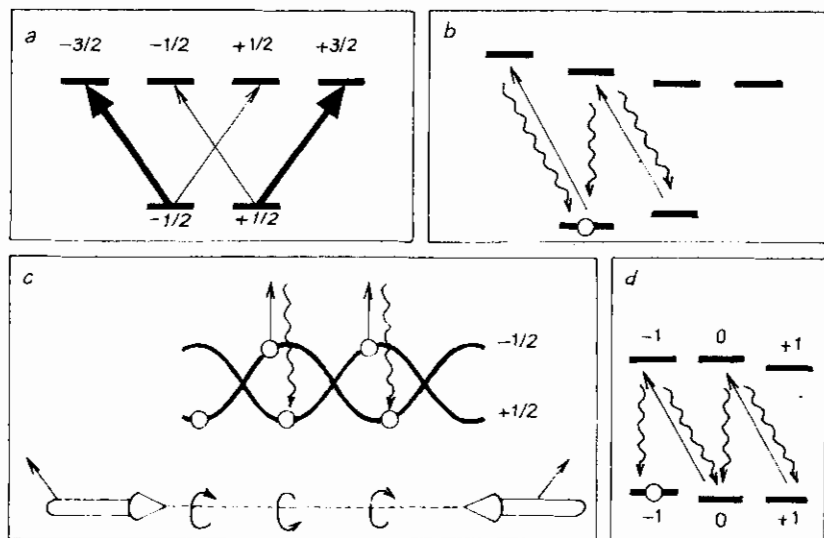
Sơ đồ mức nguyên tử đơn giản nhất mà với nó ta có thể làm lạnh Sisyphus được, gồm một trạng thái cơ bản và hai trạng thái với một trạng thái kích thích với 4 mức bằng nhau về mặt năng lượng (suy biến) chúng khác biệt nhau bởi số lượng tử từ m , và được gọi là thành phần Zeeman (xem hình 4.1a). Tuy thuộc sự phân cực của ánh sáng, nguyên tử sẽ từ hai mức của trạng thái cơ bản chuyển lên 4 mức kích thích với xác suất khác nhau (quy tắc chọn lọc). Với ánh sáng phân cực tròn trái, kích thích hoàn toàn theo các mũi tên nghiêng về bên trái; còn với ánh sáng phân cực tròn phải thì theo các mũi tên nghiêng về bên phải. Độ đậm của các mũi tên cho ta xác suất của bước dịch chuyển tương ứng.

Với mỗi kích thích cũng còn gắn liền một sự dịch chuyển về năng lượng của các mức tham gia. Độ lớn của dịch chuyển ánh sáng này phụ thuộc vào hướng phân cực và tỷ lệ với xác suất kích thích. Như vậy là với phân cực tròn trái thì mức trạng thái cơ bản trái (mũi tên thẳng) rồi tiếp là bức xạ tự phát một photon (mũi tên lượn sóng). Với phân cực tròn trái một nguyên tử sau vài chu trình kích thích và bức xạ như vậy sẽ có xác suất lớn để rơi vào mức Zeeman trái; bởi vì bằng bất cứ quá trình

hấp thụ-bức xạ nào chẳng nữa nó cũng không thể thoát khỏi đó được. Điều tương tự cũng xảy ra với phân cực tròn phải. Các nhà vật lý gọi quá trình này là *bơm quang học*.

Quá trình làm lạnh Sisyphus dựa vào sự phối hợp giữa dịch chuyển ánh sáng và bơm quang học, qua đó các nguyên tử với mỗi loại phân cực sẽ được đưa về mức Zeeman dịch chuyển bởi ánh sáng có năng lượng thấp nhất luôn kèm theo bức xạ năng lượng. Để hiểu kỹ điều đó, hãy xét một sóng ánh sáng đứng mà phân cực của nó thay đổi giữa tròn phải và tròn trái (xem phần dưới hình 4.1c). Ta sẽ thu được một sóng như vậy nếu hướng hai tia laser phân cực thẳng có mặt phẳng phân cực bị quay đi 90° ngược nhau. Với điều kiện này dịch chuyển ánh sáng của các mức Zeeman của trạng thái cơ bản sẽ thay đổi dọc theo sóng đứng dưới dạng hình sin, khi đó các đường cong cho hai thành phần Zeeman sẽ dịch đi 180° đối với nhau (xem phần trên hình 4.1c).

Bây giờ ta xét một nguyên tử ở mức Zeeman trái ($m = -1/2$), nó đang ở hồ thế năng nằm ở tận cùng bên trái và đang chuyển sang phải. Trước hết nó phải đi lên một đỉnh thế năng và khi đó sẽ bị mất tốc độ. Nếu nó càng lên cao thì xác suất rằng nó (theo hoàn cảnh ở b) thông qua một quá trình hấp thụ - bức xạ mà chuyển về mức Zeeman phải nằm thấp hơn ($m = +1/2$) cũng sẽ lớn hơn. Khi đó thế năng thu được khi trèo lên đỉnh sẽ được truyền cho trường ánh sáng; bởi vì tần số của photon được hấp thụ nhỏ hơn tần số của tần số được bức xạ.



Hình 4.1:

Chỉ khi giao thoa nhiều bước sóng ánh sáng khác nhau thì mới có một xung sáng ngắn, bởi vậy một xung laser không bao giờ có thể hoàn toàn đơn sắc và qua vậy mà khác với ánh sáng đơn sắc của các laser liên tục. Nếu càng có nhiều thành phần màu sắc khác nhau tạo nên một xung, nghĩa là phổ của xung đó càng rộng hơn thì xung sẽ càng ngắn hơn (hình trên bên trái). Bước sóng của ánh sáng khả kiến nằm giữa 400 (là lam) và 780 nm (đỏ). Con mắt chúng ta phản ứng đặc biệt nhạy đối với ánh sáng xanh lá - vàng (dưới bên trái). Với các tinh thể pha tạp saphir, chúng ta có thể tạo ra các bức xạ laser có bước sóng từ 700 đến 1100 nm (dưới phải). Ở đây cho thấy phổ khuếch đại của một tinh thể titan - saphir (đường cong giữa). Phổ của các xung laser ngắn nhất hiện nay đạt được (đường cong ngoài) sử dụng hầu như toàn bộ khoảng khuếch đại. Đằng sau là tinh thể khuếch đại đang phát sáng của một laser titan - saphir mà với nó người ta đã đạt tới xung dài 6,5 femtô - giây. Còn tia sáng bơm tinh thể đó được phát ra bởi một laser ion argon.

Nếu như nguyên tử tiếp tục chuyển động thì nhất thiết nó sẽ trèo lên đỉnh thế năng tiếp theo và quá trình lại được bắt đầu từ đầu. Chu trình này sẽ lặp lại cho tới khi hạt quá chậm để còn có thể trèo lên các đỉnh và sẽ bị giữ lại ở một hố.

Nhưng vì nguyên tử vẫn tiếp tục hấp thụ các photon và vẫn có thể bức xạ, nên nó vẫn giữ một vận tốc trung bình hữu hạn ứng với các phản hồi khi cho đi một lượng tử ánh sáng. Nhưng ở những sơ đồ mức nguyên tử nhất định, chẳng hạn mức thể hiện ba thành phần Zeeman ở trạng thái cơ bản (ở đây là mức tận cùng trái, với $m = -1$) ở đó nó không thể hấp thụ được bức xạ nào từ trường ánh sáng ở quanh nó.

Những trạng thái được gọi là tối như thế đều có với mỗi phân cực của ánh sáng. Khi đó sẽ có một hoàn cảnh thuận lợi nếu như ở các trường ánh sáng có phân cực thay đổi không gian mà ảnh hưởng của bức xạ hoàn toàn chỉ liên hệ với các nguyên tử đứng yên. Điều đó có nguyên nhân là các hạt chuyển động bắt buộc đi vào các khu vực của trường ánh sáng với phân cực khác, ở đó chúng lại có thể hấp thụ được photon. Nhờ chuyển các nguyên tử về các trạng thái tối cũng có thể giảm được nhiệt độ của một chất khí thậm chí xuống dưới cả giới hạn phản hồi.

5.

Ứng dụng kỹ thuật laser trong y học

Trong khi ở một số lĩnh vực khác, công nghệ laser đã có kinh nghiệm ứng dụng đến hàng vài chục năm, thì ở lĩnh vực của y học lâm sàng, việc ứng dụng kỹ thuật laser mới chỉ ở giai đoạn khởi đầu. Riêng trong ngành phẫu thuật, hiện công nghệ laser đã tìm được cho mình một chỗ đứng khá vững vàng. Các phương pháp được áp dụng trong lĩnh vực này đều tận dụng được những tính chất vật lý đặc biệt là cho phép làm việc cực kỳ chính xác trong một khoảng không gian hết sức hẹp, đồng thời hạn chế rất nhiều đòi hỏi sức chịu đựng cho bệnh nhân. Các

lĩnh vực ứng dụng trải dài từ sinh kích thích, qua cắt và phá huỷ các cấu trúc sinh học bằng nhiệt, tới việc lấy đi và là phẳng các mô. Gần đây công nghệ laser cũng đã thâm nhập vào ngành chẩn đoán y học và nha khoa.

5.1. LIỆU PHÁP LASER QUANG ĐỘNG HỌC VÀ NHIỆT HỌC

Dưới tác dụng của ánh sáng laser, mô sinh học sẽ thay đổi cấu trúc của nó. Ở đây các quá trình xảy ra giữa các photon (lượng tử ánh sáng) và các phân tử về chi tiết hầu như chưa được giải thích. Thể loại và tiến trình các phản ứng phụ thuộc vào bản chất của mô bị chiếu xạ cũng như vào bước sóng, mật độ năng lượng và thời gian chiếu xạ ánh sáng laser đã dùng. Chúng được chia thành ba loại: các phản ứng quang hoá ở mật độ công suất thấp nhưng bù lại thời gian chiếu xạ dài; các phản ứng nhiệt học ở mật độ công suất cao và thời gian chiếu xạ ngắn; và các quá trình quang phi tuyến ở mật độ công suất cực lớn (vượt quá 10 megawatt trên centimet vuông) và thời gian chiếu xạ siêu ngắn (tối đa vài nanôgiây). Trong y học hiện nay chỉ dùng các tương tác quang động học và nhiệt học của ánh sáng laser với mô sinh học cho các phương pháp trị liệu.

Ý tưởng dùng ánh sáng để khơi mào các phản ứng quang hoá, thực ra chẳng có gì mới mẻ. Những quá trình thuộc thể loại đó đã được biết đến từ lâu qua quá trình tiến hoá. Thí dụ nổi bật nhất là quá trình quang hợp của thực vật, và cả sự tạo thành melanin của cơ thể chúng ta do ánh sáng tử ngoại gây ra.

Melanin là những chất mang màu sẫm, có chứa nitơ mà một trong những nhiệm vụ là nhuộm màu cho da và tóc.

Từ nhiều năm nay, ánh sáng đã được dùng trong trị liệu, chẳng hạn để điều trị bệnh vàng da ở trẻ sơ sinh. Bình thường thì chất màu bilirubin trong mật, một sản phẩm phân huỷ của chất màu trong máu là hồng huyết cầu, thông qua quá trình trao đổi chất, gần như hoàn toàn bị thải ra ngoài. Nhưng điều đó chỉ có thể thực hiện được một cách hạn hẹp ở trẻ sơ sinh vì do sự chưa đủ chín về mặt sinh lý của một enzym của gan. Khi nồng độ bilirubin tăng cao, nếu có tác dụng của ánh sáng xanh lơ (425 đến 475 nm), chất này sẽ nhờ quang hoá mà chuyển thành những izome không độc, sẽ có thể được thận thải ra ngoài.

a. Liệu pháp laser quang động học

Với liệu pháp trị khối u quang động học bằng ánh sáng laser, bệnh nhân được tiêm, uống hay đưa vào cục bộ một chất quang tăng nhạy (*photosensibilisator*). Hoạt chất nhạy cảm với ánh sáng này sẽ tập trung với nồng độ rất cao ở mô khối u. Sau đó chiếu xạ vùng khối u bằng ánh sáng laser sẽ xảy ra một quá trình quang hoá, chất quang tăng nhạy sẽ truyền năng lượng thu được qua sự hấp thụ ánh sáng cho các phân tử khác. Khi đó sẽ xuất hiện những hợp chất có hoạt tính cực mạnh gọi là các gốc, chúng sẽ phản ứng với các phân tử tế bào khác và qua đó phân huỷ mô bị bệnh một cách có chọn lọc.

Các chất quang tăng nhạy còn tạo được một khả năng khác để sử dụng kỹ thuật này vào trong y học, đó là chúng giao lại bằng cách tự phát quang năng lượng kích thích dưới dạng

ánh sáng, tức là chúng huỳnh quang. Nếu một chất quang tăng nhạy như vậy được làm giàu một cách chọn lọc trong khối u, thì qua quá trình quang kích thích bằng ánh sáng laser và sự chứng minh bằng ánh sáng huỳnh quang khi đó bức xạ ra, chúng ta có một phương pháp che khối u (*tumor screening*) rất nhạy.

Liệu pháp laser quang động học ngày nay đã được ứng dụng cho hầu hết những cơ quan mà phương pháp nội soi có thể cập nhật: các khoa tai, mũi, họng, khoa dạ dày - ruột (tuyến dạ dày-ruột lên đến thực quản), khoa tiết niệu và phụ khoa, cũng như khoa da liễu với các bệnh ngoài da. Theo kinh nghiệm đã thu được ở khoa dạ dày-ruột, liệu pháp laser quang động học đặc biệt thích hợp với việc chứng minh và trị liệu những khối u hoặc nhỏ, hoặc trên bề mặt, nhưng cũng cho cả việc chiếu xạ bề mặt cho các vùng niêm mạc loạn hình (*dysplastic*), tức là các phát triển sai lạc.

Các chất quang tăng nhạy hiện đại, trong trường hợp lý tưởng được dùng cho cả trị liệu lẫn chẩn đoán, có độ chọn lọc cao đối với khối u lành - ác, có tác dụng phụ không đáng kể và có khả năng hấp thụ ánh sáng rất cao. Nếu dùng axit δ -aminolevulin thì lúc đầu chưa có các tính chất này. Axit δ -aminolevulin là một chất do cơ thể sản ra, xuất hiện như là sản phẩm trung gian trong sự sinh hợp (*biosynthese*) porphyrin. Với chức năng là thành phần chất màu của hồng huyết cầu (chất màu của máu) và diệp lục tố (chất màu của lá cây), các porphyrin là những chất cơ bản quan trọng cho sự sống.

Khi thừa porphyrin do đưa từ ngoài vào, chẳng hạn qua đường miệng, sẽ gây ra rối loạn tức thời, cũng chính là ước

muốn về mặt liệu pháp cho sự sinh hợp porphyrin. Hệ quả là có sự gia tăng việc sản sinh ra một chất nhạy ánh sáng là chất protoporphyrin. Sau 4 đến 6 giờ khi cấp một liều axit δ -aminolevulin nồng độ của chất quang tăng nhạy trong tuyến dạ dày - ruột đạt cao nhất. Ở các khối u ở ruột khi đó sẽ có sự tích lũy một lượng cao gấp sáu đến tám lần. Sau đó chiếu xạ bằng ánh sáng laser (635 nm) ở cực đại hấp thụ của chất quang tăng nhạy sẽ phá huỷ các khối u ở niêm mạc và các loạn sản (*dysplasie*) niêm mạc chỉ trong từ ba đến bốn ngày (xem hình 5.1). Còn chính ánh sáng laser không để lại di chứng nhiệt gì ở mô bởi vì đã chọn mật độ công suất thích hợp; hiện tượng xuất huyết hay lỗ thủng ở các cơ quan là hoàn toàn không thể có.

Cũng có thể dùng protoporphyrin cho việc chẩn đoán. Huỳnh quang đỏ đặc trưng cho loại hợp chất này có thể được kích thích bằng một laser krypton (407 nm). Qua tích lũy chọn lọc chất quang tăng nhạy trong các tế bào đã thay đổi một cách loạn hình hay bởi u ác, huỳnh quang này giới hạn một cách rõ rệt với mô xung quanh và khi quan sát qua máy nội soi, cũng có thể nhận biết bằng mắt thường. Phương pháp dò bằng huỳnh quang này đã được áp dụng có kết quả trong ngành niệu học, nhưng ở ngành vị tràng học hiện nó vẫn đang còn ở giai đoạn thử nghiệm.

b. Liệu pháp laser nhiệt

Ứng dụng laser thông thường nhất trong ngành phẫu thuật là dựa vào tác dụng nhiệt của ánh sáng hội tụ. Tùy theo thể loại laser và những thông số chiếu xạ đã chọn (mật độ công

suất, năng lượng tổng) chúng ta có thể thu được những hiệu ứng trị liệu khác nhau. Nhưng dĩ nhiên các hiệu ứng này cũng còn phụ thuộc rất nhiều vào các tính chất nhiệt (nhiệt lượng riêng, độ dẫn nhiệt, độ thấm máu) và các tính chất quang (hấp thụ, tán xạ) của mô bị chiếu xạ. Bởi tất yếu các tính chất quang này chủ yếu phụ thuộc vào bước sóng nên từ đây giải thích được những phản ứng khác nhau của mô đối với việc dùng các loại laser khác nhau.

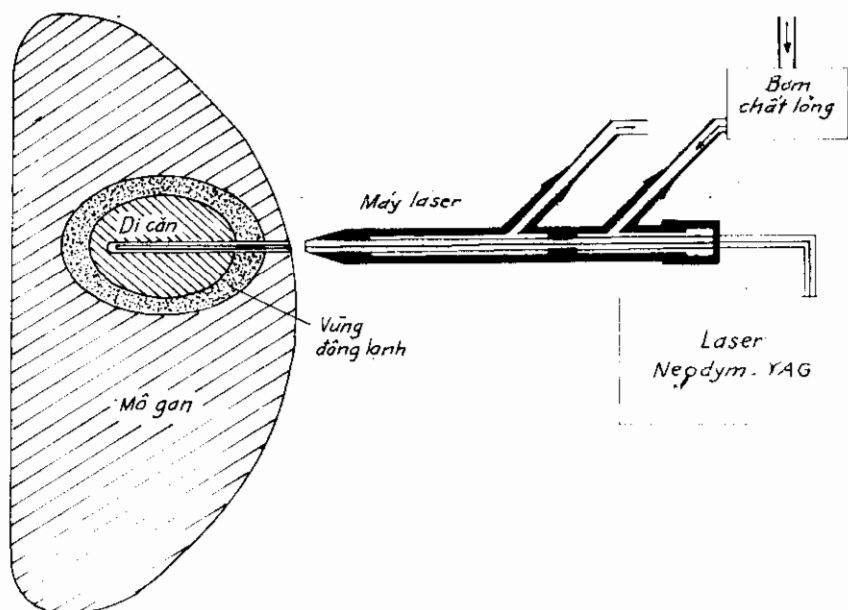
Trong ngành phẫu thuật thường dùng laser neodym-YAG. Bức xạ hồng ngoại (1064 nm) của loại laser này hầu như không bị nước hấp thụ và bởi vậy có thể đi sâu vào mô hơn hẳn ánh sáng của laser argon và CO₂. Tuy thuộc vào năng lượng đã được dùng mà độ xuyên thấu có thể đạt tới vài milimét.

Ở các khối u ác tính trong tuyến dạ dày – ruột, chỉ có thể hy vọng chữa khỏi nếu như chúng có thể được cắt bỏ một cách hoàn toàn. Tất cả các biện pháp điều trị khác sẽ chỉ có tác dụng giảm nhẹ (bớt đau...), tức là có thể loại trừ từng triệu chứng riêng rẽ, nhưng không loại trừ được nguyên nhân. Ngay cả liệu pháp laser cũng thuộc các phương pháp tạm trị này. Chẳng hạn như chúng ta có thể dùng nó cho bệnh ung thư biểu bì (*carcinoma*) thực quản không mổ được để mở rộng khoảng trống còn lại, tức là chiều rộng ngắn nhất của thực quản. Muốn vậy chúng ta dẫn dây dẫn sáng uốn được của một laser neodym-YAG đi qua ống dụng cụ (*instrumental canal*) của máy nội soi, một cách có định hướng vào vùng khối u. Dùng gây mê để giảm đau cho bệnh nhân, rồi dội tia laser đều và đi sâu vào các thành khối u. Khi đó sẽ xuất hiện khói và nó phải được liên tục hút đi.

Nếu làm đông tụ một cách hết sức thận trọng (tức là phá huỷ mô sinh học bởi nhiệt) sẽ không xuất hiện sự chảy máu. Sau ít ngày thì mô đã bị phá huỷ sẽ tự động thải ra ngoài. Tuy theo độ lớn và độ trải rộng của khối u mà có khi phải cần nhiều phiên điều trị mới mở được một chỗ đã bị khối u làm hẹp lại. Nếu chỗ hẹp hình sợi thì dây dẫn sáng có các đầu sợi bức xạ hình trụ sẽ có thể giúp làm đông tụ ống còn lại từ phía trong, theo hình trụ. (xem hình 5.2).

Cũng như bệnh ung thư biểu bì thực quản, bệnh ung thư biểu bì - ruột già (đại tràng) càng ngày càng trở nên phổ biến theo trình độ công nghiệp hoá ở nhiều quốc gia. Các phương pháp tạm trị như liệu pháp laser hay liệu pháp lạnh có thể phòng ngừa việc phải đặt một hậu môn nhân tạo. Với liệu pháp lạnh thì mô sẽ bị phá huỷ bằng nitơ lỏng (ở nhiệt độ -196°C).

Theo kinh nghiệm ở cận ruột già (đại tràng sigma), cả hai phương pháp điều trị đều có giá trị như nhau. Nhưng vì không cần dùng tới nitơ lỏng nên phương pháp laser dễ sử dụng hơn. Cả việc điều khiển sợi uốn được, dĩ nhiên cũng đơn giản hơn khi dùng một thanh làm lạnh cứng đơ. Thêm nữa những tiến bộ gần đây như các đầu sợi bức xạ hình bán trụ hay trụ, cho phép chiếu xạ từ trong ra đối với những chỗ bị u ác làm hẹp ở cận ruột già. Cách thức thực hiện cũng chẳng khác gì so với cách xử lý bệnh ung thư biểu bì thực quản. Nói chung bệnh nhân chỉ cần được gây mê nhẹ. Trường hợp nếu như trong quá trình cắt - tách mô đã bị huỷ có xuất hiện những chỗ rỉ chảy máu, chúng ta có thể cầm máu không khó khăn bằng laser neodym-YAG.



Hình 5.1:

Sơ đồ phương pháp trị liệu nhiệt do laser khời mào. Trước tiên khối u gan sơ cấp hay thứ cấp được chích rồi kênh chích được mở rộng ra. Sau khi đưa *laser applicator* vào kênh đã mở rộng, nơi phát sinh bệnh ở gan sẽ được làm đông lại bằng ánh sáng laser. Việc làm lạnh bằng nước nhằm ngăn ngừa *laser applicator* bị dính chặt vào mô ở xung quanh và giữ cho nhiệt độ ở trung tâm không đổi. Việc cung cấp năng lượng được thực hiện nhờ sự điều khiển của máy tính.

Di căn của những khối u ở đại tràng và đại tràng sigma chủ yếu là cố định ở gan và là nguyên nhân gây tử vong chính ở nhóm bệnh nhân này. Không phải tất cả mọi di căn đều có thể loại bỏ nhờ phẫu thuật. Thường thì ngay thể trạng chung của bệnh nhân không tốt cũng đủ ngăn cản một ca mổ. Trong

những trường hợp như thế nên dùng liệu pháp nhiệt do laser khơi mào để phá huỷ những di căn. Khi đó những mô gan lành được miễn trừ mà không bị đưng tới. Những máy laser điều trị ung thư loại mới được phát minh (*laser applicator*) dùng nước làm lạnh và máy tính để điều khiển việc cung cấp năng lượng, cho phép làm đông tụ một cách đều đặn các di căn, nhưng trước đó những di căn này phải được chích dưới sự kiểm tra bằng máy siêu âm (xem hình 5.1). Vậy là có thể để chữa ra những ven ở gan và các ống mật to, có thể nhận biết bởi phương pháp âm ký (*sonografic*) bằng chẩn đoán siêu âm.

Việc chích có thể thực hiện hoặc nhờ phẫu thuật mở, nhờ gương ở bụng, hoặc bằng laser applicator trực tiếp qua thành bụng. Việc chích trên bụng đã được mở cho chúng ta khả năng nghiên cứu toàn bộ cơ quan, kể cả các hạch bạch huyết. Ngoài ra có thể ngắt một thời gian ngắn sự chảy máu ở gan, vì vậy có thể làm đông tụ trên những diện khá lớn. Trái lại, hai phương pháp kia sẽ cho phép ứng dụng nhiều lần, khi bệnh ung thư tiếp tục tiến triển. Những di căn lớn phải chích nhiều lần để có thể phá huỷ chúng một cách hoàn toàn. Chỉ xảy ra sự chảy máu trong khi chích, còn khi đưa máy laser applicator vào sẽ cầm máu ngay.

Trong những ngày tiếp theo, những vùng đông tụ sẽ phân rõ ranh giới với mô lành. Khi đó mô gan đã bị phân huỷ sẽ bị loại ra và từ rìa, sẽ dần dần được thay thế bởi mô sẹo (xem hình 5.2). Nếu di căn ở trực tiếp ngay cạnh một ống mật lớn sẽ có thể xuất hiện một khối rỗng có chứa mật, thường thì điều này chẳng gây ra vấn đề gì cho bệnh nhân.



Hình 5.2:

Ví dụ trên lâm sàng cho liệu pháp nhiệt do laser khởi mào: Một di căn gan không thể mổ được nằm giữa mạch máu chính và ven rỗng dưới (các mũi tên), sẽ được làm đông lại bằng laser. Trên ảnh tia X lớp chụp trên máy tính (*computertomogramm*), mô bị phá huỷ bởi nhiệt (sao) phân biệt một cách rõ rệt với các mô lành ở xung quanh. Mạch máu chính và ven rỗng dưới không hề bị liệu pháp tiếp giáp. Cũng được thấy rõ lá lách (trái).

Liệu pháp nhiệt do laser khởi mào cũng được ứng dụng vào các khoa phẫu thuật thần kinh và niệu học với tư cách là một phương pháp nung nhẹ và xâm nhập tối thiểu (*minimal - invasif*) vào bệnh nhân. Nhưng hiện nay chưa thể có một đánh giá mang tính tổng kết cho phương pháp này. Số bệnh nhân còn quá ít và sự phát triển về mặt kỹ thuật còn chưa kết thúc.

Những khảo cứu tiếp theo sẽ quyết định xem, liệu phương pháp này có được áp dụng một cách đại trà hay không.

5.2. CÁC ỨNG DỤNG CỦA KỸ THUẬT LASER TRONG KHOA TAI - MŨI - HỌNG

Trong khoa Tai – Mũi - Họng, ngày nay laser đã tạo cho bác sỹ phẫu thuật điều kiện làm việc dễ dàng trong nhiều lĩnh vực. Tuỳ vị trí và mục đích ứng dụng mà chúng ta có thể lựa chọn những loại laser khác nhau.

Laser CO₂ bức xạ ánh sáng trong miền hồng ngoại trung bình ở bước sóng vào khoảng 10 μm . Vì các phân tử nước hấp thụ ánh sáng này rất mạnh nên năng lượng của tia laser sẽ được tiêu thụ ngay trên bề mặt nước. Tia laser sẽ không đi sâu vào được những khoảng không gian có chứa nước, nhưng với đường kính chùm tia rất nhỏ ($\leq 0,2 \text{ mm}$) thì tia laser vẫn có thể làm cho mô bay hơi và qua đó sẽ cắt nó.

Ngoài bước sóng, còn có những yếu tố khác ảnh hưởng tới đặc trưng của một tia laser. Chẳng hạn một tia sáng của laser CO₂ được cố ý điều chỉnh sao cho không nét, sẽ hâm nóng mô trên một diện lớn và làm cho nó teo lại. Trái lại, một tia được điều chỉnh nét, sẽ có thể qua một hệ gương được điều khiển bằng máy tính, được dẫn rất nhanh trên một vùng xác định và khi đó, sẽ tiếp xúc với mỗi điểm chỉ một lần. Vì thời gian tác động cực kỳ ngắn nên ở mỗi chỗ được chiếu xạ, chỉ rất ít mô được hoá hơi, nhưng điều đó lại xảy ra một cách rất đều đặn trên toàn bộ diện. Bằng cách này các lớp da hay các lớp niêm

mạc được bóc đi khỏi bề mặt, hay là phẳng. Phương pháp này được ứng dụng để loại bỏ một cách cẩn thận những khối u lành trong thanh quản, ví dụ như u nhú, do virus gây ra.

Còn laser neodim - YAG bức xạ ánh sáng trong miền hồng ngoại gần, với bước sóng 1064 nm. Ánh sáng này hầu như không bị nước hấp thụ, bởi vậy mà tia laser có thể xuyên sâu vào trong mô và phá huỷ nó bằng nhiệt. Loại laser này rất thích hợp để làm teo những phù nề và các mô chứa nhiều nước khác, chẳng hạn như các bướu thịt ở mũi.

Hồng huyết cầu, chất màu đỏ của máu, hấp thụ ánh sáng có bước sóng nằm trong khoảng 500 đến 600 nm. Những laser bức xạ ánh sáng trong miền quang phổ này sẽ được dùng để điều trị các bọ máu nhỏ và trung bình hay cầm máu cho chứng chảy máu cam. Ở đây hầu như chẳng bao giờ kích thích các phân tử nước.

Ngoài các laser neodim - YAG và laser CO₂ là những laser phát bức xạ liên tục, trong khoa Tai - Mũi - Họng cũng còn dùng các laser phát xung ngắn. Chúng tạo ra những chớp sáng rất ngắn có công suất rất cao. Năng lượng rất cao được giải phóng cục bộ, được ứng dụng để bóc những lát xương mỏng hay phá huỷ các sỏi (cận canxi với nước bọt).

Sau đây sẽ liệt kê những chỉ số chủ yếu cho ứng dụng hiện nay của kỹ thuật laser trong khoa Tai - Mũi - Họng. Chúng ta sẽ thấy được rằng, trong rất nhiều trường hợp, nếu so với các phương pháp truyền thống thì ở đây liệu pháp laser tỏ ra có được những cải tiến cơ bản.

a. Phẫu thuật cổ

Các khối u ở họng, thực quản, hay thanh quản thường được cắt bỏ ngay cả khối. Việc cắt đoạn (*resection*) cả khối như thế đòi hỏi một nỗ lực lớn về mặt phẫu thuật và gây cho bệnh nhân, phụ thuộc vào độ lớn khối u, một khuyết tật rất rộng mà phải được đóng lại với khá nhiều công sức. Trái lại một tia sáng cắt chính xác của một laser CO₂, được điều khiển bằng một vi máy điều khiển (*micromanipulator*) có kiểm tra bằng kính hiển vi, sẽ để lại những tổn hại nhỏ hơn rất nhiều, thậm chí chẳng cần phải tái xử lý nhờ phẫu thuật. Các laser này có thể được ứng dụng trong nhiều trường hợp điều trị, nhưng không nhất thiết là mọi trường hợp. Với thanh quản thì ngày nay, ngay ở những khối u rất rộng, vẫn có thể can thiệp nhờ phẫu thuật laser mà vẫn giữ được hoàn toàn hay một phần chức năng giọng nói. Thêm vào đó qua liệu pháp laser có thể rút ngắn rất nhiều thời gian điều trị nội trú và giảm đáng kể tỷ lệ biến chứng.

Các laser neodym - YAG và laser CO₂ rất thích hợp với việc cắt nhỏ những amidan vòm miệng quá lớn (xem hình 5.3). Những amidan lớn này không chỉ ngăn cản việc tiếp thu thực phẩm mà còn cản trở quá trình hô hấp. Nếu dùng laser cắt amidan quá lớn, các mạch máu được cầm ngay nhờ nhiệt. Như vậy, phương pháp này cho phép phẫu thuật không chảy máu và bởi vậy ngày nay có thể tiến hành bằng điều trị ngoại trú. Nhưng trái lại, trong việc cắt bỏ amidan vòm miệng liệu pháp laser vẫn chưa có được tiến bộ đáng kể. Ca phẫu thuật rất hay được thực hiện này thường gây nhiều đau đớn cho bệnh nhân và cũng luôn kèm theo sự chảy máu kéo dài. Đáng tiếc là

những nghiên cứu thực hiện từ nhiều năm nay trên thế giới cũng chưa có thay đổi gì cho vấn đề đó.

b. Phẫu thuật mũi

Mũi chính là máy điều hoà nhiệt độ cho phổi. Nó thực hiện nhiệm vụ hâm nóng và làm ẩm không khí mà chúng ta hít thở. Muốn vậy mũi phải dùng tới ba khối phòng – các cánh bướm mũi – khi không khí khô và lạnh chúng sẽ phồng lên. Chúng được xếp chồng lên nhau và hoạt động theo cặp. Nhưng nếu phồng quá lớn và quá lâu sẽ cản trở sự thở bằng mũi. Đây là một bệnh phổ biến ở các nước phát triển, ở đó người ta sinh hoạt thường xuyên trong các phòng có lò sưởi và máy điều hoà, bởi vậy không khí quá khô.

Với bệnh này liệu pháp laser sẽ rất đáng tin cậy trong việc cắt nhỏ các cánh bướm dưới. Nếu kết hợp dùng các kỹ thuật nội soi sẽ cho phép điều trị ngoại trú, chiếu xạ và trực tiếp quan sát. Mô sẽ teo lại, hình thành các vết sẹo – và mũi lại thông suốt như trước. Ở đây chỉ cần gây mê cục bộ nhẹ nhàng trên bề mặt niêm mạc là đủ. Cả các đường gân thường hình thành trên vách ngăn trong mũi, ngày nay cũng dễ dàng được cắt bỏ bằng laser.

Một số người, sau những lần sổ mũi rất thông thường, lại liên tục bị viêm xoang phụ. Đó là do một khe hẹp – giải phẫu gây ra, khe này nằm ở bên cạnh cánh bướm giữa xoang chính ở mũi. Ở đây cũng chính là các lối vào xoang phụ. Dùng laser sẽ dễ dàng cắt bỏ những khe hẹp này. Khi đó bác sỹ phẫu thuật sẽ

cắt nhỏ các cánh bướm giữa cũng như các cấu trúc khác ở thành ngoài của mũi, bằng cách đó tỷ lệ tái phát giảm hẳn.

c. Phẫu thuật tai

Laser CO₂ đã có những thành công lớn trong ngành phẫu thuật tai: ở các tiểu cốt thính giác rất nhạy cảm, ngày nay, các bác sỹ đã có thể phẫu thuật mà không cần tiếp xúc. Ngoài ra phương pháp này còn cho phép cắt bỏ các xun mà vẫn không làm các chỗ xung quanh bị tổn thất vì nhiệt.

Bằng cách này cũng có thể mở tai trong mà không gây nguy hiểm gì. Điều này rất cần thiết ở một số bệnh, chẳng hạn như bệnh xơ cứng tai là một quá trình thay đổi lại các xun, tiến hành song song với sự tiến triển dần dần của nghễnh ngãng và bệnh ù tai. Ở đây việc đục lỗ màng nhĩ mà không cần tiếp xúc cũng hết sức dễ dàng thực hiện nhờ phẫu thuật bằng laser.

Ngày nay, người ta dùng các laser xung để phá huỷ những viên sỏi ở các tuyến nước bọt vì chúng cản trở sự thông suốt bình thường của nước bọt. Tuy nhiên, những viên sỏi phải có thể nhìn thấy được trong máy nội soi. Do nước bọt bị kẹt lại nên ở các bệnh nhân này – đặc biệt là sau khi ăn – tuyến nước bọt sẽ sưng tấy lên và gây đau đớn.

Thông qua việc sử dụng laser, rất nhiều ca phẫu thuật trong ngành Tai – Mũi - Họng đã có thể tiến hành một cách hết sức nhẹ nhàng, bảo vệ bệnh nhân. Trong nhiều trường hợp với một sự can thiệp có xâm nhập tối thiểu vào bệnh nhân, thậm chí có thể không cần phải dùng tới điều trị nội trú mà vẫn

không phải cắt giảm ước nguyện của bác sỹ là muốn thực hiện một liệu pháp đầy kết quả. Phẫu thuật laser trong khoa Tai - Mũi - Họng là một bước tiến dần tới ngành y tế lưu động.

d. Phẫu thuật giác mạc trong nhãn khoa

Trong ngành nhãn khoa ở lĩnh vực phẫu thuật giác mạc, trước tiên laser excimer đã củng cố được vị trí cho mình. Phần chính của loại laser này là một ống khí chịu áp suất cao chứa một hỗn hợp gồm khí trơ và khí halogen. Qua phóng điện cao thế, sẽ xuất hiện những phân tử có thời gian tồn tại cực kỳ ngắn là các halogenua khí hiếm ở trạng thái kích thích và chúng lại giải phóng ngay tức thì năng lượng của mình dưới dạng bức xạ tử ngoại. Tùy thuộc chất khí chứa trong ống mà bước sóng nằm giữa 193 nm (florua argon) và 351 nm (florua xenon). Thời gian xung của ánh sáng bức xạ vào khoảng 30 ns.

Bằng một hệ quang học cho ánh sáng tử ngoại đi qua, bức xạ laser này được lái vào mắt bệnh nhân. Trên bề mặt giác mạc, các xung ánh sáng sẽ bị một lớp hết sức mỏng, chỉ dày khoảng 250 nm hấp thụ hoàn toàn. Lớp này tiêu thụ toàn bộ năng lượng của xung laser và vì thế ngay lập tức hoá hơi, không kịp cho mô xung quanh trong thời gian tác dụng ngắn như vậy có thể bị phá huỷ. Bằng cách này chúng ta đã có trong tay một khả năng gia công vật liệu ưu việt hơn rất nhiều nếu so với các phương pháp vi phẫu khác.

Điều có ý nghĩa quyết định cho thị lực chính là bề mặt đều đặn, trong suốt và phẳng của giác mạc. Nhưng những sự can

thiệt thông thường của phẫu thuật, chẳng hạn như bằng dao mổ, trên bình diện vi mô sẽ luôn phá huỷ mô. Cơ thể sẽ phản ứng với sự việc này và rồi tạo ra sẹo là nguyên nhân gây ra bệnh mờ giác mạc. Ngay sự can thiệp phẫu thuật bằng laser excimer cũng sẽ khơi mào cho một phản ứng viêm tấy ở mô, nhưng chúng ta vẫn có thể giới hạn được ở một mức độ nhỏ nếu đều đặn rỏ thuốc vào mắt. Sau đó trong thời gian vài tháng, trên kính hiển vi sẽ nhận thấy được một sự vẩn đục nhẹ như sương nhưng chỉ trong những trường hợp hãn hữu mới ảnh hưởng tới thị lực.

Một ứng dụng đã được phổ biến là phẫu thuật giác mạc *khúc xạ*: với các con mắt bị cận thị, viễn thị hay loạn thị do có sự mất cân đối giữa tiêu điểm của dụng cụ quang học (giác mạc và thuỷ tinh thể) và chiều dài nhãn cầu. Điều này thường đã được hiệu chỉnh nhờ đặt trước mắt thấu kính hội tụ hay phân kỳ dưới dạng kính cận hay viễn, hay kính áp tròng. Một cách khác là có thể thay đổi bán kính độ cong bề mặt giác mạc - dĩ nhiên là cũng chỉ ở một giới hạn nhất định bằng laser excimer. Sau đó các đối tượng được quan sát sẽ lại được tạo ảnh chính xác trên mặt phẳng giác mạc. Khi đó thì quá lắm, bệnh nhân cũng sẽ chỉ còn cần tới một sự trợ giúp nhỏ về thị giác mà thôi.

Các lĩnh vực ứng dụng khác cho phẫu thuật laser là: lấy đi các vết sẹo, sự mọc mô lạ ở giác mạc và các mô đã hỏng trên bề mặt giác mạc ở những thay đổi giác mạc mang tính thoái hoá hay sau những tổn thương như bị bỏng. Như vậy ngày nay chúng ta có thể điều trị những bệnh và những tổn thương ở giác

mạc mà trước đây chỉ có thể xử lý bằng cách duy nhất là thay giác mạc.



Hình 5.3:

Một ca phẫu thuật bằng laser dùng máy nội soi các bướu thịt ở mũi làm chắn đường hô hấp trên máy laser neodym - YAG. Trên màn hình thấy rõ một bướu thịt vừa mới bị một dây dẫn laser chạm vào và nhờ vậy mà bị phá hủy.

5.3. KÍNH HIỂN VI QUÉT LASER ĐỒNG TIÊU ĐỂ PHÁT HIỆN SỚM SÂU RĂNG

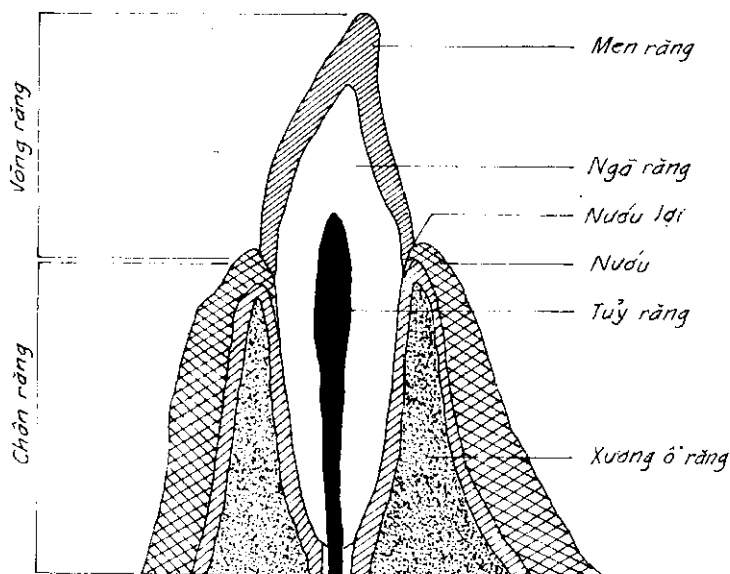
Mặc dầu ở nhiều nước, sâu răng đang bị đẩy lùi, nhưng thực tế bệnh này vẫn hoàn toàn chưa được coi là đã đi vào dĩ vãng. Đau sao sâu răng vẫn là bệnh thường gặp nhất về răng.

Nguyên nhân của nó đã được các nhà chuyên môn giải thích gần như hoàn toàn: lớp phủ trên răng bị vi trùng, và sự nuôi dưỡng đóng vai trò quyết định. Ở giai đoạn trầm trọng chất liệu cứng của răng (xem hình 5.4) đã bị phá huỷ. Tuy nhiên vấn đề cho tới nay ít được nghiên cứu hơn mặc dù quan trọng hơn!) lại là các quá trình xảy ra ở các giai đoạn rất sớm! Ở đây, vấn đề mà chúng ta quan tâm là khai sáng các cơ chế này bằng các kỹ thuật hiện đại trên kính hiển vi và các phương pháp phân tích dùng các công cụ đặc biệt.

Ngay từ đầu thế kỷ 19, các nhà khoa học đã quan tâm và nghiên cứu cấu trúc của men răng để tìm hiểu những tính chất quan trọng của loại mô sinh học cứng nhất này. Lúc đầu người ta mới chỉ có thể dùng kính hiển vi ánh sáng đơn giản, nhưng sau đó là kính hiển vi truyền qua (từ năm 1931) và kính hiển vi điện tử quét (từ năm 1942). Nhưng đáng tiếc là tất cả các phương pháp này đều có một nhược điểm rất lớn, đó là chúng duy nhất chỉ có thể ứng dụng vào việc nghiên cứu trên những lát cắt đã được chuẩn bị đặc biệt từ trước hay những lát mài mỏng của những chiếc răng đã nhổ ra rồi, và vì vậy không thích hợp cho việc chẩn đoán trong các phòng khám, chữa răng.

Trong lĩnh vực này, có triển vọng hơn cả là ngành kính hiển vi quét laser đồng tiêu CLSM (*confocal laser scanning microscopy*). Phương pháp này cũng cho phép hiểu biết sâu hơn những vùng phía ngoài của men răng. Phương pháp dùng kính hiển vi rất thông dụng trong nghiên cứu tế bào này cũng đã bước đầu được áp dụng để nghiên cứu các giai đoạn rất sớm của bệnh sâu răng. Chắc chắn rồi đến một ngày nào đó phương

pháp này cũng sẽ chứng tỏ được mình trực tiếp ngay trong các phòng mạch nha khoa, để sớm nhận biết bệnh sâu răng.



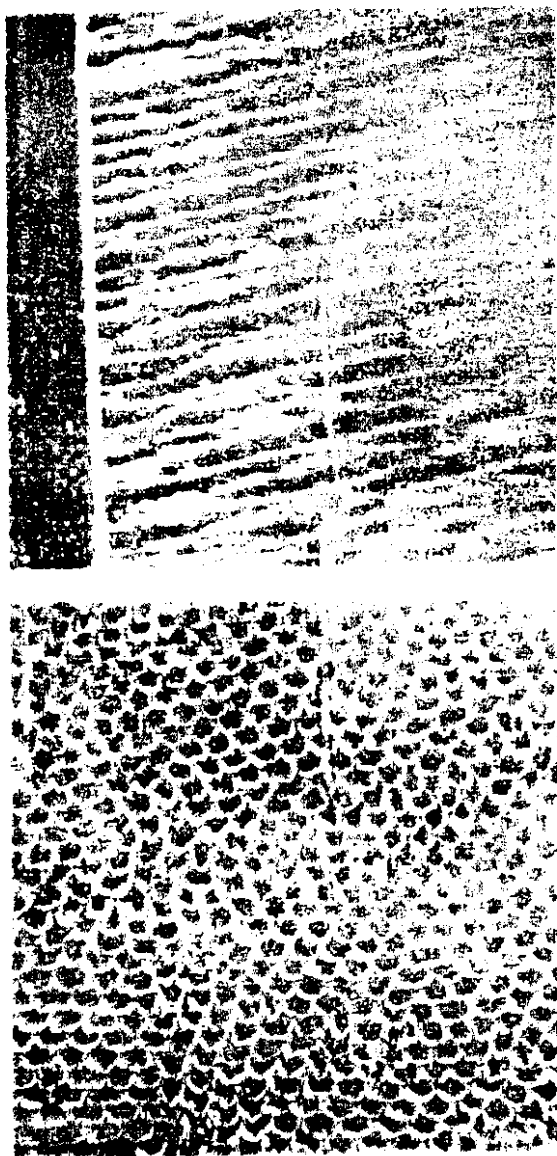
Hình 5.4:

Mỗi chiếc răng gồm một nhân là ngà răng, bao quanh nướu (tuỷ răng), và ở phần vòng răng của mình nó được bao quanh bởi men răng, còn ở chân răng được bao bởi men răng. Men răng là chất liệu cứng nhất trong cơ thể con người và được tạo ra bởi chất khoáng vô cơ (hydroxylapatit) và mô hữu cơ. Vì có chứa nhiều chất liệu hữu cơ hơn nên ngà răng dễ uốn hơn men răng. Nướu răng ở bên trong răng gồm mô kết nối là sợi tinh tế gồm nhiều mạch máu và dây thần kinh.

a. Cơ sở của phương pháp đo

Kính hiển vi quét laser đồng tiêu là một phương pháp xem ảnh mặt cắt lớp (*phép chụp cắt lớp - tomography*). Tia sáng đã được hội tụ của một laser ion argon (488 nm) được dẫn qua hệ quang học của một kính hiển vi ở chế độ phản xạ thông thường, rồi theo từng dòng lên trên bề mặt răng. Ánh sáng xanh của laser cũng có thể xuyên thấu vào những vùng sâu hơn của bề mặt; chẳng hạn như trong hệ mô tả ở đây là tới 100 μm .

Ánh sáng đi vào lớp này phụ thuộc vào mặt phẳng tiêu đã được hiệu chỉnh theo cấu trúc mà chúng ta quan tâm, hoặc nó bị lớp này phản xạ và tán xạ. Ánh sáng phản xạ từ bề mặt lớp men sẽ được lái qua một gương đặc biệt (gương hay lăng kính phân chia chùm tia) để vào một đầu thu, đầu thu này sẽ đo cường độ. Đầu thu được đặt ngay sau một chắn sáng lỗ (*diaphragme*) đồng tiêu có đường kính lỗ rất nhỏ, chỉ vào khoảng một micromét. Chắn sáng lỗ có tác dụng chỉ cho ánh sáng từ mặt phẳng tiêu đi được tới máy đo. Nhờ dùng hệ đo này chúng ta có thể đặt những mặt cắt qua những vùng trực tiếp ngay dưới bề mặt răng. Phối hợp với một bàn vi chỉnh để hội tụ, chúng ta có thể chụp ảnh một loạt các ảnh cắt lớp được điều khiển bằng máy tính, chúng cho phép chồng lên nhau để tạo thành một ảnh (giả) không gian ba chiều. Sau đó từ ảnh (giả) không gian ba chiều này để có thể nhận biết rõ hơn cấu trúc, người ta phải tạo ra một ảnh mà giới chuyên môn gọi là phép biểu diễn màu sắc sai lệch; ở đây ứng với mỗi giá trị cường độ đã đo được sẽ là một màu sắc nhất định.



Hình 5.5:

Trong hình mặt cắt quang học song song với bề mặt răng để nhận thấy ở men răng lành là cấu trúc tổ ong đặc trưng của nó. Trên hình là cấu trúc được chụp ở độ sâu là 30 μm . Những vùng sẫm được chụp trên hình ảnh sai màu này gồm các thanh khối lăng trụ vi tinh thể (microcrystalline) trong suốt đối với ánh sáng laser. Trái lại, không gian giữa các khối lăng trụ vi chứa một thành phần khá lớn chất liệu hữu cơ và những mầm tinh vó cơ nhỏ hơn rất nhiều, nên có màu đỏ tươi đến vàng (trái). Trong hình mặt cắt vuông góc với bề mặt răng có thể nhận thấy rõ các cấu trúc khối lăng trụ theo các dải để tiến tới bề mặt men răng như thế nào (phải).

b. Cấu trúc của men răng lành

Men răng lành trong ảnh cắt lớp quang học được chụp song song với bề mặt răng cho thấy hình mẫu có dạng tổ ong (xem hình 5.5). Bên trong tổ ong gồm những bó mầm tinh hình kim dài khoảng $0,2 \mu\text{m}$ và được kiến tạo từ khoáng chất hydroxylapatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$). Những khoáng thường được gọi là các thanh hình khối lăng trụ này có đường kính dao động xấp xỉ $5 \mu\text{m}$ và không phản xạ ánh sáng laser. Vì vậy trong ảnh màu sắc sai lệch chúng sẽ hiện lên với màu sẫm. Các thanh hình khối lăng trụ được bao quanh bởi mô hữu cơ và các mầm tinh hydroxylapatit nhỏ hơn rất nhiều và được sắp xếp vô trật tự. Trong ảnh màu sắc sai lệch men liên khối lăng trụ (*interprismatic*) này hiện lên với màu đỏ tươi chuyển sang màu vàng.

Cấu trúc men hình khối lăng trụ tiếp tục đi vào những vùng sâu hơn nữa. Trong ảnh mặt cắt lớp chụp thẳng góc so với bề mặt răng ta thấy rõ các cấu trúc hình dải chuyển chạy theo một góc tù so với bề mặt men. Các thanh hình khối lăng trụ vi tinh thể hiện lên với màu sẫm, còn các dải men liên khối lăng trụ lại hiện lên là các dải sáng, chạy song song với nhau. Cấu trúc hình khối lăng trụ của men đã biết từ lâu, ngay kính hiển vi điện tử cũng cho những ảnh tương tự, nhưng ở đây dĩ nhiên là không thể có được nếu không phá huỷ mẫu.

Men răng có các tính chất của hydroxylapatit – cực kỳ cứng, hầu như không hoà tan được và rất khó tẩy xoá – với tính đàn hồi của mô hữu cơ tạo thành một “vật liệu kết nối” lý tưởng. Dù cho chất cơ bản rất cứng nó vẫn đủ mềm dẻo để

truyền tiếp những lực xuất hiện khi nhai, để không vì thế mà làm hỏng răng hay cơ cấu giữ răng.

Tuy nhiên, cấu trúc hình khối lăng trụ không thể chế trách được này chỉ tồn tại ở bề mặt men chùng nào răng còn chưa trôi ra ngoài lợi (những ảnh thu được từ một chiếc răng do phẫu thuật lấy ra ở chính giai đoạn này). Khi ở trong miệng răng phải chịu đựng những điều kiện khá khắc nghiệt: bề mặt bị bào mòn ghê gớm khi nhai; axit lactic do vi khuẩn tạo ra, và các loại axit khác từ đồ ăn uống về mặt hoá học sẽ ăn mòn nó. Nhưng răng cũng không phải hoàn toàn bất lực không được bảo vệ gì trước những mối nguy hiểm như thế. Bởi vì nước miếng là một chất đệm rất có hiệu quả do nó cản trở tác dụng phân huỷ của các loại axit. Thêm nữa luôn có quá trình trao đổi các thành phần khoáng chất của nó với bề mặt răng.

c. Các thí nghiệm mô phỏng

Các quá trình xảy ra trên bề mặt răng như thế đã được bác sỹ nha khoa người Na Uy ở Bệnh viện thực hành nha khoa Oslo mô phỏng. Muốn vậy những người tham gia thí nghiệm của ông, thường là các sinh viên tại bệnh viện thực hành này, đã nhận được những mảnh men nhỏ từ những chiếc răng lành mà chúng phải nhổ ra vì những lý do chỉnh hình hàm. Những mảnh men này sẽ được cố định trong vùng sau hàm răng bằng những má kẹp có thể tháo lắp được. Trong thời gian thí nghiệm, trước khi đánh răng những sinh viên này phải tháo những mảnh men ra. Vậy là sau một thời gian ngắn đã hình thành một lớp cao răng dày. Trong những điều kiện thực tế như thế,

chúng ta rất dễ dàng nghiên cứu tác động của những axit do vi khuẩn sinh ra.

Sau khoảng một tuần thì lần đầu tiên, bác sỹ nha khoa lấy những mảnh men ra khỏi miệng những người làm thí nghiệm của ông. Với chiếc gương nhỏ của mình, vào thời điểm này, một bác sỹ nha khoa chưa thấy được sự thay đổi nào. Thậm chí ngay trên kính hiển vi ở chế độ phản xạ, chúng ta cũng chỉ nhận ra được bề mặt hết sức bình thường của một chiếc răng có vẻ hoàn toàn lành lặn.

d. Những tổn thương sau một tuần do sâu răng

Tuy vậy, một bức tranh hoàn toàn khác sẽ xuất hiện trên kính hiển vi quét laser đồng tiêu: Nếu nhìn sâu vào bên trong răng, chẳng hạn ở độ sâu 30 μm dưới bề mặt men, chúng ta sẽ thấy có sự thay đổi rất lớn so với cấu trúc lý tưởng của men lành (xem hình 5.6). Mặc dầu cách sắp xếp theo hình tổ ong của các khối lăng trụ hoàn toàn vẫn còn thấy rõ, nhưng những vùng sáng của men hình khối lăng trụ không còn rõ nét như trước. Ở một số vùng thậm chí hình mẫu tổ ong có vẻ như hoàn toàn bị gián đoạn.

Trên hình mặt cắt vuông góc với bề mặt men, người ta đã thấy rõ sự mở rộng theo chiều sâu của khuyết tật. Tuy rằng chỉ có 40 đến 50 μm của bề mặt men bị liên đới (dẫu sao lớp men cũng có chiều dày vài milimét), thì ở đây vấn đề đã là một sự tổn thương rất sớm của sự sâu răng. Nó thể hiện ở những lỗ nhỏ có đường kính nhỏ hơn một micrômét trên bề mặt. Xuất phát từ những lỗ hết sức nhỏ như thế đã mở ra cho axit lactic do vi

khuẩn sinh ra, những con đường dọc theo đó có thể lan ra những vùng sâu hơn. Rõ ràng là khi đó nó đi theo những con đường của men liên khối lắng trụ. Cấu trúc rất phân tán của các dải sáng trong hình mặt cắt cho ta một chỉ dẫn quan trọng về điều đó. Và cũng còn có thêm điều này ủng hộ cho thuyết đó: men liên khối lắng trụ, ở trạng thái mà nó đã được cấu tạo, dễ bị axit ăn mòn hoá học hơn là các thanh hình khối lắng trụ.

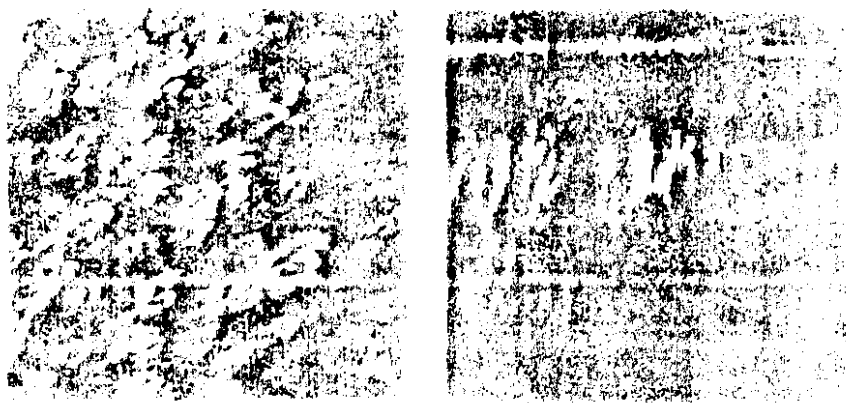


Hình 5.6:

Trong thí nghiệm mô phỏng, cấu trúc bề mặt men răng ngay ở tuần đầu. Ở đây là mặt cắt song song với bề mặt răng ở độ sâu 30 μm . Những vùng sáng của men liên khối lắng trụ ít sắc nét hơn, ở một số chỗ mẫu tổ ong thậm chí bị gãy (trái). Trong mặt cắt vuông góc với bề mặt răng, chúng ta nhận thấy rất rõ sự lan rộng theo chiều sâu của bệnh. Dù mới chỉ có 40 đến 50 μm mắc bệnh, nhưng đã có sự huỷ hoại bởi sâu răng.

e. Sau ba đến bốn tuần

Khi đã bị axit ăn mòn ở mức độ phát triển, chẳng hạn như sau ba đến bốn tuần những người tham gia thí nghiệm đã mang những miếng răng trong miệng, cấu trúc ban đầu của men răng hầu như đã bị phá hủy. Trong hình mặt cắt song song với bề mặt răng, cấu trúc tổ ong vẫn còn tồn tại trong từng vùng riêng rẽ (xem hình 5.7). Những thanh hình khối lăng trụ màu sẫm hầu như không nhận dạng được nữa, cấu trúc còn lại hiện ra ít nhiều như phản xạ sáng mạnh. Trong hình mặt cắt vuông góc với bề mặt răng hoàn toàn không còn nhận thấy được hình mẫu dải của men lành, nhiều nhất chỉ là dấu vết dải phân tán. Những lỗ nhỏ trên bề mặt đã mở rộng một cách rõ rệt.



Hình 5.7:

Sau 3 đến 4 tuần cấu trúc tổ ong ban đầu của men răng gần như bị phá hủy hết. Trong ảnh mặt cắt song song với bề mặt răng chỉ còn thấy lỗ mở ở những nơi lẻ tẻ. Ở các thanh hình khối lăng trụ màu tối hầu như không còn nhận dạng được nữa, cấu trúc còn lại được thấy ít nhiều bởi sự phản xạ sáng (trái). Trong ảnh mặt cắt vuông góc với bề mặt răng, tương tự cũng chỉ còn lại một hình dải mờ gợi nhớ tới những dải vân của men răng lành.

Trong giai đoạn của một tổn thương sớm về sâu răng, chúng ta đã có thể nhờ chụp kính hiển vi tia X (*microradiografy*) – một phương pháp đặc biệt của kỹ thuật tia X – chứng minh được sự giảm sút rõ rệt về khoáng chất trong vùng bề mặt của men. Những kết quả đo này có thể dùng để nhận dạng trong hình mặt cắt đồng tiêu những vùng do sự cất giảm khoáng chất đã trở nên trong suốt đối với ánh sáng laser và vì vậy cũng hiện lên sẫm màu như các thanh hình khối lăng trụ.

Dẫu rằng trong các hình mặt cắt quang học đã thấy được những thay đổi quan trọng đối với bác sỹ nha khoa trong phòng mạch, răng vẫn còn tiếp tục thể hiện là lành. Trên gương, thật ra chỉ nhận ra sâu răng mãi tới khi sự phá huỷ dưới bề mặt răng đã ở giai đoạn phát triển.

f. Phòng bệnh sâu răng

Không phải bất cứ một sự thay đổi nhỏ mang tính sâu răng nào cũng nhất thiết dẫn tới cái lỗ đáng sợ trong răng chúng ta. Điều này cũng đã được các kết quả nghiên cứu gần đây cho thấy, và chúng có một ý nghĩa rất lớn cho việc phòng bệnh sâu răng. Những tổn thương từ rất sớm bên dưới bề mặt men răng nguyên vẹn, mà chúng ta không thể thấy được, có thể phát triển theo ba hướng sau:

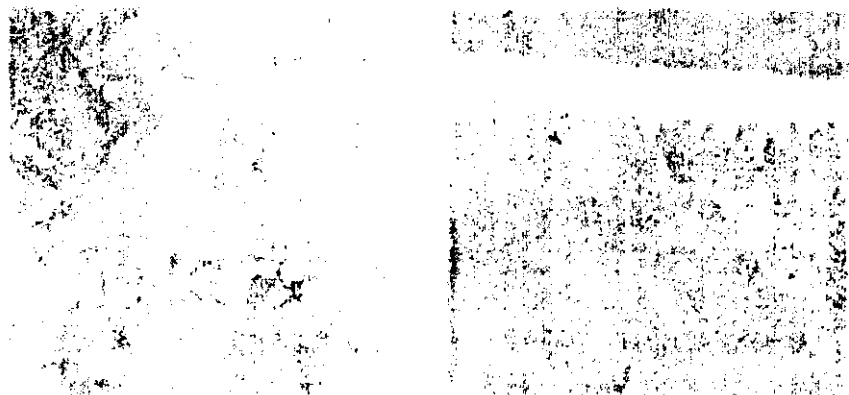
Đầu tiên là các tổn thương tiếp tục phát triển và lan rộng thành sâu răng mà chúng ta có thể thấy rõ trên bề mặt men răng.

Thứ hai là sự hình thành các tổn thương có thể dừng lại, bệnh sâu răng tạm dừng.

Thứ ba là những tổn thương này phần nào lành trở lại được. Thật sự là ở giai đoạn sớm như thế của bệnh sâu răng, bản thân răng có những khả năng tự lành lại, điều mà chúng có thể được hỗ trợ và thúc đẩy bằng những ảnh hưởng nhất định bởi ngoại cảnh.

Phương pháp kính hiển vi quét laser đồng tiêu đã góp phần đáng kể cho nhận thức về vấn đề hết sức quan trọng này. Trong thử nghiệm được thực hiện ở Trung tâm Nha khoa Oslo, gaard đã đề nghị một trong số những người tham gia thí nghiệm của ông, hàng ngày súc miệng một lần với dung dịch nước có chứa florua. Qua xử lý bằng florua như thế, các miếng răng đã thay đổi rõ rệt. Dù rằng trong hình mặt cắt quang học song song với mặt phẳng răng, chúng ta vẫn còn thấy những tổn thương rất sớm của bệnh sâu răng (xem hình 5.8), nhưng thêm vào đó, đã hình thành một kết tủa có hình đám mây và phản xạ hết sức phân tán. Kết tủa này thể hiện ít nhiều rõ ở tất cả những người tham gia thí nghiệm ở nhóm có súc miệng với dung dịch nước có chứa florua – khoảng trên hai chục người. Dẫu rằng hiện nay chưa có khả năng phân tích hoá học những kết tủa này – thật vậy, những thay đổi này được giới hạn ở những vùng nhỏ tới mức chỉ có nhờ kính hiển vi mới phát hiện được, và những vùng như vậy sẽ chỉ cho phép những phương pháp phân tích đặc biệt – tất nhiên rất tốn kém – tiếp cận, nhưng dẫu sao chúng vẫn cho thấy được rằng florua có tác dụng làm ngưng bệnh sâu răng (*cariostatic*). Người ta cũng nhận

thấy rằng, sau khi đã hình thành kết tủa thì những tổn thương của bệnh sâu răng không còn lan rộng nữa.



Hình 5.8:

Nếu điều trị bằng dung dịch nước có chứa florua, cấu trúc của men răng sẽ thay đổi. Trong các ảnh mặt cắt quang học song song (trái) và vuông góc (phải) với bề mặt răng, tuy vẫn tiếp tục thấy những khiếm khuyết sớm của bệnh sâu răng, nhưng thêm vào đó cũng có thấy một kết tủa có dạng mây, phản xạ tỏa lan. Sau khi nó được hình thành, những khiếm khuyết của bệnh sâu răng không lan rộng ra nữa. Điều đó minh chứng tác dụng tốt của florua là làm cho bệnh sâu răng bị dừng lại.

g. Tổng kết

Phương pháp kính hiển vi quét laser đồng tiêu đã cung cấp cho chúng ta những nhận thức hết sức quan trọng về giai đoạn đầu của bệnh sâu răng. Ở đây những thay đổi đầu tiên xuất phát từ các tổn thương siêu nhỏ mà chúng sẽ phát triển dưới bề mặt men răng nguyên vẹn trên phương diện quang học. Không nhất thiết là từ mỗi tổn thương như thế, sẽ

dẫn tới sự hình thành một lỗ sâu răng. Bởi vậy từ nay về sau có lẽ phải định nghĩa lại khái niệm về tình trạng sức khỏe của chất liệu cứng của răng. Những thử nghiệm đã được thực hiện cho phép phỏng đoán rằng: một chiếc răng lành sẽ luôn ở trạng thái cân bằng động với nước bọt và các thành phần của nó. Vị trí của trạng thái cân bằng này được xác định bởi rất nhiều yếu tố và theo một cơ chế hết sức phức tạp, sẽ quyết định cho điều là: một khả năng đe dọa luôn luôn tồn tại tiềm tàng trong môi trường miệng sẽ thực sự đi tới những chỗ sâu răng thấy được trên bề mặt răng. Ở đây chắc chắn ngoài những thói quen ẩm thực và vệ sinh răng miệng - rõ ràng còn có cả sự đóng góp quan trọng của chất florua.

Những quá trình sớm về mặt bệnh lý học của bệnh sâu răng không thể nhận biết được bằng các kỹ thuật truyền thống của chẩn đoán nha khoa, chẳng hạn như gương, đầu dò hay các ảnh chụp tia X đặc biệt. Ở đây phương pháp kính hiển vi quét laser đồng tiêu được xem là phương pháp thích hợp để phát hiện sớm bệnh. Qua đó các nha sĩ sẽ nhận được thông tin từ rất sớm về một hiểm họa sâu răng đang tồn tại và nhờ đó có thể tư vấn tốt hơn cho người bệnh của mình, và xúc tiến nhanh, sớm hơn các biện pháp phòng bệnh. Thêm vào đó, cũng có thể chứng minh được những tổn thương về bệnh sâu răng đang còn tiềm ẩn (tạm nghi). Qua đó bác sỹ nha khoa dễ dàng đi tới quyết định cụ thể.

Nhưng để có được ứng dụng một cách phổ biến phương pháp kính hiển vi quét laser đồng tiêu vào thực tế các phòng mạch nha khoa đang đòi hỏi các chi tiết cấu thành kính hiển vi

phải được mini hoá thành một công cụ cầm tay thông dụng của nha sỹ. Những tiến bộ vượt bậc trong lĩnh vực vi kỹ thuật hoàn toàn cho phép hy vọng sắp tới sẽ có những giải pháp kỹ thuật tương ứng cho vấn đề này. Nhưng chắc chắn các nha sỹ còn phải chờ vài năm nữa mới có được trong tay những thành quả hiện đại này.

6.

Vi kỹ thuật laser trong công nghệ sinh học

Trong các tiểu thuyết khoa học viễn tưởng và nhất là trong các phim khoa học viễn tưởng (Science-fiction Hoolywood), chẳng hạn như bộ phim nổi tiếng và nay đã trở nên kinh điển cho loại phim này với con tàu vũ trụ "Enterprise", người ta thường mô tả việc dùng bức xạ để vận chuyển vật chất, hoặc dùng ánh sáng laser để phá huỷ các mục tiêu ở rất xa (nay phần nào đã trở thành hiện thực). Những màn diễn ở các tác phẩm này đều hoàn toàn xuất phát từ trí tưởng tượng của tác giả, và

xảy ra ở một tương lai xa. Bởi vậy phải thấy rằng, gần như không thể tin được khi ngày nay, các công nghệ này dù đang còn ở dạng sơ khai vẫn làm cho chúng ta tin rằng chúng sẽ trở thành hiện thực. Và chúng rất giống với những gì mà văn học những năm 40 của thế kỷ qua đã tưởng tượng ra, theo đó các vật sẽ được chuyển mang đi xa nhờ các tia sáng.

Trong tương lai, khi các nhà sử học muốn nghiên cứu lịch sử của các kỹ thuật bằng tia sáng này, họ sẽ có vô vàn tài liệu trong phần tư cuối thế kỷ 20 vừa qua. Giải Nobel vật lý năm 1997 đã được dành cho các nhà vật lý Steven Chu ở Trường Đại học Tổng hợp Stanford (California), Claude Cohen-Tannoudij, École Normale Supérieure (Trường Đại học Tổng hợp Paris) và William D. Phillips, National Institute of Standards and Technology (Viện Tiêu chuẩn và Công nghệ Quốc gia Mỹ ở Maryland) bởi các công trình cơ sở về vận chuyển nguyên tử và phân tử bằng ánh sáng. Cũng trong năm đó, nhóm các nhà khoa học do Anton Zeiliger chỉ đạo ở Innsbruck (Áo) đã công bố công trình của họ về một dạng ban đầu của sự vận chuyển phi vật chất các tính chất của một hạt cơ bản trong không gian.

Các ý kiến về giá trị ứng dụng thực tế của kỹ thuật laser được dùng làm cơ sở cho các vấn đề trên đang còn được tranh luận. Một số nhà chuyên môn đơn giản coi các kỹ thuật này như là *techno - junk* (kỹ thuật tạp nham). Trái lại, các nhà khoa học khác lại cho rằng có thể từ đây sẽ phát triển những phương thức làm việc hoàn toàn mới, đặc biệt trong lĩnh vực công nghệ sinh học phân tử và tế bào. Lĩnh vực khoa học này đặc biệt phù hợp để làm hiện trường thử nghiệm cho kỹ thuật mới nói trên.

vì ở đây đối tượng hết sức nhỏ bé: các tế bào hay các phân tử sinh học chỉ có thể quan sát dưới kính hiển vi và dưới kính hiển vi, ánh sáng cần thiết để vận chuyển hay xử lý các vật thể, cũng cho phép hội tụ lại. Thậm chí có thể làm việc ngay cả bên trong vật thể khép kín, chẳng hạn như xuyên qua thành tế bào.

6.1. CƠ SỞ VẬT LÝ

Ánh sáng là một trường điện từ tần số cao không giống như các trường điện từ khác, nó có thể định vị trong không gian và thời gian. Theo không gian thì trong đó, người ta hội tụ tia sáng trong kính hiển vi và theo thời gian khi người ta sử dụng tần số laser phù hợp. Qua đó, ngay trong phòng thí nghiệm đã cho phép thu được các kết quả mà lẽ ra phải nhờ tới các thiết bị lớn ở các xí nghiệp mới đạt được.

Như vậy ánh sáng tạo nên một lực (áp lực ánh sáng) khi nó tác động lên một vật thể. Trong đời sống hàng ngày, hiệu ứng này quá nhỏ do vậy ít làm chúng ta quan tâm. Trong nắng một chiếc xe ô tô du lịch nặng hơn chưa tới một miligam so với khi nó ở trong bóng râm. Nhưng dẫu sao thì đuôi của một sao chổi lại bị đẩy ra phía sau bởi áp lực ánh sáng mặt trời, khi nó tiến đến gần mặt trời.

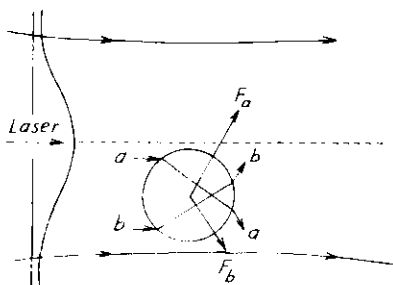
Lực mà một tia laser tạo nên với một công suất đã biết (W) có thể xác định theo công thức khá đơn giản:

$$F = \gamma \times W/c$$

trong đó c là tốc độ ánh sáng, $3 \cdot 10^{10}$ cm/s và γ là hệ số vật liệu, đối với vật thể màu đen, $\gamma = 1$. Vậy là một tia laser với công suất 1 W cũng cho một lực bằng lực tác động lên một khối lượng $5 \cdot 10^{-10}$ kg nằm trên bề mặt Trái đất bởi sức hút trái đất. Nếu toàn bộ ánh sáng của tia laser này tập trung vào một tế bào sinh học có đường kính khoảng 10 μm , thì một lực lớn bằng 5 lần áp lực khí quyển sẽ tác động lên tế bào. Và vì tế bào hết sức nhẹ, nên tế bào bị dịch chuyển một đoạn ngắn trong thời gian hết sức nhanh – tác động lên tế bào là một gia tốc lớn gấp 700.000 lần gia tốc trái đất. Nếu thay thế một tia laser liên tục bằng một laser xung với công suất đỉnh khoảng 100 kW, ta có thể bắn phá dễ dàng một vật thể siêu nhỏ (vi vật thể).

Cách đây vài năm, hiệu ứng áp lực ánh sáng đã kích thích một đề xuất đầy táo bạo: khi có ý kiến tạo nên những vệ tinh laser bay quanh Trái đất, có ai đó đã cho rằng, thay vì hướng về Trái đất, chúng ta hãy hướng tia laser này vào vũ trụ, hội tụ qua thấu kính Fresnel và hướng tới cánh buồm của phi thuyền vũ trụ – mà nó mang theo một máy quay video. Các tính toán cho thấy, một phi thuyền như vậy có thể gia tốc tới tốc độ bằng một phần ba tốc độ ánh sáng, sao cho trong thời gian một thế hệ, có thể thực hiện được những ảnh của các mặt trời gần hệ Mặt trời và những hành tinh ngẫu nhiên nằm trong đó. Để vận chuyển một vật bay nặng 10 kg, tất nhiên phải đòi hỏi một laser 650 GW, do đó laser phải có công suất lớn hơn toàn bộ công suất của các nhà máy điện hạt nhân có trên Trái đất hợp lại, và điều ấy có nghĩa là phải chờ đợi một thời gian khá dài nữa mới có được những chuyến bay trong không gian giữa các thiên hà.

Nhưng trong tiểu vũ trụ của công nghệ sinh học, tất cả những điều tương tự trái lại lại rất là thực tế. Ở đây chẳng những có thể làm dịch chuyển vật thể nhờ áp lực ánh sáng, mà còn có thể đẩy vật thể đi. Vậy là các lực gradient còn cho phép nắm bắt một vật thể chỉ có thể nhìn dưới kính hiển vi như ta gấp một vật nhỏ bé nào đó bằng kim gấp. Ở bước sóng của một loại laser nhất định, chẳng hạn như ở laser Nd-YAG hoạt động ở vùng hồng ngoại, một tế bào sinh học phản ứng như một thấu kính, ở đó ánh sáng bị khúc xạ (xem hình 6.1). Chính vì thế, khi hội tụ rất mạnh, với độ mở lớn hơn 1, cho thấy tế bào bị kéo về hướng nguồn sáng khi nó nằm vào vùng kề cạnh tiêu điểm của tia laser được hội tụ. Nguyên lý chuyển động này tương tự thuyền buồm đi ngược chiều gió.



Hình 6.1:

Sự chuyển động của vật siêu nhỏ trong ánh sáng laser theo hướng quang trục: Sự thay đổi hướng của ánh sáng cũng có nghĩa là một thay đổi xung lực tác động lên một tế bào sinh học theo định luật lực bằng phản lực. Trong tia thành phần a, ánh sáng nhận xung lực P_a xuất phát từ chùm tia - như vậy tế bào cũng phải nhận được một xung lực hướng tâm. Tương tự, tế bào nhận xung lực ly tâm trong tia thành phần b. Nếu giả sử tia sáng có hiệu suất chiếu sáng đồng nhất thì các lực F_a và F_b sẽ bằng nhau. Hợp lực sẽ song song với quang trục và tế bào dễ dàng được chuyển dịch sang phải - đó là cách hình dung tác động của áp lực ánh sáng ở dạng đơn giản nhất của nó. Nhưng vì tia ở gần quang trục mạnh hơn so với tia ở xa, nên tia thành phần a mạnh hơn tia thành phần b. Xuất hiện một hợp lực tác động lệch vào giữa chùm tia.

Cũng thấy rằng, một tế bào sinh học bị kéo vào điểm hội tụ của tia laser được hội tụ trong những điều kiện nhất định. Khi làm chuyển động tiêu điểm, chúng ta có thể bắt giữ vật thể siêu nhỏ ở trong đó và di chuyển nó mà không cần động chạm tới nó.

Và nếu thay vì dùng một laser hồng ngoại hoạt động liên tục bằng một laser tử ngoại xung với công suất đỉnh cao, cũng có thể tạo nên nhiệt độ cục bộ hết sức cao có thể sử dụng để gia công vật liệu hết sức chính xác. Nhân đây, hãy xem nước là mô hình cho mô sinh học để làm sáng tỏ tác động đó: Nếu một xung laser chỉ dài vài nanôgiây tác động lên nước, thì toàn bộ năng lượng của nó được truyền vào nước, vì khoảng thời gian để toả nhiệt bình thường phải kéo dài gấp ngàn lần.

Với một kính hiển vi tốt, chúng ta có thể hội tụ ánh sáng vào một thể tích có chiều dài cạnh khoảng $0,5 \mu\text{m}$. Khối lượng nước tương đương có trọng lượng khoảng gần một phần tám picogram (pg). Chúng ta biết rằng: 1 calo là lượng nhiệt để làm nóng 1 gam nước lên một độ. Vậy 1 microcalo sẽ làm nóng 1 gam nước lên 1 micro độ. Nếu chúng ta thành công trong việc làm cho chỉ một phần trăm của microcalo này được hấp thụ vào $1/8$ picogram nước, thì sự đốt nóng sẽ đạt được hơn 100.000°C ! Và kết quả còn bất ngờ hơn nếu chúng ta so sánh với 6.000°C là nhiệt độ bề mặt của Mặt trời. Ngay cả những laser tương đối nhỏ và ngày nay giá đã rất hạ, cũng đã có thể cung cấp những xung với năng lượng $1 \mu\text{cal}$ – khoảng $1 \mu\text{J}$ (microjoule). Khi một

xung laser như vậy tác động trực tiếp lên vật chất sống ngay lập tức nó sẽ phá huỷ vật chất sống này.

Chúng ta có thể giả thiết rằng, một sóng đốt nóng được tạo ra như vậy trong vật chất sống sẽ truyền đi với tốc độ âm thanh, khoảng gần 1 km trên giây hay 1 μm trên nanogiây, và cùng với quá trình này là sự toả nhiệt sẽ hạ nhiệt độ về nhiệt độ môi trường sau 20 nanogiây. Các phân tử sinh học ở kề cạnh xung laser cũng không bị tổn thương. Nhưng điều này chỉ đúng đối với laser được hội tụ và hạn chế nhiều xạ tới giới hạn lý thuyết có thể (khoảng một nửa bước sóng ánh sáng đã được sử dụng). Những laser như vậy cũng còn gọi là chùm tia micro (vi tia). Đối với những laser được hội tụ yếu hơn, chẳng hạn với thấu kính đơn giản, thì quá trình làm nguội cục bộ kéo dài quá lâu, và chúng sẽ làm tổn thương môi trường xung quanh.

Những suy nghĩ đơn giản trình bày trên đây rất có thể còn chưa đủ tính thuyết phục, vì khi đốt nóng tột bậc thì chính bản thân khái niệm nhiệt độ cũng không thể định nghĩa một cách đơn giản nữa; ngoài ra, một trạng thái vật chất mới - plasma sẽ xuất hiện. Nhưng chỉ cần một ước lượng chuyên nghiệp mà ở đây chỉ có thể nêu kết quả mà không biện luận cụ thể, cũng đã dẫn tới một kết quả tương tự, đó là 149.000°C . Ở đây, vật chất được coi như chất hấp thụ đen (đối lập với bức xạ đen) và ứng dụng định luật Stefan-Boltzmann là định luật tạo mối liên hệ giữa cường độ bức xạ và nhiệt độ (cường độ tỷ lệ theo bậc 4 với nhiệt độ...).

Tóm lại, một laser được hội tụ, hạn chế nhiễu xạ, với độ dài xung trong phạm vi nanogiây hay dưới nanogiây và có công suất đỉnh cao có thể loại bỏ rất hiệu quả vật chất sinh học khi bị ánh sáng đó tác động trực tiếp, mà chỉ gây ít tổn thương thứ cấp cho môi trường, và vì thế có thể sử dụng tia laser để xử lý mẫu một cách chính xác.

6.2. VI TIA LASER VÀ KÌM GẤP QUANG HỌC

Những máy móc tạo nên những hiệu ứng đầy ấn tượng đã được mô tả ở trên, lại là những thiết bị đơn giản, gọn nhẹ đến mức đáng ngạc nhiên. Bộ phận chủ yếu thường là một kính hiển vi huỳnh quang ngược. Từ một laser hồng ngoại liên tục và một laser tử ngoại xung, cho phép tạo nên một tổ hợp vi tia laser và kim gấp quang học (xem hình 6.2). Khi hội tụ laser nítơ (bước sóng 337 nm) qua vật kính của kính hiển vi, trong suốt đối với ánh sáng tử ngoại, ở tiêu điểm chúng ta sẽ đạt được mật độ công suất là 10^{12} W/cm², đủ để vi xử lý vật chất sinh học với độ chính xác trong miền dưới 1 μ m. Cũng nối vào hệ là một laser neodym-YAG được bơm bởi diốt và hoạt động trong dải hồng ngoại gần (ở 1064 nm) có công suất liên tục 2 W, thiết bị này có chức năng như một kim gấp quang học.

Tóm lại, thiết bị này là công cụ thông dụng trong sinh học, đó là một kính hiển vi được gắn thêm vào hai laser. Nhưng chỉ qua đó nó đã tạo nên những kỹ thuật hoàn toàn mới trong nghiên cứu sinh học và y học. Các ví dụ từ sinh học phân tử, sinh học tế bào và nghiên cứu ung thư, sẽ làm sáng tỏ những gì chúng ta vừa nêu.



Hình 6. 2:

Vi phẫu thuật một nhiễm sắc thể người: nhiễm sắc thể được cắt theo chiều dọc bằng vi tia laser để tách các sợi nhiễm sắc khỏi nhau. Cũng có thể cắt ngang nhiễm sắc thể.

6.3. ỨNG DỤNG KỸ THUẬT LASER TRONG NGHIÊN CỨU SINH HỌC PHÂN TỬ

Một trong những phân tử quan trọng nhất của công nghệ sinh học là ADN. Thông tin di truyền của con người được ghi nhận trong hơn 3 tỷ đôi base của ADN chứa trong nhân tế bào. Mặc dù khoảng cách giữa base này với base kia và giữa các chữ cái của ký tự di truyền chỉ là 3 Å ($1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$), thì 3 tỷ đôi base này cộng lại với nhau, vẫn cho chiều dài tới 90 cm được bó

gọn trong nhân chỉ cỡ vài micromet. Trình bày cách khác cho thấy, chiều dài tổng cộng ADN của 10^{13} tỷ tế bào cơ thể người bằng 16 giờ ánh sáng!

Người ta cho rằng giữa người này với người kia, độ dài các phân tử ADN đều có sự khác nhau, ngay cả giữa các tế bào của cùng một mô, nó cũng rất đa dạng và mang tính cá thể. Công việc đọc trình tự bộ gen người hiện nay dần đã được tiến hành rất khẩn trương và đầy trách nhiệm, vẫn hình như mới chỉ là bước đầu tiên chúng ta đi tới hiểu biết về ADN. Chắc chắn sẽ cần phải phân tích các phân tử ADN riêng biệt. Và laser cũng lại chính là thiết bị có thể góp một phần quan trọng cho vấn đề này.

Phân tử ADN dài gần một mét, được gói vào những pha nhất định của chu trình phân chia tế bào, tồn tại trong nhân tế bào như một nhiễm sắc thể có thể quan sát dưới kính hiển vi. Ở trạng thái này, người ta có thể cắt những đoạn ADN đặc hiệu khỏi toàn bộ phân tử ADN bằng phương pháp vi cắt laser nhiễm sắc thể. Hình 6.3 cho thấy người ta có thể thu được ADN từ các phía của một nhiễm sắc thể như thế nào bằng kỹ thuật vi cắt theo dọc trục của nhiễm sắc thể. Tuy vậy, phần lớn được cắt theo chiều ngang so với trục này bởi vì có thể quy các lỗi ADN ở những đoạn cắt ngang như vậy về những bệnh nhất định.

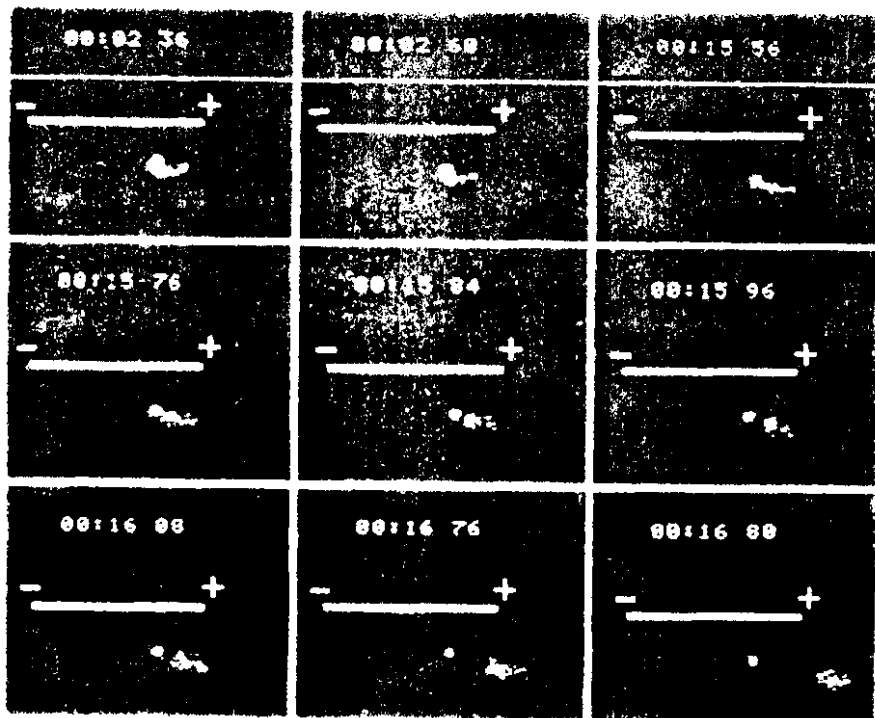
Việc đầu tiên là phải làm sao có thể quan sát một phân tử ADN riêng lẻ. Một kính hiển vi điện tử, một kính hiển vi đường hầm - quét hay một kính hiển vi lực nguyên tử đều có thể thực hiện được nhiệm vụ này. Thậm chí một kính hiển vi quang học thông thường cũng sẽ đặc biệt thích ứng cho công việc này, khi nhờ nó, người ta không chỉ muốn quan sát từng phân tử riêng lẻ, mà thêm vào đó, còn nghiên cứu cả các phản ứng sinh hóa của từng phân tử riêng biệt.

Với đường kính 2 nm, một phân tử ADN nhỏ hơn rất nhiều lần bước sóng ánh sáng khả kiến (bước sóng từ 400 đến 800 nm), vì thế không thể nhận biết chi tiết cấu trúc dưới kính hiển vi quang học. Nhưng nếu chúng ta đánh dấu huỳnh quang phân tử ADN và chấp nhận ảnh phân tử bị mờ và dày hơn so với thực tế, chúng ta có thể hài lòng quan sát nó dưới kính hiển vi quang học: chúng ta có thể phân huỷ phân tử ADN bằng các phân tử enzym hay cắt nó bằng vi tia laser.

Để làm việc này, trước hết phân tử ADN phải được gắn vào hạt tổng hợp hữu cơ có đường kính 1 μm để sau đó có thể bắt giữ bằng kim gắp quang học chuyển vào thị trường kính hiển vi và cố định ở đó. Nếu lúc này có một dòng chất lỏng chảy qua phân tử ADN, nó sẽ duỗi ra, nhưng với một trường điện từ, người ta cũng có thể làm cho phân tử duỗi ra. Chỉ riêng với hai kỹ thuật này cho tới nay đã cho phép chúng ta thực hiện những khảo cứu hầu như không thể làm nổi về lý sinh các phân tử ADN.

Bây giờ nếu chúng ta có thể cho các phân tử enzym phân huỷ (ngoại phân huỷ nucleic - *exonuclease*) hay cắt (phân huỷ nucleic hạn chế - *restriction nuclease*) phân tử ADN vào một dung dịch chứa ADN trên lam kính, dưới kính hiển vi chúng ta có thể trực tiếp quan sát phản ứng này. Tất nhiên là người tiến hành thí nghiệm phải bảo đảm sự giám sát thời gian đối với quá trình, sau khi đã đạt được sự giám sát không gian nhờ kim gắp quang học. Điều này có thể thực hiện được, nếu trước đó người ta bổ sung magiê ở dạng không hoạt hoá - được xem như hợp chất lỏng - một chất quan trọng cần cho phản ứng. Chỉ khi chiếu ánh sáng tử ngoại bổ sung với vi tia laser hay với đèn tử ngoại thông thường thì magiê mới được giải phóng khỏi liên kết

kim hãm; chuyển sang trạng thái hoạt hoá và chỉ khi đó phản ứng mới bắt đầu. Các ảnh chụp trên kính hiển vi ở hình 6.3 cho thấy các bước của quá trình phản ứng.



Hình 6.3:

Trước hết, một phân tử ADN bám vào hạt tròn được chuyển vào thị trường của kính hiển vi bằng kim gấp quang học rồi được cố định ở đây. Sau đó enzym được hoạt hoá nhờ chiếu tia tử ngoại để cắt phân tử. Tiếp đến phân tử bị cắt ra như vậy sẽ di chuyển sang cực dương của điện trường đã được tạo ra từ trước. Trong hệ thiết bị nghiên cứu dưới kính hiển vi ánh sáng thường này, chúng ta nhận thấy rằng, sau khi cắt bằng enzym thì độ nhòe do chuyển động của phân tử sẽ tăng lên do sự tăng của chuyển động nhiệt

6.4. ỨNG DỤNG KỸ THUẬT LASER TRONG NGHIÊN CỨU SINH HỌC TẾ BÀO

Trong công nghệ sinh học tế bào, vi tia laser và kim gắp quang học được ứng dụng rộng rãi bởi nó có nhiều ưu việt so với những dụng cụ siêu nhỏ hoạt động theo nguyên lý cơ học. Tất nhiên vi dụng cụ laser là công cụ không gì sánh được khi ta muốn đi sâu nghiên cứu vào trong tế bào mà không phải mở tế bào ra, nghĩa là không làm tổn thương tế bào. Vì luôn phải tìm bước sóng laser phù hợp đối với một tế bào sinh học ít nhiều trong suốt nên ta có thể điều chỉnh tia laser chiếu vào tế bào. Nếu thay đổi điểm hội tụ trong tế bào ta có thể làm di chuyển siêu cấu trúc tế bào. Cũng có thể kết hợp khả năng này với vi tia chiếu vào trong tế bào để cắt hay khoan tế bào, và nhờ tia đó mở ra một lĩnh vực ứng dụng mới cho tới nay vẫn khó hình dung nổi đối với vi phẫu thuật tế bào.

Tảo *Chara* sinh trưởng hướng địa, nghĩa là hướng sinh trưởng của nó phụ thuộc vào trọng lực. Thực vật thủy sinh có thể miễn cảm với trọng lực, vì bên trong tế bào của nó, các tinh thể bari sunfat được bao bọc bởi lớp màng sẽ rơi vào các cấu trúc miễn cảm với tiếp xúc. Với kỹ thuật laser mới, chúng ta có thể đơn giản triệt tiêu sự miễn cảm với trọng lực bằng cách đưa kim gắp quang học vào sâu tới thể giả rễ và dịch chuyển các hạt tinh thể rời xa vị trí ban đầu của chúng. Sau đấy có thể xảy ra hai tình huống: các thể giả rễ (rễ giả) không còn phát triển theo hướng trọng lực nữa, và như vậy cũng mất luôn khả năng định hướng bình thường. Chính là chúng ta đang kỳ vọng điều đó.

Nhưng đồng thời lại xảy ra trường hợp là tốc độ sinh trưởng hầu như bị giảm đi mười lần. Những thí nghiệm như vậy giúp ta hiểu biết rõ ràng hơn về sự mất cảm trọng trường cũng như những vấn đề thích nghi của sinh vật vào trọng trường. Ví dụ này muốn khẳng định kết quả thực tế của vấn đề đối với sản xuất thực phẩm trong điều kiện trọng lực nhỏ trong không gian, chẳng hạn trong các phi thuyền không gian để đi tới các hành tinh khác. Ngược lại, có thể sử dụng kính gấp quang học trong điều kiện vi trọng trường để giải quyết vấn đề này bằng cách đánh lừa trọng lực cho tảo.

6.5. ỨNG DỤNG KỸ THUẬT LASER TRONG NGHIÊN CỨU UNG THƯ

Trong chẩn đoán bệnh, đặc biệt trong chẩn đoán ung thư, thường các mẫu mô được sinh thiết để phân tích tế bào. Tất nhiên để phân tích một cách thật chính xác, điều mong muốn là có thể tách từng tế bào ra khỏi mẫu mô ung thư, sau đấy người ta mới có thể xác định tế bào sinh trưởng bất thường rồi xét nghiệm các phản ứng của chúng.

Vi kỹ thuật cơ khí sẽ quá thô thiển đối với vấn đề này. Ở Mỹ, người ta đã phát minh ra phương pháp laser được gọi là *laser capture microdissection* - vi phẫu thuật sinh thiết laser, ở đó người ta đặt mô lên một phiến phim chất dẻo và lấy ra từng tế bào - chủ yếu là do làm nóng chảy tại chỗ lớp phim này. Một laser tử ngoại xung với công suất đỉnh vài chục kilôoát được

hướng vào tế bào cần tách. Áp lực ánh sáng đẩy tế bào lên cao tới mức nó được đặt vào ống vi phản ứng đặt phía trên mặt phẳng tạo ảnh của kính hiển vi. Với phương pháp được gọi là *laser pressure catapulting* - *phóng bằng áp lực laser* này, một số lượng lớn tế bào riêng rẽ được chế bản trong một thời gian ngắn. Vì áp lực tác động đó chỉ kéo dài vài nanogiây nên tế bào ít bị tổn thương hơn so với phương pháp đốt nóng từ miligiây tới hàng giây, nên đây là phương pháp bảo đảm an toàn đặc biệt trong khi làm chế bản tế bào riêng lẻ từ các mô sinh thiết.

7.

Gia công vật liệu

Có thể khẳng định rằng rồi đây laser sẽ thay thế dần các phương pháp gia công vật liệu kinh điển. Một mặt vì các hệ laser có giá trị kinh tế cao hơn (tỷ lệ đầu ra - đầu vào cao hơn) và đáng tin cậy hơn; mặt khác vì đã có rất nhiều bước phát triển mới đầy triển vọng. Hiện đã có những laser với bước sóng ngắn hơn và chúng cho phép gia công với độ chính xác cao hơn

A. Gia công vật liệu bằng ánh sáng laser

Gia công vật liệu bằng ánh sáng không phải là công nghệ mới. Ai cũng biết khi ánh sáng mặt trời được hội tụ lại nhờ một thấu kính nó đủ sức đốt điểm để vẽ trên bề mặt gỗ hay đốt cháy giấy và những vật liệu dễ cháy tương tự khác. Chuyện kể rằng,

Archimedes người Sirakus (năm 285 đến 212 trước công nguyên) đã từng dùng gương parabol để hội tụ ánh sáng mặt trời và nhờ ánh sáng hội tụ này chiếu vào tàu chiến địch làm nó bốc cháy. Nhưng cũng có chuyện đã được minh chứng là chuyện người sáng lập ra ngành hoá học hiện đại là nhà hoá học Pháp Antoine de Lavoisier (1743-1794) ông đã từng dùng kính viễn vọng hết sức tinh vi có đường kính lớn để thu ánh sáng mặt trời và thậm chí đã đạt tới nhiệt độ cháy của kim cương. Thời nay chúng ta hàn thiếc bằng đèn hồ quang, và thời gian gần đây lại có kiểu đèn phóng điện trong chất khí với hiệu suất ánh sáng tử ngoại rất cao chuyên để đóng rắn nhựa tổng hợp và tẩy màu cho giấy. Điều đó chứng tỏ rằng rất có thể gia công vật liệu bằng ánh sáng. Tuy nhiên việc gia công vật liệu bằng nguồn nhiệt (ánh sáng mặt trời) hoặc chuẩn nhiệt - *quasi thermic* (đèn phóng điện trong chất khí) vẫn có mặt hạn chế. Định lý thứ hai của nhiệt động lực học buộc nhiệt độ của vật được gia công bao giờ cũng phải thấp hơn nhiệt độ của nguồn sáng. Laser không có mặt hạn chế đó, bởi vì nó không phải là một nguồn sáng nhiệt học. Không một nhiệt độ nào có thể quy về nó, bởi vì hệ thống này không ở trạng thái cân bằng nhiệt. Khi chúng ta chiếu ánh sáng laser vào vật cần được gia công thì công suất ánh sáng laser mà chúng ta cung cấp cho vật được chuyển thành nhiệt. Nhiệt lượng này chủ yếu được dẫn đi theo đường truyền nhiệt. Vậy ở những nhiệt độ cao, phản xạ sẽ giữ vai trò chủ đạo; còn ở trường hợp giới hạn thì toàn bộ công suất đã được cấp vào, sẽ được thải ra dưới dạng bức xạ nhiệt. Nhiệt độ đạt đến lúc đó chỉ phụ thuộc vào mật độ công suất, tức là vào cường độ của bức xạ laser. Ngày nay, mật độ công suất của các

laser ở khoảng vài triệu W/cm^2 với các hệ liên tục và có thể lên tới $10^{19} W/cm^2$ ở các laser xung công suất cao. Mật độ công suất cao đến mức khó tưởng tượng nổi, nhưng điều đó là hiện thực cũng như qua đó mà đạt tới nhiệt độ nhiều triệu độ là hoàn toàn hiện thực. Với laser, có thể làm nóng chảy và bay hơi bất kỳ loại vật liệu nào. Thậm chí còn có thể tạo ra những nhiệt độ từ 10^7 đến 10^8 độ kelvin (khoảng triệu độ celsius) để tổng hợp hạt nhân.

Để gia công vật liệu trong công nghiệp chỉ cần những nhiệt độ thấp hơn thế nhiều. Bởi lẽ cũng chỉ cần đạt đến nhiệt độ bay hơi của kim loại – tối đa là 6200 độ kelvin (khoảng $5930^{\circ}C$), hay cao hơn là của gốm. Đến đây thì những tính năng khác nữa của laser lại trở thành quan trọng. Chẳng hạn như có thể gia công mà không cần tiếp xúc: sẽ không xuất hiện áp lực nén. Khả năng gia công cục bộ cũng quan trọng khi cần tôi các bề mặt. Một ưu điểm nữa là rất dễ lập trình cho laser cũng như lái chùm tia của nó. Đây là điều hết sức thuận tiện khi phải cắt những đường viền phức tạp. Ngoài ra laser còn làm việc rất chính xác: có thể định lượng và điều khiển nó một cách chính xác. Cũng có thể hội tụ nó vào chỉ vài phần nghìn milimét. Trong nhiều trường hợp chỉ cần gia công bằng những xung ánh sáng rất ngắn, điều này dĩ nhiên dẫn tới việc là vật cần gia công chỉ phải chịu tải nhiệt ở mức tối thiểu.

Laser có thể thay thế mọi phương pháp gia công kinh điển như hàn, tôi, khoan, cắt, gọt, bào, uốn. Tuy nhiên có thay thế được hay không thì không chỉ là vấn đề khả thi, mà còn là vấn đề kinh tế. Một phương pháp đã được thử thách, sẽ chỉ được thay thế bởi phương pháp laser một khi chứng minh được là

dùng laser tốt hơn và rẻ hơn. Vì thế cho đến nay, các khả năng của laser cũng mới chỉ được khai thác phần nào. Dùng laser sẽ tốn kém, thường chỉ vì chúng ta cứ cố tình muốn đặt laser vào chỗ của một công cụ truyền thống – chẳng hạn như vị trí của đèn plasma khi chúng ta hàn. Lẽ ra phải có những kết cấu mới, phù hợp với các khả năng của laser. Định hướng ở đây là: kết cấu phải ăn nhập với laser. Mặc dù có không ít yêu cầu về gia công chỉ có laser mới thực hiện được.

Với hàng trăm loại laser thì còn số vài loại cho đến nay được dùng trong gia công vật liệu vẫn chưa phải là nhiều. Khoảng 90% các phương pháp gia công sử dụng laser cacbon đioxit phát ánh sáng hồng ngoại xa với bước sóng 10 micromét, công suất phát liên tục lên tới 40 kilôoát. Vì bước sóng khá dài nên không thể dùng thấu kính thủy tinh để hội tụ được, mà phải dùng gương hoặc thấu kính bằng germani hay selenua chì. Laser neodym-YAG phát ánh sáng hồng ngoại gần với bước sóng 1 micromet, công suất phát liên tục có thể lên đến 5 kilôoát. Song cũng có thể cho phát ở chế độ xung, và khi đó công suất đỉnh xung sẽ có thể lên đến hàng trăm kilôoát, thậm chí hơn nữa. Trong thực tế công nghiệp laser tỏ ra rất tiện lợi, bởi vì có thể truyền tải bức xạ này đi qua sợi thạch anh - thủy tinh uốn được với đường kính vào khoảng 0,6 milimet, và có thể dùng những thấu kính thông thường để hội tụ chúng.

7.1. KHOAN

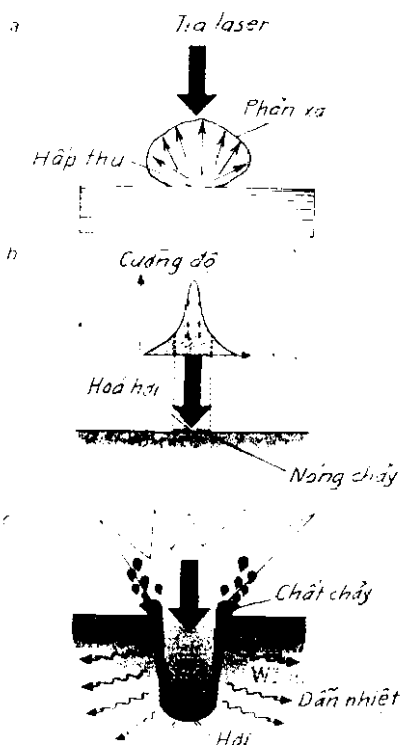
Từ ít nhất trên 6000 năm nay con người đã biết cách tạo ra những lỗ khoan. Đương nhiên ngày nay, yêu cầu về độ chính

xác, về kích thước và vật liệu đã khác nhiều. Laser có ưu điểm hơn những cách khoan kinh điển như khoan xoay, đột và điện xói mòn ở chỗ nào? Để trả lời câu hỏi này trước hết chúng ta hãy xét kỹ quá trình khoan bằng laser: Người ta thường dùng các hệ laser xung để khoan, ở đây thời gian xung chỉ độ vài trăm femtogiây (10^{-15} s) cho đến vài miligiây (10^{-3} s). Mật độ công suất phải ở trong khoảng từ 10^7 đến 10^9 W/cm². Mật độ nhỏ hơn mới chỉ làm cho vật liệu chảy ra. Dưới 10^5 W/cm² mới chỉ đủ để nung nóng được vật liệu.

Khi một xung laser vừa tới bề mặt vật liệu, tức thì một phần bức xạ bị phản xạ trở lại (xem hình 7.1a). Độ phản xạ phụ thuộc vào bước sóng của laser, vào góc tới và vào vật liệu. Với bức xạ thường dùng để khoan là bức xạ của laser neodym-YAG, độ phản xạ của kim loại nằm trong khoảng 40 đến 90%. Vật liệu sẽ hấp thụ phần còn lại của bức xạ. Phần này góp phần vào làm cho vật liệu bay hơi và nóng chảy (xem hình 7.1b). Khi ấy trong lỗ khoan cũng xuất hiện một áp suất hơi rất lớn, ở trường hợp lý tưởng chính nó sẽ đẩy hết phần nóng chảy ra ngoài (xem hình 7.1c). Muốn cho vật liệu chỉ bay hơi thì năng lượng của laser phải rất lớn, bởi lẽ năng lượng này của kim loại gấp đến hai, ba chục lần năng lượng nóng chảy.

Khi xung laser đã lọt được vào bên trong vật liệu và lỗ khoan đã bắt đầu hình thành, phản xạ giảm, còn hấp thụ tăng. Một mặt bức xạ phản xạ lại từ các mặt vách có thể góp phần vào quá trình khoan; mặt khác hơi kim loại phát sinh ra trong lỗ khoan cũng lại hấp thụ bức xạ. Cuối cùng hơi kim loại này sẽ chuyển thành plasma, plasma này tiếp xúc với vách lỗ khoan sẽ

truyền năng lượng cho vật đang được gia công. Vật liệu phải khoan càng dày thì càng cần nhiều xung. Thời gian khoan kéo dài làm cho phần phân xạ trên bề mặt giảm, và phần năng lượng bị hấp thụ tăng. Song cùng lúc thì mức thất thoát năng lượng sẽ tăng do nhiệt bị truyền đi. Đó là một hiệu ứng không mong muốn, nếu như vật liệu ở vùng xung quanh lỗ khoan bị biến tính.



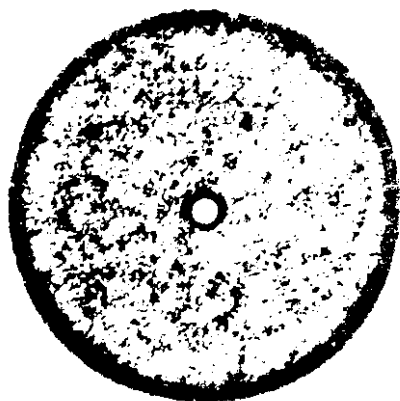
Hình 7.1:

Sơ đồ mô tả quá trình khoan: tia laser đi vào mặt vật liệu, một phần bức xạ bị phản xạ lại, phần kia bị hấp thụ (a); tùy theo cường độ mà bay hơi hay nóng chảy (b); lỗ khoan xuất hiện, áp suất hơi đẩy phần nóng chảy ra ngoài lỗ khoan (c)

Ngoài mật độ công suất và năng lượng được nạp vào, chất lượng chùm tia cũng là một tiêu chí tác động trực tiếp vào đường kính của lỗ khoan và tỷ số giếng (độ sâu so với đường kính). Chất lượng chùm tia là khả năng có thể hội tụ được của tia laser, chất lượng chùm tia càng cao sẽ càng dễ hội tụ và nó càng mảnh. Tính mảnh mai của chùm tia được đặc trưng bởi độ sâu của độ sắc nét hay là độ dài Rayleigh. Nó cho biết nếu tính từ tiêu điểm thì sau một đoạn dài là bao nhiêu tiết diện của tia sẽ tăng gấp đôi. Nếu lỗ khoan phải có hình trụ, thì độ dày của vật liệu không được vượt quá một đến hai độ dài Rayleigh. Khi khoan bằng laser, lỗ khoan thường dễ bị có dạng hình nón, nhất là ở vùng miệng lỗ, có thể khắc phục (giảm thiểu) bằng cách tạo dạng cho xung. Ý muốn nói là khi khoan càng vào sâu thì càng phải tăng cường độ. Chính cường độ yếu lúc đầu làm cho lỗ mở khó tròn. Cường độ tăng dần theo lỗ khoan vào sâu sẽ tạo ra được một áp suất hơi càng ngày càng tăng, và như vậy nó sẽ có khả năng đẩy phần vật liệu đã bị nung chảy ra ngoài có hiệu quả hơn.

Có ba phương pháp khoan. Lỗ khoan nhỏ, tấm vật liệu phải gia công mỏng thì chỉ cần bắn một xung laser duy nhất, ở chế độ từng xung một. Với chế độ khoan gồ thì sẽ bắn nhiều xung vào cùng một lỗ. Khoan gồ có ưu điểm hơn kiểu khoan bắn một lần là ở chỗ, với các lỗ khoan này độ lặp lại sẽ tốt hơn nếu so với các lỗ khoan ở chế độ khoan từng xung một. Càng dùng nhiều xung cho một lỗ thì sai lệch hình học giữa lỗ này với lỗ kia càng nhỏ. Thời gian gia công càng kéo dài sẽ càng bất lợi. Thêm nữa, không thể gia công lướt qua (*on the fly*), tức là

khoan trên vật gia công đang chuyển động. Như phương pháp khoan xương - trepannier, chẳng hạn bằng cách cho thấu kính gia công quay ngoại tâm có thể khoan lỗ lớn đến vài millimét. Ở đây thật ra chỉ có quá trình khoan thủng lúc đầu mới đích thực là khoan, còn sau đó chính là quá trình cắt rộng khe mở. Do vậy rất dễ thay đổi đường kính của lỗ khoan. Ngoài ra nhờ đó mà tránh được hiện tượng lỗ có hình nón là điều thường xảy ra với khoan bằng laser.



Hình 7.2: Khoan mặt đá để làm chân đá cho đồng hồ.

Lần đầu tiên dùng laser để khoan trong công nghiệp là năm 1969, năm Thụy Sĩ có thiết bị khoan tự động. Người ta khoan từng đĩa nhỏ bằng hồng ngọc để làm ổ trục cho bánh xe răng ở đồng hồ (xem hình 7.2). Thế nhưng nhu cầu đối với những ổ trục hồng ngọc này giảm rất nhanh khi có sự xuất hiện

của đồng hồ thạch anh. Thời nay phương pháp khoan bằng laser chỉ dùng cho việc gia công chính xác, chẳng hạn như cần phải chế tạo những vòi phun cho những ứng dụng khác nhau hoặc khi cần khoan lỗ kim phẫu thuật để khâu chỉ. Tuy vậy, trong ngành chế tạo tuabin và động cơ phản lực, người ta cũng phải khoan bằng laser. Ở đây vật liệu có khi dày đến 25 milimét, với đường kính lỗ khoan từ 0,3 đến 1,2 milimét. Các lỗ khoan tinh vi như thế sẽ là những kênh làm lạnh rất cần thiết cho các bộ phận tuabin, bởi lẽ yêu cầu chịu tải nhiệt và cơ đặt ra cho buồng đốt và cánh quạt tuabin mỗi ngày một tăng. Nhiệt độ đốt trong tuabin càng cao thì hệ số hữu ích của tuabin càng cao. Nhờ cái gọi là làm lạnh phóng lưu (*effusion*) có thể có nhiệt độ cao hơn, và do đó có hệ số hữu ích làm lạnh cao hơn, điều này dẫn tới quá trình đốt có hiệu quả hơn, môi trường càng ít bị ô nhiễm hơn. Vì vậy phải có rất nhiều lỗ khoan cực nhỏ ở các bộ phận được không khí làm lạnh đi qua các lỗ được xếp đặt ở những vị trí thích hợp đó để chúng tạo nên một thứ đệm khí mỏng cách nhiệt giữa chi tiết máy với khu vực đốt (xem hình 7.3). Công nghệ làm lạnh sẽ hoạt động một cách lý tưởng nếu như các lỗ khoan nằm càng nghiêng càng tốt, chỉ thành những góc nhỏ so với bề mặt chi tiết máy. Đây lại là một ưu điểm nữa của phương pháp khoan bằng laser so với những phương pháp khoan kinh điển. Vì là khoan không tiếp xúc nên không gặp khó khăn khi khoan xuống mặt nghiêng hoặc lồi. Đó là chưa kể vật liệu ở tuabin thường là siêu hợp kim (hợp kim - kim loại với độ nóng chảy cao và độ rắn cơ học cao) nên rất khó gia công nếu dùng dụng cụ sinh phoi. Lại còn khó hơn bởi các chi tiết máy

được tráng thêm một lớp gốm để nâng cao nhiệt độ đốt. Ngày nay tia laser đã trở thành công cụ duy nhất tạo ra được những lỗ khoan như thế.

Trong tương lai, công nghiệp hàng không sẽ là mảnh đất màu mỡ để laser phát huy với tư cách là một công cụ khoan, chẳng hạn như ở “cánh chảy tầng” (*laminairy*). Mô phỏng số đã cho thấy các điều kiện khí động học cho máy bay sẽ được cải thiện, nếu như vỏ ngoài của các cánh nâng được khoan vô số các lỗ khoan cực nhỏ. Các lỗ nhỏ ấy có thể chi phối điều kiện áp suất ở cánh nâng, và có thể tiết kiệm được trên 10% nhiên liệu. Cứ mỗi cánh nâng cần có từ 10 đến 100 triệu lỗ khoan như vậy với đường kính khoảng 70 μm . Vật liệu của cánh nâng phải là titan, kim loại này vốn có trọng lượng riêng tương đối nhỏ, song lại có các tính năng cơ học rất tốt. Hiện các phòng thí nghiệm - nghiên cứu đang nỗ lực tìm hệ laser phù hợp với yêu cầu này. Khi đó ngay cả trong kỹ thuật sàng cũng sẽ có một cuộc cách mạng, vì kỹ thuật này cũng cần tới hàng triệu lỗ khoan cực nhỏ. Một lĩnh vực khác, ở đó cũng nhất thiết phải có công cụ khoan, đó là lĩnh vực chế tạo vòi phun, cần cho nhiều ngành, chẳng hạn như các vòi phun mực trong ngành in, vòi phun sợi trong ngành dệt, và các vòi phun định cỡ (*calibrier*) trong kỹ thuật đo lường. Cần nhấn mạnh là, với các vòi phun nhiên liệu ở động cơ Diesel và Otto, công nghệ khoan bằng laser đã đem lại hiệu quả kinh tế rất lớn. Cho đến tận lúc này nhiều nơi vẫn đang còn sản xuất các loại lỗ khoan này bằng công nghệ xói mòn (*erodier*) là công nghệ vừa tốn kém, lại vừa mất nhiều thời

gian mà đường kính tối thiểu của lỗ khoan vẫn bị giới hạn ở khoảng 200 μm . Công nghệ laser cho phép khoan những lỗ nhỏ hơn thế nhiều, nhờ vậy mà sự tạo dòng xoáy những giọt nhiên liệu sẽ tinh tế hơn nhiều và dĩ nhiên là hiệu suất đốt cháy nhiên liệu sẽ cao hơn nhiều.

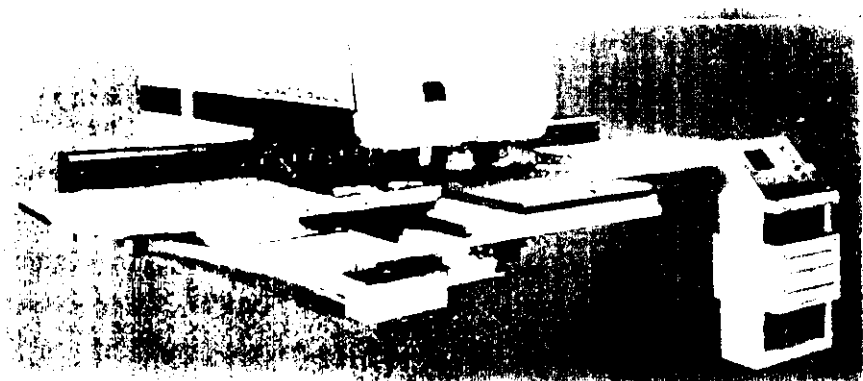
Chúng ta sẽ đặt ngay câu hỏi về những giới hạn của công nghệ khoan bằng laser: độ dày tối đa của vật liệu và đường kính tối thiểu của lỗ khoan có thể là bao nhiêu? Trong công nghiệp hiện nay đã khoan được vật liệu dày đến 25 mm, ví dụ ở những lỗ khoan làm lạnh trên cánh quạt tuabin. Cũng tại đó đường kính của lỗ khoan vào khoảng 1 mm, điều này tương ứng với tỷ lệ giếng là 25. Những lỗ mở lớn hơn sẽ không được xem là lỗ khoan, mà gọi là cắt bằng laser. Trong phòng thí nghiệm người ta đã khoan sâu được đến 45 mm và đạt tới tỷ lệ giếng gần 100.

Về mặt vật lý, bước sóng của laser được dùng sẽ quyết định đường kính lỗ khoan nhỏ nhất có thể đạt được. Trong thực tế cho tới nay đã khoan được những lỗ có đường kính vào khoảng 3 μm , với bước sóng laser 1 μm . Những lỗ khoan nhỏ hơn đòi hỏi laser có bước sóng ngắn hơn. Chẳng hạn bằng cách dùng các tinh thể phi tuyến, người ta có thể tạo ra những bước sóng này từ bước sóng 1,06 μm của laser neodim-YAG, và sẽ có bước sóng là 0,5 μm hoặc 0,25 μm , nhưng công suất sẽ giảm nhanh khi bước sóng giảm. Cũng có thể dùng laser excimer với bước sóng khoảng 0,2 μm , song phải chấp nhận chất lượng chùm tia rất kém.

7.2. CẮT

Trong số những công nghệ chế tạo ngày nay dùng bức xạ laser thì công nghệ cắt bằng laser đã chiếm được một vị trí xứng đáng. Vì chủng loại các máy laser khá nhiều nên có thể cắt đủ loại vật liệu với kích thước rất khác nhau. Ngoài ra còn có những công nghệ “lai ghép”, tức là phối hợp kỹ thuật cắt bằng laser mang tính cách rất đổi mới với những kỹ thuật kinh điển, chẳng hạn như kỹ thuật đột. Nhờ vậy mà giá thành có thể chấp nhận được và kết quả gia công đạt tối ưu (xem hình 7.4). Thiết bị cắt bằng laser gồm một máy laser với một kết cấu lái chùm tia nơi đầu gia công; ở đây lại có một hệ quang học hội tụ với một vòi phun khí. Việc thao tác hệ quang học và vật gia công hoàn toàn thực hiện bởi một đơn nguyên máy tính kỹ thuật số CNC (*computerized numerical control*). Việc truyền bức xạ thực hiện theo những cách khác nhau tùy thuộc bước sóng được dùng. Bức xạ của laser neodym-YAG truyền theo sợi thủy tinh có thể đạt khoảng cách 200 m mà hầu như không bị mất mát đáng kể. Cáp quang học với đường kính lõi thường dùng từ 300 đến 600 μm có lớp vỏ bảo vệ và những dây dẫn đường giám sát tia truyền, khi thao tác có thể dễ dàng uốn y hệt như uốn một cáp bằng đồng cứng cỡ, cho nên khi gia công theo ba chiều trong không gian, vẫn không gặp trở ngại gì. Laser CO_2 tuy có bước sóng ánh sáng dài hơn, nhưng lại chưa có một loại cáp quang học khả dĩ nào dùng được. Để dẫn truyền loại bức xạ này phải dùng những cánh tay khớp cứng với gương và hệ quang học thích hợp. Yêu cầu hội tụ cũng đòi hỏi phải có những thấu

kính chuyên dụng, chẳng hạn loại bằng sêlenua kẽm. Loại vật liệu này trong suốt đối với bức xạ của laser CO_2 và cả đối với vùng bức xạ khả kiến. Như vậy rất thuận lợi vì có thể truyền được cả bức xạ của laser phát ở miền khả kiến. Nếu công suất đầu ra của laser lớn hơn 2 kilôoát thì chỉ dùng gương; bởi lẽ độ hấp thụ với bức xạ laser của thấu kính khá cao. Ở đây người ta chủ yếu dùng loại gương đồng được tiện bằng kim cương rồi mạ vàng, có độ nhám bề mặt chưa bằng một phần mười hai mươi bước sóng. Để loại trừ mọi khả năng bị nhiệt làm hư hại, trong vùng công suất trên 1 kilôoát, tất cả mọi hệ quang học đều phải dùng nước làm lạnh.



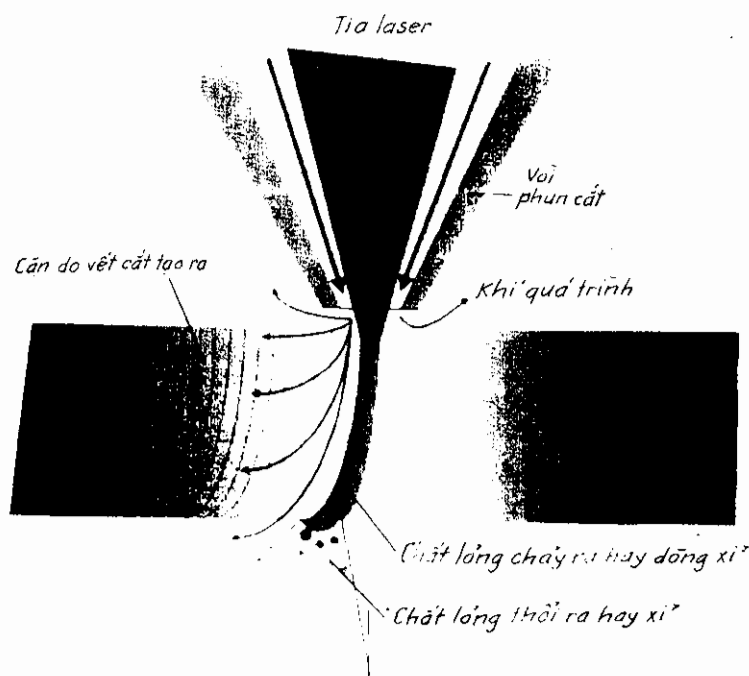
Hình 7.3: Thiết bị cắt và khoan kết hợp bằng laser.

Để vết cắt có chất lượng cao, tiêu điểm nhất thiết phải có vị trí ổn định tuyệt đối. Đối với hệ thiết bị dùng laser neodym-YAG có cáp quang học dẫn truyền, vì sự quy định của hệ mà chất lượng không đổi của tia ở đầu cáp là điều kiện cần có để

bảo đảm vị trí của tiêu điểm là cố định. Trái lại ở những hệ quang học di động của thiết bị laser CO₂, nếu quang lộ của tia thay đổi, tức khoảng cách từ nguồn bức xạ đến đầu gia công thay đổi, sẽ làm cho đường kính của chùm tia nơi hệ quang học gia công cũng liên tục thay đổi. Nếu là thiết bị cắt trên bề phẳng với khoảng thao tác điển hình là 3 m x 1,5 m thì ở đầu gia công ngoài cùng, đường kính chùm tia sẽ tăng thêm vài milimét, sẽ có ảnh hưởng lớn tới kết quả cắt. Còn nếu đường truyền dẫn thậm chí lại dài hơn thế, thì không thể dùng kỹ thuật này bởi vì sẽ quá phức tạp và rất dễ bị nhiễu; khi ấy máy laser phải chạy theo máy chủ.

Công suất đầu ra tối đa của các máy cắt bằng laser CO₂ nằm trong khoảng từ 2 đến 3 kilôoát, do vậy có thể cắt được thép xây dựng có bề dày đến 20 milimét và với vận tốc cắt khoảng 1 m/min (cắt đốt cháy). Còn công suất của máy cắt dùng laser neodym-YAG đạt tới 1 kilôoát. Với loại máy dùng laser này có thể hội tụ rất tinh vi, và nếu chỉ cắt những tấm mỏng thì sẽ đạt được độ dày rãnh cắt chỉ khoảng 10 μm. Ngoài ra cũng còn dùng tới một nguồn bức xạ nữa để cắt là laser excimer với bước sóng từ 193 nm (fluorua argon) đến 351 nm (fluorua xenon), tùy theo loại khí nạp.

Tùy theo loại hình và kết cấu bề mặt của vật liệu mà một phần của bức xạ laser bị hấp thụ bởi vật liệu, còn phần kia sẽ bị phản xạ. Nếu mật độ công suất vượt quá 10⁶ W/cm² vật liệu sẽ bị nóng chảy và bắt đầu bay hơi (xem hình 7.5). Cần phải phân biệt ba phương pháp: cắt nung chảy, cắt đốt cháy và cắt thăng hoa.



Hình 7.4: Nguyên lý của công nghệ cắt.

Cắt nung chảy có nghĩa là vật liệu bị tia laser đi tới nung nóng cho đến lúc nóng chảy, rồi bị một chất khí trợ đẩy ra khỏi rãnh cắt. Mép cắt ở đây có khía rất điển hình. Vận tốc chất khí có thể nằm ở miền siêu âm.

Phương pháp cắt đốt cháy chỉ có thể áp dụng cho thép vật liệu. Vì ở kỹ thuật này dùng oxy tinh khiết để làm chất khí quá trình, thay cho khí trợ, nên nó sẽ phản ứng với vật liệu bị bức xạ laser nung nóng quá nhiệt độ bốc cháy và vì vậy chúng có

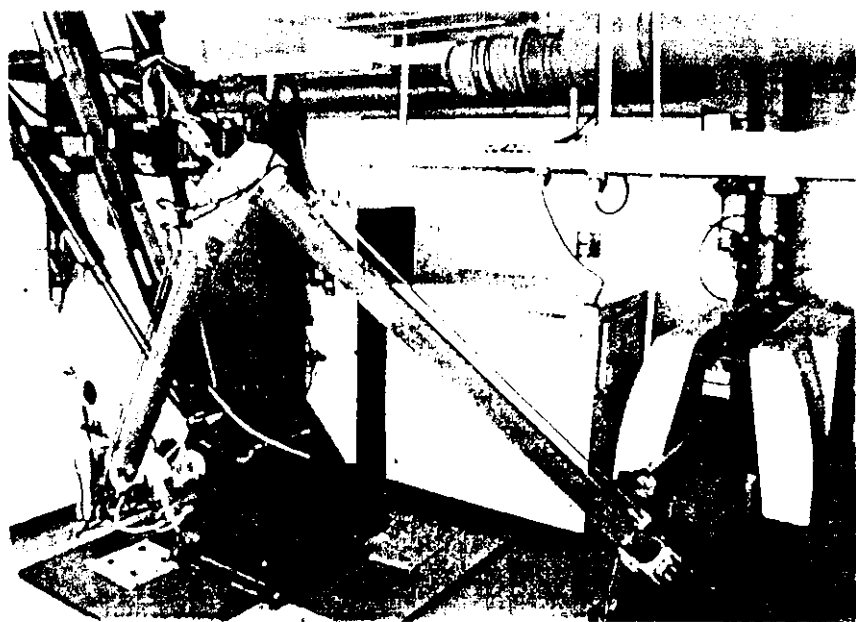
tác dụng tỏa nhiệt rất mạnh. Vì ở đây là một quá trình cung cấp thêm năng lượng nên có thể tăng vận tốc cắt lên đến năm lần. Những nhược điểm của phương pháp này là: vật liệu bị oxy hoá, mép cắt gồ ghề, vùng bị ảnh hưởng nhiệt lớn.

Cắt thăng hoa là làm cho vật liệu bay hơi ở vùng rãnh cắt, áp dụng cho vật liệu có trạng thái nóng chảy (kim loại) và cho cả vật liệu vô cơ, hữu cơ không có trạng thái hoá lỏng (gỗ, giấy, vải, gốm, nhựa). Khi áp dụng cho loại thứ hai phải có biện pháp ngăn ngừa mép cắt bốc cháy (đòi hỏi phải có dòng khí trợ bảo vệ). So với phương pháp trước thì phương pháp này cắt rất chậm, lại đòi hỏi cường độ laser phải cao. Tuy nhiên vẫn có một vài ưu điểm: mép cắt trơn nhẵn, vùng vật liệu bị biến đổi bởi nhiệt lượng của quá trình khá nhỏ và có thể dùng khí bảo vệ để ngăn ngừa oxy hoá.

Ngoài bước sóng và tiến trình thời gian của tia laser - liên tục hay chế độ xung - chính tính chất phân cực của nó lại đóng một vai trò quan trọng như là một tham số của phương pháp cắt bằng laser. Thông thường các laser rắn khi hoạt động được truyền bằng cáp quang học, sẽ không bị phân cực. Nhưng bức xạ của laser CO₂ lại có thể phân cực tròn hay tuyến tính. Phân cực tuyến tính trực tiếp tác động vào kết quả cắt, tức là kết quả cắt trực tiếp phụ thuộc vào phương. Bởi vậy khi phải cắt theo đường viền thì người ta hay dùng laser phân cực tròn.

Vật liệu phi kim có độ hấp thụ tự nhiên cao, nên cắt vật liệu phi kim không khó. Vật liệu kim loại thì trái lại, hấp thụ rất ít trong vùng bước sóng của các laser hiện dùng; ngay từ lúc khởi đầu gia công, hầu như toàn bộ bức xạ của ánh sáng laser rơi tới đã bị dội ngược trở lại. Chỉ sau khi một phần vật liệu đã

bị nóng chảy, tạo ra một đường rãnh, độ hấp thụ mới tăng dần. Khi mật độ công suất rơi tới vượt quá 10^8 W/cm^2 sẽ hình thành plasma ở bên trên vùng gia công và hấp thụ mạnh bức xạ laser. Kết quả là quá trình cắt bị gián đoạn, rãnh cắt không xuyên thấu và như vậy là vết cắt dang dở.



Hình 7.5: Laser CO₂ - cắt xẻ (slab) với robot sáu trục.

Về nguyên tắc, có ba dạng thiết bị cắt: hệ quang học bất động còn vật gia công di động, hệ quang học và vật gia công cùng di động, và hệ quang học “lướt” trên vật gia công bất động. Để làm cho từng hợp phần di động, có thể dùng bàn trượt, trục

quay hoặc robot (xem hình 7.6), những trang bị này cũng thường có ở các kiểu máy thông thường. Việc điều khiển các chi tiết di động tuy nhiên phải phù hợp với những yêu cầu riêng biệt của công nghệ gia công bằng laser, vì chúng ta phải quan tâm tới khả năng điều khiển uyển chuyển các tham số laser trong tiến trình gia công. Ngoài ra vì vận tốc của quá trình cao hơn rất nhiều – nhất là khi gia công trong không gian – còn phải biết tiên liệu việc giám sát các đường viền, có quan tâm đến các tham số động lực học của máy.

7.3. HÀN VÀ HÀN THIẾC

Từ lâu, trong công nghiệp gia công kim loại, hàn là một ứng dụng đã được xác lập của laser. Chủ yếu là dùng laser CO₂ và laser neodym-YAG. Mật độ công suất trên vật gia công phải từ 10⁵ đến 10⁷ W/cm². Khi hàn cũng như khi cắt, tia laser trên mặt vật gia công phải được hội tụ bằng gương cầu lõm hoặc thấu kính để nung chảy cục bộ vật phẩm. Những chỗ đã bị nung chảy ở hai chi tiết cần hàn, lúc ấy mới hoà trộn với nhau, rồi cùng đóng rắn sau khi tiêu điểm laser đã rời đi. Bức xạ laser có thể liên tục hoặc ở chế độ xung. Nếu laser làm việc ở chế độ xung thì ngay với những laser nhỏ, trong thời khoảng xung, vẫn có thể đạt tới mật độ công suất cần có. Vì vậy thường ưu tiên dùng cách này để hàn từng điểm hàn riêng lẻ hay những mối hàn ngắn bởi vận tốc hàn không quan trọng. Mỗi hàn khi đó do từng điểm hàn hợp thành, cho nên hay có ngoại hình như thể đóng vẩy liên tục rất đặc trưng. Nhưng công suất laser lấy trung bình theo thời gian càng cao thì thể tích vật liệu nóng

chảy càng lớn. Vì vậy nếu vật liệu là những tấm dày thì mỗi hàn càng dài lại càng phải hàn nhanh, chính bởi vậy mà laser phát xạ liên tục càng ngày càng được ưu tiên hơn.

Khi hàn bằng laser có thể là hàn truyền nhiệt hoặc hàn sâu. Thường dùng cách hàn truyền nhiệt để kết dính các tấm mỏng. Còn nếu gặp những tấm dày hơn thì dùng phương pháp hàn sâu: mỗi hàn trông thanh mảnh hơn, đó cũng là một điểm đặc trưng của hàn sâu. Khi hàn sâu mật độ công suất vượt quá 10^6 W/cm^2 tạo ra bên trong vật liệu mao quản hơi theo đó tia laser lọt được vào sâu và tới đó nó mới bị hấp thụ. Độ sâu của mỗi hàn lớn gấp đến năm, mười lần bề rộng. Ở nhôm sự khác biệt giữa mỗi hàn thông thường và mỗi hàn bằng laser sẽ thể hiện rất rõ. Bởi vì kim loại này phản xạ mạnh nên nếu muốn hàn nhôm tấm dày hàng milimet nhất thiết phải dùng laser có công suất ra hàng kilôoát để đạt vận tốc hàn tối đa 10 m/min. Chất lượng chùm tia, tức là khả năng hội tụ cũng sẽ rất quan trọng để đạt tới mật độ công suất phải có.

Bởi vì trên bề mặt nhôm liên kết với hydro, và lại còn thường tạo ra ở đó một lớp ôxít dày và bền nên mỗi hàn hay bị rỗ, xốp. Để khắc phục hiện tượng này nên phun khí bảo vệ vào chỗ hàn. Còn nếu muốn ngăn ngừa những vết nứt vì nóng, cũng rất dễ xuất hiện ở mỗi hàn của nhiều hợp kim nhôm, phải dùng những phụ gia có cấu tạo đặc biệt. Chất lượng hàn nhôm ngày nay đã cho phép nó được ứng dụng rộng rãi trong các ngành chế tạo xe hơi và chế tạo toa xe, tuy vậy trong công nghiệp hàng không, rõ ràng ngày nay đang còn phải chờ đợi các mối liên kết bằng hàn nhôm. Số lượng các hợp phần của xe du lịch được hàn

bằng laser – như mũi xe, trụ chống, khung bê, ống xả... không ngừng tăng. Đặc biệt quan trọng là khâu chế tạo các chi tiết rập theo kiểu may đo (*tailored blanks*), khi phải hàn thép hợp kim chuyên dụng với độ dày mỏng khác nhau. Trong ngành chế tạo xe hơi, nhờ ứng dụng laser mà kết cấu nhẹ hẳn đi; tiết kiệm được vật liệu mà độ bền lại tăng đến 30%. Ví dụ điển hình là cửa xe, phải hàn lại từ các tấm tôn dày mỏng khác nhau tùy theo tải trọng, mà thường là không còn được làm từ một vật liệu với độ dày cố định như trước đây.

Bức xạ laser còn cho phép thực hiện những tổ hợp vật liệu thường hay được gọi là ngoại lai, chẳng hạn như gốm - gốm, gốm - kim loại, nhôm - thép. Ở trường hợp cuối, tức là ghép nhôm - thép không phải là mối liên kết hàn mà là mối liên kết nhờ hàn thiếc. Cũng như với phương pháp khoan, một trong những lĩnh vực ứng dụng đầu tiên của công nghệ hàn bằng laser là ngành công nghiệp chế tạo đồng hồ: các lò xo xoắn phải được hàn vào trục quay mà không được phép làm thay đổi khối lượng. Nhờ hàn điểm bằng laser neodym-YAG hoạt động ở chế độ xung, người ta thực hiện được công việc này mà không cần tới vật liệu phụ trợ, và cũng chính nhờ để đáp ứng yêu cầu của công nghệ này đã dẫn tới sự thành lập một công ty ngày nay đã trở thành một hãng lớn ở Đức, chuyên sản xuất laser.

Ngay cả trong ngành thủ công nghiệp, laser cũng đã xâm nhập vào được. Ở đây những người đi tiên phong là các nhà kỹ thuật răng và những thợ kim hoàn. Mới nhìn tưởng chừng như đó là những lĩnh vực ứng dụng hết sức khác biệt nhau, tuy nhiên cách đặt vấn đề lại hoàn toàn như nhau: phải kết nối

những vật phẩm nhỏ xíu, mỏng manh bằng kim loại dẫn nhiệt mà không được phép dùng vật liệu lạ để phụ trợ. Cho đến nay các bộ phận giả trên hàm răng, chẳng hạn như cầu nối, đều bằng titan không thể hàn được, bởi vì nếu hàn bằng các phương pháp thông thường thì do nhiệt đi vào quá lớn, vật gia công sẽ bị co lại tới mức không thể chấp nhận được. Vậy là phải hàn thiếc, song đáng tiếc là các mối hàn thiếc này có chứa các kim loại nặng, chúng có thể bị nước bọt hoà tan rồi lọt vào cơ thể. Trái lại, nếu hàn bằng laser neodim-YAG hoạt động ở chế độ xung, vì sự cấp nhiệt xảy ra rất nhanh, chỉ trong khoảng vài miligiây, nên vật phẩm gia công chỉ bị nung nóng cục bộ, vì vậy vật gia công vẫn giữ nguyên được hình dạng cũ.

Trong nghề kim hoàn vì chỉ cần cung cấp ít nhiệt, nên cũng có thể dùng công nghệ hàn thay cho hàn thiếc. Hoặc thậm chí có thể đơn giản hoá thao tác: nhân tháo từ khuôn đúc ra, trước khi đánh bóng, những chỗ rỗ sẽ được dễ dàng hàn liền lại với nhau. Công nghệ trước đây phải khoan những lỗ đó ra rồi luồn dây thích hợp để hàn thiếc lại. Thêm nữa chất hàn thiếc hiếm khi cho cùng một sắc độ với chất liệu nền, hơn nữa nó cũng sẽ mòn mau hơn vật liệu nền. Trong công nghệ sửa chữa cũng có thể hàn trực tiếp ngay cho những đồ trang sức có những đồ mẫn cảm với nhiệt như ngọc trai, đá quý mà không cần phải tháo chúng ra để tu sửa rồi xong mới lắp lại được. Ngoài ra thì hàn bằng laser còn mở ra những hướng mới cho thiết kế đồ trang sức, bởi vì có thể hàn ở cả những bộ phận kín và những chỗ theo kiểu bện sợi ở đồ trang sức. Trong lĩnh vực này việc gia công titan và thép chỉ hiện thực khi laser được ứng dụng.

Hai vật liệu ấy do các tính năng và tính tương hợp sinh học của chúng, càng ngày càng có ý nghĩa lớn hơn trong kỹ thuật y học với tư cách để làm vật liệu cho công cụ và vật liệu cấy. Đặc biệt khi gia công các kết cấu tinh vi sẽ tiết kiệm được rất nhiều, bởi vì khoan, cắt hàn đều dễ dàng và chính xác.

Chẳng hạn từ cuối những năm 1970, người ta hoàn toàn dùng phương pháp hàn bằng laser để hàn hai mảnh vỏ bằng titan của máy chỉnh nhịp tim. Ngày nay laser bán dẫn đã có những bước tiến hết sức dài. Mới ít năm trước loại laser gọn nhẹ, chắc chắn và rất có hiệu quả này mới chỉ được dùng trong công nghệ thông tin, bởi vì công suất ra còn nhỏ. Nhưng nay có thể tìm kiếm dễ dàng các hệ có công suất cỡ kilôoát trên thị trường. Tuy nhiên vẫn tồn tại nhược điểm là chúng còn khá đắt và chất lượng chùm tia còn kém. Người ta đang kỳ vọng nhiều ở các laser tia X, rằng chúng sẽ tạo được một bước tiến xa hơn nữa, và chúng sẽ cho phép gia công trong miền nanomet (công nghệ nano). Nhưng có thể cũng phải vài năm nữa loại laser này mới có sẵn trên thị trường.

B. Gia công vật liệu bằng laser ở CHLB Đức

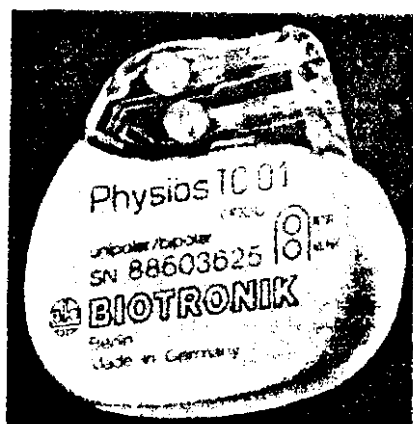
Các xí nghiệp công nghiệp lớn và nhỏ ở Đức khai thác các lĩnh vực ứng dụng nhiều mặt của kỹ thuật laser như thế nào? Một công trình khảo cứu của *Viện Hàn lâm chuyên ngành để đánh giá các kết quả của tiến bộ kỹ thuật* đóng tại Baden-Württemberg, Stuttgart đã làm sáng tỏ vấn đề này. Trong một cuộc khảo sát có tính chuẩn và đại diện được tiến hành vào năm 1995, ba trăm xí nghiệp sử dụng thiết bị laser đã được phỏng

vấn bằng văn bản. Chỉ ngoại trừ các xí nghiệp sử dụng laser trong các kỹ thuật y học và kỹ thuật đo lường; hoặc trong nghiên cứu và phát triển.

Ở Đức kể từ đầu những năm 1970, laser đã được dùng vào sản xuất để cắt, hàn, khoan. Tuy nhiên mãi tới năm 1985, số đông các xí nghiệp mới có các thiết bị riêng của mình, một số thậm chí chỉ vào những năm 1990. Hiện nay đã có khoảng một ngàn xí nghiệp thường xuyên sử dụng laser để gia công vật liệu.

7.4. NHỮNG XÍ NGHIỆP NÀO DÙNG LASER TRONG KHÂU CHẾ TẠO ?

Laser được dùng ở hầu khắp mọi ngành gia công. Nhưng chủ yếu vẫn là các ngành sản xuất hàng kim loại, chế tạo máy, chế tạo xe hơi (xem hình 7.7). Cả ngành chế tạo máy vẫn phòng cũng thường khai thác công nghệ laser. Những xưởng nhỏ chuyên nhận hợp đồng gia công bằng máy laser (*jobshop*), các cơ sở dịch vụ nhỏ này là những xí nghiệp duy nhất chỉ làm theo hợp đồng, đều là những xí nghiệp có đóng một vai trò quan trọng trong số các xí nghiệp sử dụng laser. Những xí nghiệp này thuộc vào một thể loại đặc biệt của những xí nghiệp sử dụng kỹ thuật laser tương đối còn non trẻ, nếu phải đem ra so sánh. Cũng chính bởi vậy mà trong các văn bản nhà nước về phân bố ngành nghề chúng không được nhắc tới. Còn ở tất cả các ngành còn lại, người ta ít dùng tới laser để gia công vật liệu. Trong số này phải kể tới các ngành vải sợi, da, gỗ, giấy, hoá chất, cao su, nhựa tổng hợp, khai thác đất đá, sản xuất và chế biến kim loại, truyền thanh, truyền hình, kỹ thuật viễn thông, kỹ thuật y tế, kỹ thuật đo lường và điều khiển.

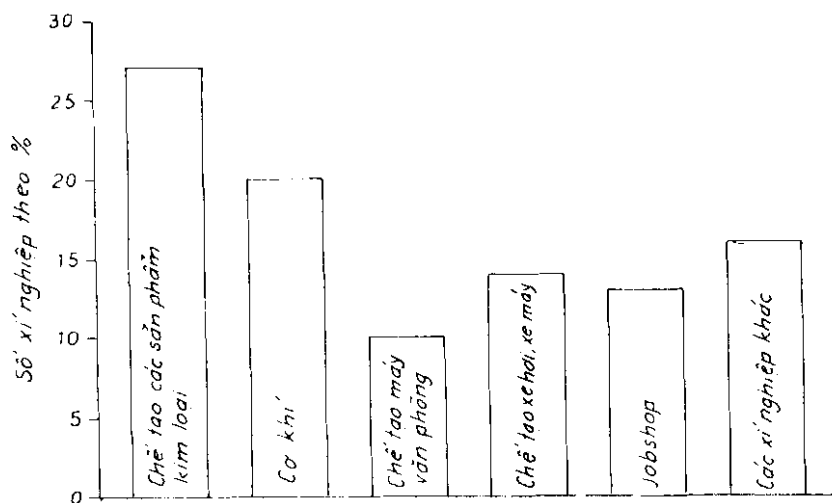


Hình 7.6 : Từ mấy năm nay, máy chỉnh nhịp tim vẫn được hàn bằng laser.

Xí nghiệp sử dụng kỹ thuật laser không phụ thuộc vào quy mô của nó. Nhưng rõ ràng, chủ yếu lại là những xí nghiệp nhỏ với dưới hai mươi và các xí nghiệp lớn với trên hai ngàn nhân công mới sử dụng tới công nghệ này. Ít thấy những xí nghiệp cỡ trung bình nằm ở diện này. Thuộc hàng cơ sở nhỏ có nhiều các *jobshop*. Các xí nghiệp lớn chủ yếu thuộc khu vực chế tạo phương tiện giao thông. Dem các kết quả khảo sát đối chiếu với các số liệu thống kê chính thức của Cục Thống kê Liên bang Đức sẽ thấy: xí nghiệp nhỏ nói chung ít, xí nghiệp lớn thì trái lại, có nhiều đại diện. Tính tròn thì có tới 87% tất cả các xí nghiệp công nghiệp gia công ở Đức là thuộc loại thứ nhất, còn chỉ có chưa đến 1% thuộc loại thứ hai.

Muốn có thiết bị laser mới, phí đầu tư vốn rất cao, điều này làm cho xí nghiệp nhỏ khó có thể chấp nhận. Cũng phí ấy,

xí nghiệp lớn trái lại có thể đáp ứng rất dễ dàng. Nửa số xí nghiệp được hỏi cho rằng phí đầu tư lớn chính là trở ngại lớn nhất khi họ muốn tiếp cận kỹ thuật laser. Thêm vào đó, chi phí bảo dưỡng thiết bị cũng cao, nhiều nơi không lo được. Còn các mặt khác đều không thấy vướng mắc gì: không phải vì kỹ thuật quá ư phức tạp, cũng không phải vì yêu cầu chuyên môn đặt ra cho người đứng máy quá cao. Cũng vậy, thời gian mất đi để thay thế thiết bị, gánh nặng có thể có về sức khỏe và môi trường đều không phải là trở ngại.



Hình 7.7:

Nhiều ngành công nghiệp dùng laser trong đó đóng một vai trò quan trọng là các *jobshop*, đó là các xưởng dịch vụ nhỏ duy nhất chỉ thực hiện các công việc theo hợp đồng và thể hiện được điểm đặc biệt cho kỹ thuật laser đang còn tương đối trẻ. Bởi vậy mà tương lai của nó đang còn mờ mịt, nhất là một khi laser đã trở thành một công cụ thông dụng.

7.5. ỨNG DỤNG KỸ THUẬT LASER RA SAO ĐÂY ?

Năm 1988, nhà xã hội học Mỹ Charles Perrow ở Trường Đại học Tổng hợp Yale (New Haven) đã đặt ra sáu phạm trù để mô tả sáu hệ kỹ thuật. Đó là: trang bị, vận hành, vật liệu, qui trình, nhân lực và môi trường. Cách phân chia ấy nguyên là để dành cho những bất trắc thường gắn liền với các công nghệ lớn. Song cũng có thể vận dụng được cho các hệ kỹ thuật khác và cũng là cơ sở của khảo sát này.

Trong lĩnh vực công nghiệp gia công vật liệu, hai loại laser chủ yếu được dùng là: laser CO₂ (66%) và laser rắn (33%, thường là laser neodim - YAG). Laser CO₂, chủ yếu là loại có công suất bậc trung, tức là từ 1 đến 3 kilôoát. Ở ngành nào cũng gặp nó, đặc biệt là ở các cơ sở sản xuất hàng kim loại. Laser rắn, trái lại, chủ yếu được dùng ở những nơi chỉ cần công suất thấp, thường dưới 1 kilôoát. Trước hết đó là các cơ sở kỹ thuật y tế, kỹ thuật đo lường và điều khiển, các cơ sở sản xuất máy văn phòng và các máy xử lý số liệu. Ở hầu hết các xí nghiệp lại còn cần có những trang thiết bị ngoại vi: 93% còn laser còn được trang bị thêm thiết bị hút, số còn lại đều là những laser rắn công suất rất thấp. Thiết bị hút chủ yếu hoạt động theo phương pháp hút không khí, còn với số chạy theo nguyên lý chuyển đổi không khí hiếm hơn (chỉ có 25%). Quá nửa tổng số laser còn được trang bị thêm thiết bị lọc, thường là lọc hạt (với laser CO₂) hoặc lọc than hoạt tính (với laser rắn).

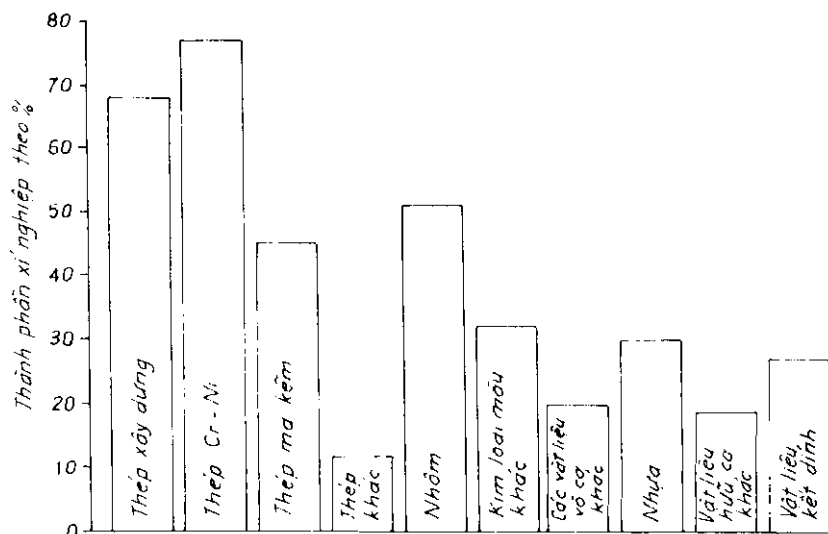
Thiết bị laser hầu hết đều được quy hoạch như là một kỹ thuật độc lập (*stand alone technics*), hiếm khi nó được tổ hợp vào một dây chuyền sản xuất. Ở các xí nghiệp thiết bị của

(46%) chúng chiếm ưu thế, ngoài ra còn lại ở các thiết bị laser đột rập (11%), còn ở các thiết bị điều khiển bằng robot thì ít gặp (6%). Số thiết bị laser ở các cơ sở còn lại (37%) rất khó xếp loại, bởi lẽ các cơ sở này tự mình cấu hình và tự lắp đặt lấy, hoặc giả sau đó họ lại tự trang bị thêm bằng các máy ngoại vi khác. Thường thì các xí nghiệp chỉ có một (42%), còn lại là hai hoặc ba thiết bị laser (35%), không mấy khi có quá ba thiết bị.

Laser có thể gia công nhiều loại vật liệu khác nhau. Đặc biệt các xí nghiệp gia công thép lại hết sức chú ý khai thác mọi khả năng của công nghệ này (xem hình 7.9). Crôm - niken (77%), thép xây dựng (68%) là những thứ đứng hàng đầu, không thể phủ nhận được. Song cũng có nhiều xí nghiệp còn gia công cả các kim loại màu như nhôm (51%). Về vật liệu vô cơ chủ yếu là nhựa nhân tạo (30%). Số đông các xí nghiệp sử dụng kỹ thuật laser cho từ hai đến bốn nhóm vật liệu (53%), thường là các kim loại khác nhau, nhiều khi cũng thấy đến trên bốn nhóm (32%). Trong nhóm này thì như bạn đọc có thể đoán ra ngay, các *jobshop* chiếm ưu thế, đó là các cơ sở chuyên gia công các kim loại và các loại vật liệu khác. Ngược lại hiếm có nơi chỉ gia công một loại vật liệu (15%).

Cũng đa dạng như các loại vật liệu là các phương pháp đã được các xí nghiệp sử dụng. Trước hết phương pháp cắt bằng laser (72%) đã trở thành một công nghệ khá phổ biến trong công nghiệp chế tạo. Còn các kỹ thuật hàn (49%), khắc (41%), khoan (20%), ăn mòn (11%), tôi (9%) cũng đều đã có chỗ đứng vững. Tất cả các phương pháp còn lại ngày nay mới chỉ có tính chất "lót ổ" trong công nghiệp gia công vật liệu. Trên 40% số xí

ng nghiệp chỉ sử dụng có một, và cũng chừng ấy chỉ ứng dụng hai hay ba phương pháp, quá ba là hiếm. Thao tác với những phương pháp khác nhau trên cùng một thiết bị cũng rất hiếm, và cũng chỉ gặp ở các *jobshop*.



Hình 7.8:

Laser có thể gia công nhiều loại vật liệu khác nhau. Đặc biệt là các xí nghiệp gia công thép khai thác công nghệ này.

Công việc của người đứng coi máy laser khá phong phú và đồng thời cũng đòi hỏi rất cao. Với trên 80% số xí nghiệp người vận hành phải tự mình gá lắp, nạp, vận hành, thay đổi chế độ hoạt động, vệ sinh và bảo dưỡng thiết bị. Xí nghiệp càng lớn yêu cầu này càng thường xuyên được chia đều ra cho nhiều người hơn. Vậy mà lại có rất ít người đứng máy laser được đào tạo

thêm hoặc đào tạo chuyên sâu. Thường thì họ chỉ là các công nhân kỹ thuật đã được những đồng nghiệp có kinh nghiệm hơn huấn luyện và truyền nghề cho ngay trên bộ máy laser. Còn chính nội dung hướng dẫn sử dụng máy cũng hiếm khi được chỉnh lý lại hay cập nhật. Ít xí nghiệp có người huấn luyện, mà cũng có ít người đến học thêm ở các lớp đào tạo chuyên sâu về laser. Thậm chí ngay những người sản xuất các máy laser đó cũng chỉ lên lớp cho những người đứng máy duy nhất chỉ ở thời gian đầu khi các cơ sở này vừa nhập máy về. Thường thì chính bản thân các học viên phải cảnh báo cho nhau về những nguy cơ có thể gặp, do bị tia laser trực tiếp chiếu xạ vào hay do tán xạ. Ít có người nói đến các nguy cơ khác như sự phát xạ hay tán xạ các hạt, khi thao tác thay các lọc sáng.

Số đông những người đứng máy và trông coi hệ laser, khi cần hỏi hoặc có bất cứ vấn đề nan giải nào cũng trực tiếp tiếp cận người sản xuất ra máy laser. Cũng có nhiều khi họ tìm tài liệu và tự tra cứu lấy. Chẳng mấy ai tìm đến những thiết chế như các trường đại học, viện nghiên cứu (ở Đức có một Viện chuyên nghiên cứu triển khai mẫu mực mà hè 2001 vừa qua, tác giả có dịp tới thăm là Viện Laser Hannover), các cơ quan quản lý công nghiệp hoặc các hội nghề nghiệp để làm đối tác trao đổi. Các tiêu chuẩn về kỹ thuật vốn dĩ là nguồn thông tin thì cũng chẳng có một ý nghĩa gì đối với họ.

7.6. PROFIL CỦA XÍ NGHIỆP

Vậy một xí nghiệp là nơi điển hình sử dụng laser, nom ra sao? Để trả lời câu hỏi này người ta đã tiến hành một đợt “khảo

cứu dăm" (*cluster research*) – vốn là phương pháp thường dùng những khi phải tiến hành các nghiên cứu thực nghiệm. Chính bằng phương pháp này người ta đã xác lập được năm "Profil của xí nghiệp", đủ bao quát toàn bộ phổ của các xí nghiệp có sử dụng laser trong gia công vật liệu.

Xí nghiệp lớn thường có trên 1000 nhân công. Họ dùng thiết bị laser để chế tạo những sản phẩm riêng của họ, tuy vậy các loại sản phẩm này cũng chỉ là một phần nhỏ trong toàn bộ mặt hàng sản xuất của họ. Dĩ nhiên sản xuất hàng loạt là tiêu chuẩn hàng đầu, vì vậy nên từng thiết bị laser sẽ phải được tổ hợp vào một dây chuyền sản xuất. Chủ yếu là cắt bằng laser, song nhiều khi họ cũng hàn và khắc bằng laser. Còn vật liệu chủ yếu là kim loại, nhất là các loại thép xây dựng và thép hợp kim crôm - niken. Cứ độ hai xí nghiệp lại có một còn gia công thêm cả tôn tráng kẽm và các kim loại màu. Tất cả các xí nghiệp lớn đều sử dụng những loại hình laser quen thuộc. Cùng với người sản xuất laser, xí nghiệp sử dụng nó phải lên kế hoạch rồi lắp đặt thiết bị. Song đến khi cần cải tiến hoặc mở rộng, xí nghiệp lại hay tự mình làm. Về cơ bản người đứng máy chỉ có việc duy nhất là tập trung vào khâu sản xuất. Những khâu khác như lập trình, giám sát, kiểm tra chất lượng đã có người khác lo. Nếu cần đã có kỹ thuật viên – dịch vụ của hãng sản xuất đến tận nơi để bảo hành. Mọi nhân lực đều được đào tạo chuyên môn khá chuẩn. Đều đặn đi dự các lớp tập huấn bên trong cũng như bên ngoài xí nghiệp là điều tất yếu đối với họ. Kiến thức khoa học mới được vận dụng trực tiếp vào công việc hàng ngày.

Cũng như các xí nghiệp lớn, các xí nghiệp vừa cũng có các thiết bị laser để chế tạo các sản phẩm riêng của mình. Tuy nhiên các sản phẩm này thường chỉ được sản xuất theo từng loạt nhỏ. Không hề có trường hợp ngoại lệ, họ chỉ có không quá hai hệ thiết bị laser để hỗ trợ cho nhiều thiết bị gia công khác. Thường thì laser được quy hoạch như là một thiết bị độc lập (*stand alone assemble*), mà trước hết là dùng để cắt các vật liệu kim loại, nhất là thép hợp kim crôm - niken, song cũng có cả thép xây dựng và nhôm. Số lượng laser CO₂ và laser rắn ở các xí nghiệp này theo thống kê là ngang nhau.

Người cán bộ đứng coi và chịu trách nhiệm cho hệ máy laser phải tự mình đứng ra đảm nhận nhiều việc. Chỉ riêng việc bảo dưỡng và bảo hành là do nhân lực khác hay do kỹ thuật viên - dịch vụ ở bên ngoài đảm nhận. Đào tạo tiếp để nâng cao trình độ nghiệp vụ không phải là khái niệm xa lạ, song ít có dịp nên người đứng máy rất khó có khả năng chuyên sâu. Thường thì chỉ là việc người cũ dạy người mới; chỉ trừ khi lại có một hệ thiết bị mới được lắp đặt, người đứng máy mới có dịp được cơ sở cử đi học một lớp tập trung ở bên ngoài.

Thuộc nhóm những nhà ứng dụng chuyên sâu là các xí nghiệp từ vừa đến lớn, cứ xem profil của hệ thiết bị thì nhận ra ngay đặc điểm. Những nhà ứng dụng chuyên sâu thuộc vào nhóm duy nhất chủ yếu dùng laser rắn, công suất nhỏ, chỉ đến 1 kilôoát, và hầu như khi nào cũng được tổ hợp vào một dây chuyền sản xuất. Trái lại, phương pháp và vật liệu ít khi là đơn nhất, do đó thường không hình thành một chủng loại. Xí nghiệp tự thay đổi kiểu thiết bị laser của mình và cũng chỉ sử dụng nó

để làm ra những sản phẩm riêng của mình. Việc chế tạo theo các loạt lớn và sản xuất hàng loạt ở đây là chuyện thường tình. Phạm vi nhiệm vụ và khả năng được học thêm của người đứng máy ở đây cũng tương tự như ở các xí nghiệp vừa.

Thuộc nhóm ứng dụng chuẩn chủ yếu là các xí nghiệp vừa. Họ chỉ dùng laser CO₂, và cũng chỉ để cắt kim loại. Phổ vật liệu của họ trải trên tất cả các loại thép và các kim loại màu. Nhà sản xuất laser bán cho họ một kiểu laser thường thấy trên thị trường và lắp đặt nó ở xí nghiệp như là một hệ thiết bị độc lập (*stand alone*). Không hề cần tiên lượng trước về những khả năng thay đổi, chuyển kiểu hay mở rộng về sau. Tùy theo quy mô mà xí nghiệp có nhiều hay ít thiết bị laser đủ để chế tạo theo loạt nhỏ hay loạt lớn, thậm chí chế tạo đơn chiếc, phần việc theo hợp đồng để khai thác cho thật hết công suất của thiết bị. Về khả năng được học thêm và phổ hoạt động, profil của xí nghiệp loại này cũng tương tự với profil của hai nhóm đã nêu trên.

Các *jobshop*, như trên đã nói, là những cơ sở làm dịch vụ theo hợp đồng, hết sức linh hoạt. Nhân lực của họ có thể lên đến 20 người, song thường không quá năm người, làm thuê theo hình thức trả công theo sản phẩm. Họ cắt hầu như tất cả các loại vật liệu. Song không chỉ có cắt, họ cũng có thể chào những mặt hàng được gia công theo bất kỳ phương pháp nào khác. Xu thế của họ cũng như các xí nghiệp là sản xuất theo từng loạt lớn, nhỏ khác nhau. Tùy khách hàng yêu cầu, mà chế tạo theo loạt nhỏ, lớn, sản xuất hàng loạt hay thậm chí đơn chiếc. Tuy nhiên đa phần vẫn là những loạt nhỏ. Người chủ cơ sở vẫn

thường tự mình dự kiến và lắp đặt lấy hệ thiết bị độc lập (*stand alone*). Chỉ duy nhất nguồn sáng – laser CO hoặc laser rắn – là phải mua của một hãng sản xuất nào đó. Thông thường thì họ quy hoạch thiết bị sao cho trên cùng một máy laser có thể ứng dụng được nhiều phương pháp. Nhìn chung chủ các cơ sở này vẫn luôn tự coi mình cũng là chuyên viên laser và không hề duy trì một quan hệ nào với các cơ quan bên ngoài, thậm chí cả với các nhà sản xuất nguồn sáng. Người chủ đích thân chỉ bảo cho người làm với mình, theo lối “học trong công việc” (*learning on the job*), và vậy mà có cái tên ngộ nghĩnh *jobshop* này. Người đứng máy tất nhiên phải đảm trách mọi việc liên quan.

Tất cả các xí nghiệp ở Đức mà hiện nay đã sử dụng laser để gia công vật liệu, đều có thể được xếp vào một trong số năm profil của xí nghiệp vừa nói trên. Trong số các xí nghiệp đã được phỏng vấn, đông nhất là các xí nghiệp lớn (30%), kế đến là các xí nghiệp vừa (22%), các nhà ứng dụng chuẩn (18%), các *jobshop* (17%) và cuối cùng là các nhà ứng dụng chuyên sâu (13%).

7.7. KẾT LUẬN

Hai mươi năm năm qua, số các thiết bị laser được dùng trong nền công nghiệp Đức để gia công vật liệu đã gia tăng không ngừng. Các xí nghiệp hiện đã có laser đều cố gắng tận dụng mọi khả năng đa dạng của công nghệ này vào những lĩnh vực rất khác nhau. Tuy nhiên sự phát triển nhanh chóng và năng động này, nhất là trong thập kỷ vừa qua, vẫn chưa dự báo được điều gì đáng tin cậy cho vị thế tương lai của kỹ thuật laser

trong công nghiệp gia công vật liệu. Đặc biệt là tương lai của các jobshop lại càng mơ hồ. Những “tổ ấm” mà ngày hôm nay, họ đã biết xây cho mình một cách hết sức thành công, biết đâu lại không sụp đổ vào ngay ngày mai, khi mà laser đã thành công cụ sản xuất thông dụng của từng xí nghiệp.

C. Các kiến thức cơ sở về tương tác laser - vật liệu

Laser được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực của kỹ thuật và y học để tác động vào vật liệu, để gia công, để cấu trúc hoá, để thay đổi. Có một lãnh vực ứng dụng hết sức gây ấn tượng, đó là dùng laser để phục hồi các tác phẩm nghệ thuật và các sản phẩm văn hoá khác: Bằng cách chiếu xạ với những xung laser ngắn, rất mạnh người ta có thể nhẹ nhàng loại bỏ lớp bụi bẩn của thời gian bám dày đặc trên nhiều bức danh hoạ, các pho tượng, các di tích, bản thảo... mà vẫn giữ nguyên chúng.

Cái chung cho mọi ứng dụng đó là năng lượng của ánh sáng laser khi tới vật liệu sẽ bị chuyển đổi tại đó và cuối cùng là tác động làm cho vật liệu thay đổi. Tuy khả năng ứng dụng đa dạng như vậy, nhưng cho đến nay hình như chúng ta vẫn chưa hiểu thật thấu đáo về tiến trình vi mô của các tương tác này. Thật vậy, cho đến nay nhiều ứng dụng vẫn chỉ được “tối ưu hoá” thuần tuý theo kinh nghiệm. Hệ quả của nó là, chẳng hạn như bệnh nhân được bắn bằng xung laser để xoá sạch hình xăm trên người cũng được xem như là, với chính các xung laser này, người ta có thể dễ dàng khoan những lỗ lớn trên gạch. Để hiểu thấu cơ sở vi mô của tương tác giữa laser với vật liệu, trước hết

phải trả lời được các câu hỏi sau đây: Vật liệu tiếp nhận (hấp thụ) ánh sáng ra sao? Năng lượng đã được hấp thụ phân bố (tiêu tán) ra sao? Năng lượng đã được đem vào có tác động gì (các quá trình hệ quả)? Quá trình vi mô của sự hấp thụ tuyệt nhiên không hề đồng nhất cho tất cả mọi trường hợp, thế nhưng luôn luôn vẫn là các điện tử, là những hạt trước tiên tiếp nhận năng lượng của laser.

7.8. HẤP THỤ ÁNH SÁNG LASER

Ở trường hợp gia công kim loại thì ánh sáng xuyên qua bề mặt rồi lọt sâu vào vật liệu (độ sâu lớp da - *skin deep*) khoảng vài nanomet (phần triệu milimet) và bị hấp thụ ở đó. Khi đó các điện tử của dải dẫn mới được gia tốc và được cấp thêm động năng: khí điện tử nóng lên. Tiến trình này chỉ phụ thuộc chút ít vào bước sóng - độ sâu lớp da và hệ số hấp thụ khá là giống nhau đối với từng kim loại và chỉ biến thiên chút ít theo bước sóng.

Ở các chất bán dẫn, điện tử được nâng từ dải hoá trị lên dải dẫn. Cùng với các lỗ vừa mới phát sinh bằng cách ấy, thì ở dải dẫn, một cặp điện tử - lỗ trống được hình thành. Tới đây ảnh hưởng của bước sóng đã rõ hơn: nó phải đủ ngắn để vượt qua được khoảng cách dải. Độ dày của lớp hấp thụ phụ thuộc vào công suất laser và vào hệ số hấp thụ.

Ở các vật liệu sinh học và polyme, và cả ở các vật liệu cách điện như thuỷ tinh, gốm và vật liệu kết nối, quá trình kích thích xảy ra một cách cục bộ ở từng nguyên tử hay phân tử

riêng biệt. Tương ứng, cấu trúc năng lượng của những hạt ấy - bị thay đổi nhẹ bởi môi trường - chịu trách nhiệm cho sự hấp thụ và như vậy là nó phụ thuộc rất nhiều vào bước sóng.

Ở mô sinh học, đương nhiên là nước đóng một vai trò quan trọng trong quá trình kích thích, các phân tử sắc tố máu hemoglobin cũng vậy. Ở các loại thủy tinh thì lại xuất hiện hiện tượng kỳ lạ là tuy nó trong suốt đối với ánh sáng tới nhưng nó lại vẫn có thể hấp thụ. Tác nhân ở đây là những quá trình phi tuyến, xuất hiện khi các xung laser tới có cường độ cực lớn.

Cuối cùng, hệ quả của những xung laser mạnh còn có thể là một plasma, đó là một chất khí cực kỳ nóng gồm toàn các điện tử tự do và các ion tự do, xuất hiện trước bề mặt. Chất khí này còn có thể hấp thụ ánh sáng rất mạnh, trong một vùng phổ rộng. Thực chất của hiện tượng này chính là quá trình đảo của hiện tượng được gọi là bức xạ hãm: các điện tử ở gần các ion bị điện trường của ánh sáng gia tốc rất mạnh và chúng hấp thụ năng lượng của điện trường này.

7.9. TIÊU TÁN NĂNG LƯỢNG TRONG VẬT LIỆU

Dễ hiểu nhất là quá trình trong các kim loại. Rất nhanh, các điện tử nóng - chỉ trong khoảng thời gian đặc trưng khoảng một picogiây - nhường năng lượng cho các nguyên tử của chất rắn. Năng lượng dao động của các nguyên tử này - và qua đó là nhiệt độ - tăng cho tới lúc đạt đến một trạng thái cân bằng. Ở trường hợp này chúng ta nói rằng do va chạm các điện tử nhường năng lượng của chúng cho các photon - tức chính là các

lượng tử của năng lượng dao động – của chất rắn. Lúc đó chúng ta thấy rằng, không chỉ có vùng trực tiếp bị chiếu xạ của kim loại nóng lên, mà bởi vì độ dẫn nhiệt cao, nên năng lượng còn được phân bố rải ra cả một vùng rộng hơn.

Ở các chất bán dẫn thì lại xuất hiện khả năng từng cặp điện tử – lỗ trống phát sinh khi hấp thụ, bây giờ sẽ tái hợp lại và bức xạ ánh sáng. Nhưng thông thường những điện tử khi bắt đầu được chiếu xạ, tức là với các laser xung thì đó chính là đầu của xung laser, sẽ được đưa lên dải dẫn, và trong tiến trình tiếp theo của sự chiếu xạ cũng tương tự như ở kim loại, chúng được nung nóng lên sao cho sau đó cũng xuất hiện các quá trình tiêu tán tương tự.

Ngược lại ở các mô sinh học và các vật liệu không dẫn điện sự kích thích không nhắm vào chất khí điện tử, mà vào các điện tử định xứ. Mới đầu nó tiêu tán vào môi trường gần nhất – chẳng hạn như ở các mô sinh học, thông thường thì bắt đầu là chính phân tử mẹ được kích thích để đi vào dao động. Bây giờ kích thích có thể phân tán ra xung quanh, giống như ở kim loại một vùng xung quanh chỗ được chiếu xạ của mẫu sẽ bị nóng lên. Song nếu năng lượng dao động quá cao thì phân tử cũng có thể phân rã, và do vậy là có sự chuyển đổi hoá học ở mẫu. Cũng có thể quan sát thấy những hiện tượng tương tự ở các vật liệu không dẫn điện. Chuyển đổi hoá học có thể dẫn tới chỗ là, trong khi chiếu xạ - đặc biệt là trong thời khoảng của một hay nhiều xung - hiệu suất của hấp thụ sẽ thay đổi. Hiệu ứng này được gọi là sự “ủ”.

7.10. CÁC QUÁ TRÌNH NHƯ LÀ HỆ QUẢ

Vậy hệ quả của việc cung ứng năng lượng có thể là sự nóng lên của vật chất bị chiếu xạ, song cũng có thể là một sự biến đổi hoá học (thêm) – ở các mô sinh học và các vật không dẫn. Ở trường hợp thứ nhất bắt đầu là vật liệu chảy ra vì bị nung nóng. Nếu điều này xảy ra quá nhanh, sau đó quá trình nguội lại cũng hoàn tất quá nhanh – chẳng hạn như ở sự chiếu xạ bằng những xung laser ngắn ở nhiệt độ môi trường xung quanh thấp – vật liệu ở vùng bị chiếu xạ có thể chuyển sang một cấu trúc khác hẳn với cấu trúc ban đầu.

Người ta dùng hiệu ứng này để tôi bề mặt kim loại. Nếu tiếp tục cấp thêm năng lượng cho vật liệu thì ở vùng bị nung nóng nó sẽ bốc hơi. Đó cũng chính là sở sở cho các công nghệ cắt và khoan bằng laser. Đặc biệt nếu xung rất mạnh, cụ thể là khi cường độ xung vượt quá vài trăm kW/cm^2 , điện trường của ánh sáng sẽ lớn tới mức trong đám hơi sinh ra ở đầu xung sẽ xảy ra hiện tượng đánh thủng lớp điện môi và hình thành một plasma nóng. Plasma này hấp thụ một phần ánh sáng laser còn lại, và có thể nóng lên tới hàng vạn (10^4) độ Celsius. Vì tất cả chỉ diễn ra trong một khoảng thời gian cực ngắn là vài nanogiây, nên đi liền theo quá trình là sự xuất hiện của một xung va chạm hết như một cú sấm sau tia chớp. Cũng hết như gradient nhiệt trong mẫu là quá lớn, xung va chạm này cũng có thể gây nên những ứng suất cực lớn bên trong vật liệu gia công và vậy là tác động nên những vết nứt không còn kiểm soát được.

Khi hoá học của vật liệu biến đổi thì không chỉ riêng tiết diện hiệu dụng của lực kết nối bị thay đổi. Mỗi liên kết bị đứt

đoạn vì quá trình quang hoá, và ở vùng bị chiếu xạ vật liệu cũng có thể bị mất tính bền, y hệt như khi bị ion hoá cục bộ. Hệ quả là vật chất bị chuyển tải đi, người ta gọi đó là hiện tượng tải mòn (*ablation*). Một lần nữa trong đám khí hình thành bên trên bề mặt lại có thể phát sinh hiện tượng đánh thủng lớp điện môi, qua đó làm bùng lên một plasma với tất cả các hệ quả có thể thấy được của nó.

7.11. NHỮNG NGHIÊN CỨU HIỆN NAY

Tuy rằng hình như những quá trình cơ bản nhất trong tương tác giữa laser với vật chất trên nguyên tắc đã được làm sáng tỏ, nhưng vẫn còn lâu chúng ta mới hiểu hết chi tiết về các hiệu ứng vi mô, đặc biệt là khi được chiếu xạ với laser xung. Bởi vậy chúng vẫn đang là đối tượng của nhiều nỗ lực nghiên cứu. Còn cần nhiều thời gian hơn nữa chúng ta mới giải đáp hết câu hỏi về vấn đề kết nối tối ưu và ủ. Tuy nhiên trọng tâm của các công trình nghiên cứu hiện nay lại nằm ở động học của từng quá trình.

Trong mối quan hệ này có một quá trình quan trọng là hiện tượng nhiệt huỷ diễn ra trên những vùng lớn xung quanh nơi bị chiếu xạ. Nguyên nhân có thể là ở chỗ, ngay với những xung thông thường được dùng chỉ vào khoảng vài nanogiây, trong khoảng thời gian ngắn ngủi này của xung cũng đã có một phần không nhỏ năng lượng kết nối được lan toả bởi sự truyền nhiệt ra khắp một vùng của mẫu, còn lớn hơn chính vết của tia laser. Điều này dẫn tới hai hệ quả: Một là phải kết nối nhiều năng lượng hơn mức cần thiết đủ để nung nóng vết của tia. Mặt

khác vùng khuếch tán cũng sẽ được nung nóng rất mạnh. Tuy nhiên thông thường thì sự nung nóng này vẫn chưa đủ để làm cho vật liệu bay hơi mà mới chỉ đủ làm nó nóng chảy hoặc biến đổi hoá học. Hiện tượng nhiệt huỷ này thông thường không mong muốn cho các mô sinh học. Điều tương tự cũng xảy ra với những vùng huỷ nhiệt rộng của vật liệu bởi ứng suất do gradient nhiệt hay do sóng va đập của plasma gây nên. Cuối cùng, thật khó chịu khi một phần đáng kể của vật liệu - chẳng hạn đặc biệt là lúc khoan - sau khi đã bị bóc đi rồi, lại còn bám vào rìa lỗ khoan. Ở phía dưới do xung va đập thậm chí có thể hình thành những cấu trúc gợi nhớ đến cái nắp hộp đồ hộp bị vênh lên nếu ta mở quá tay.

Tiên đề cho một giải pháp là có thể dùng xung siêu ngắn, khoảng vài chục femtogiây (10^{-15} giây). Hy vọng trong khoảng thời gian cực ngắn ấy, năng lượng chưa kịp tiêu tán ra ngoài chỗ bị chiếu xạ, trong lúc năng lượng ấy đã đủ để bóc vật liệu ra khỏi mẫu. Lại bởi vì thời gian xung cũng không lâu hơn thời gian phát xạ của vật liệu, nên sẽ chưa có plasma được môi trong đám hơi hoặc khí. Vì vật liệu bị đẩy ra nhanh nên cũng không thể phát sinh gradient nhiệt đối với vùng xung quanh, bởi lẽ vật liệu nóng đã tức thì rời khỏi mẫu. Tương ứng, sẽ chỉ còn duy nhất lực phản hồi của vật liệu dẫn tới những ứng suất. Tuy nhiên, tiên đề vừa lập luận trên sẽ là, quá trình hoá hơi cũng như quá trình đứt liên kết quang hoá phải diễn ra chỉ nội trong thời gian có thể sánh được với thời gian của xung laser. Nếu không thì vùng chiếu xạ bị nung nóng quá mức sẽ dẫn đến mọi vấn đề nhiệt như khi chúng ta dùng các xung dài hơn. Những khảo sát đầu tiên đã cho thấy, tùy theo vật liệu, cả hai hiệu

ững đều có thể cùng xuất hiện. Để hiểu sâu hơn nữa thì nhất thiết phải khảo sát thật hệ thống hai quá trình nóng chảy và bay hơi ở trạng thái vi mô.

Nếu một xung laser siêu ngắn đạt được đến một cường độ cực kỳ cao, khoảng vài chục petaoat/cm² (10¹⁵), tức thì vật chất ở vùng bị chiếu xạ sẽ bị ion hoá, và sẽ phát sinh một plasma cực kỳ nóng với mật độ của một vật rắn. Đám plasma ấy sau đó nguội dần sẽ phát ra tia X cực mạnh, vì độ chói có thể sánh với các laser ruby ở thế hệ đầu tiên. Sẽ còn phải lần lần tiếp tục, chẳng hạn phải khảo sát chi tiết – với nhiều vật liệu khác nhau, động học của quá trình nung nóng khí điện tử, với quá trình thải năng lượng tiếp sau đó, cho đến lúc đạt đến cân bằng giữa các điện tử và mạng tinh thể.

D. Vi gia công vật liệu bằng laser tử ngoại và hồng ngoại

Kỹ thuật hệ thống vi mô ngày nay đang phát triển ào ạt, đưa vào cuộc sống thường ngày hàng loạt những chi tiết kết cấu cơ học, chất lỏng hay quang học. Để chế tạo ra chúng, phải có công cụ với khả năng chế tạo, thao tác những chi tiết nhỏ chỉ vài ba micromét và laser sẽ là một công cụ lý tưởng để thực hiện những chủ đích đó: chúng ta có thể hội tụ ánh sáng của nó tới thể tích nhỏ nhất, qua đó có thể nâng mật độ công suất của nó đến mức cao nhất. Khi đó những lượng lớn năng lượng, có thể điều chỉnh được liều lượng, sẽ tác động một cách có chủ đích vào vật liệu, làm cho vật liệu dày lên hoặc làm cho vật liệu mòn đi. Ngày nay nghiên cứu và sản xuất có thể dùng bất kỳ thể

loại laser nào để vi gia công những vật liệu khác nhau nhất về chủng loại. Bởi lẽ đã có đủ cả laser hồng ngoại với laser ở các vùng khả kiến và tử ngoại.

Nhưng để vi cấu trúc hoá thì laser UV (tử ngoại - *ultraviolet*) lại có ba ưu điểm có tính chất quyết định:

Một là trên nguyên tắc nó cho phép tạo ra những cấu trúc còn nhỏ hơn cả ánh sáng khả kiến và hồng ngoại. Lý do là bởi năng suất phân giải không gian của một hệ quang học vốn bị giới hạn bởi nhiễu xạ. Cho nên những cấu trúc nhỏ nhất có thể gia công được thường ở trong bậc độ lớn của bước sóng ánh sáng.

Hai là hầu hết mọi vật liệu đều hấp thụ bức xạ UV (tử ngoại), kể cả những vật liệu thường vẫn cho ánh sáng khả kiến đi qua như thủy tinh và nhiều loại nhựa nhân tạo.

Cuối cùng thì tương tác giữa xung laser UV với vật liệu ít toả nhiệt, cho nên không có nguy cơ vật liệu bị nhiệt huỷ – cũng vì vậy mà tương tác ấy còn thường được gọi là quá trình lạnh.

7.12. VI GIA CÔNG BẰNG LASER UV

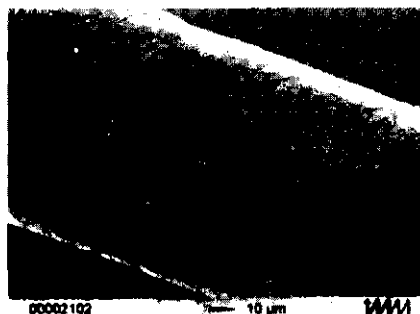
Nguồn laser UV đáng tin cậy nhất và có công suất mạnh nhất là laser excimer, được phát minh vào năm 1975. Nó hoạt động bằng hỗn hợp khí – chẳng hạn như flor, argon hoặc krypton. Nguồn laser sẽ phát xạ, khi một xung điện phóng ra cung cấp đủ năng lượng cần thiết cho hỗn hợp và kích thích các nguyên tử khí. Khi đó sẽ hình thành những phân tử như argon florua, xenon clorua... có thời gian tồn tại rất ngắn. Những phân tử này sau đó phân rã, đồng thời phát ra các photon giàu

năng lượng. Bước sóng của phát xạ cường bức ấy, tùy hỗn hợp khí, thường ở khoảng từ 157 đến 351 nm, tức là ở miền phổ tử ngoại xa. Laser excimer phát xạ ở chế độ xung, các xung này có năng lượng rất lớn và thời gian xung chỉ vào khoảng vài nanogiây, bởi lẽ chúng ta chỉ duy trì được trong một thời gian rất ngắn dòng điện phóng ra để kích thích các chất khí. Độ lặp lại xung tối đa của laser khí vào khoảng 1 kHz, còn công suất xung có thể đạt đến 100 MW.

Một hệ laser excimer thường gồm một máy laser, một hệ thấu kính để tạo chùm tia, một bàn di động cho máy tính điều khiển, trên đặt vật cần gia công. Tia laser sẽ lướt trên mặt vật phẩm di động và khắc các cấu trúc vào vật liệu. Ngoài ra, nếu đó là một hình mẫu phức tạp thì có thể chiếu xạ vật gia công thông qua một cái mặt nạ mà không cần phải di động vật.

Xung laser ngắn có thể bứt vật liệu ra khỏi vật phẩm một cách có chủ đích. Trong trường hợp này laser cấu trúc hoá bề mặt vật phẩm trong không gian ba chiều chính xác không thua gì một kiểu máy vi phay. Thông qua tương tác lạnh vừa nêu của các xung laser UV với những chất liệu nhất định, laser excimer chính là laser thích hợp nhất để gia công vật liệu như thế. Nói gia công lạnh là nói xung quanh chỗ bị chiếu xạ chỉ có một vùng vật liệu tương đối nhỏ bị nung nóng. Xung laser năng lượng cao nung nóng vật liệu rất nhanh, làm cho vật liệu bị hoá hơi. Khi đó sẽ hình thành một đám plasma nóng nhưng nó lại bị bắn ra khỏi vật liệu nhanh đến mức, chỉ rất ít nhiệt được truyền rộng ra vùng xung quanh chỗ bị chiếu xạ. Nhờ vậy mà rìa của những cấu trúc mới được tạo ra rất sắc cạnh, và rất ít

chỗ bị nung chảy hay bị thủy tinh hoá. Khi gia công bằng xung laser hồng ngoại hay khả kiến, với thời gian xung tương tự như trên thì vùng bị nung nóng rộng hơn do có “tương tác nhiệt” với vật liệu.



Hình 7.9:

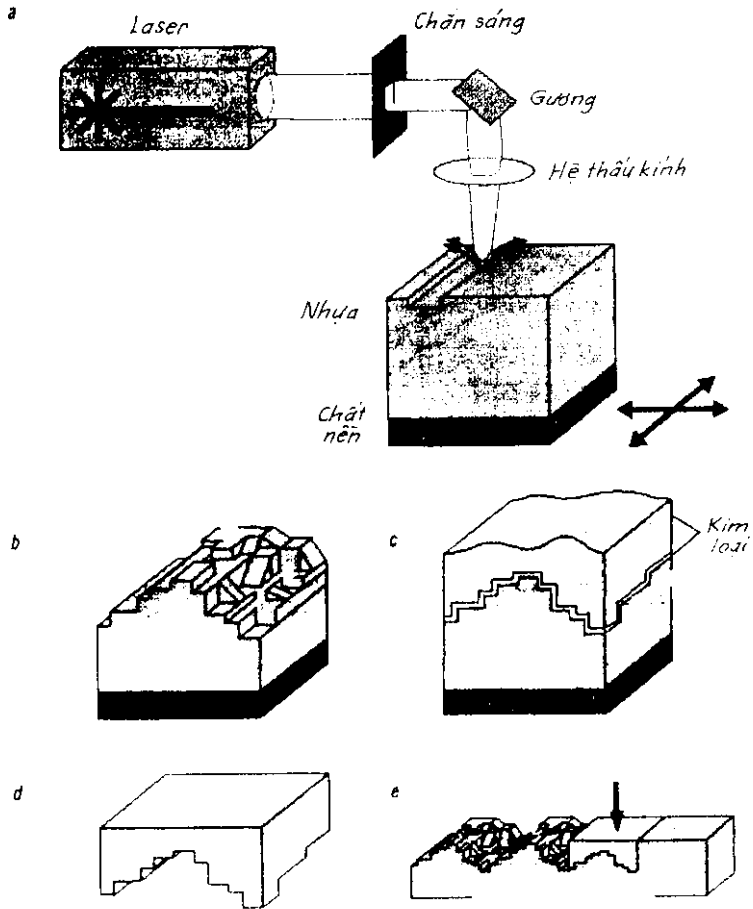
Khắc chữ trên sợi tóc bằng xung laser excimer. Bề rộng của từng nét chữ không đến 10 micromet .

Độ sâu ăn mòn sau mỗi xung phụ thuộc vào các tham số của laser, chẳng hạn như mật độ công suất, bước sóng và dĩ nhiên còn phụ thuộc vào bản chất của vật liệu được gia công. Độ sâu này thường dao động từ vài nanomet đến một micromet. Laser excimer có khả năng cấu trúc hoá nhiều loại chất liệu, chẳng hạn như gốm, thủy tinh, các lớp kim loại mỏng, thậm chí lông, tóc (xem hình 7.10). Dù công suất có thấp, khả năng búng vật liệu của nó đi vẫn cứ cao, nên bằng một cách hết sức lý tưởng, nó còn gia công được nhiều loại vật liệu nhân tạo khác, chẳng hạn như polycarbonat, polymetylmetylacrylat (thủy tinh hữu cơ). Trong lĩnh vực gia công vật liệu, laser excimer có rất nhiều ứng dụng, bởi lẽ nó có khả năng búng vật liệu đi rất đúng

chủ đích – thường được gọi là *tải mòn (ablation)*. Chính phương pháp *tải mòn* bằng laser excimer này đã cho phép khoan, cắt và cấu trúc hoá một cách chính xác.

7.13. TẠO DỰNG THẬT NHANH NGUYÊN MẪU (*RAPID PROTOTYPING*)

Viện vi kỹ thuật ở Mainz (IMM) đã chế tạo được những bộ vi cảm ứng (*microsensor*) và những đơn nguyên chất dẻo ở thể lưu (*fluidish*). Nhờ vậy, với chi phí không cao, chúng ta đã có thể gài những hệ tiểu hình hoá (*minified*) vào trong một cái chip nhỏ, thông thường cũng bằng chất dẻo. Bước vào giai đoạn quy hoạch và thử nghiệm, giờ đây các kỹ sư phải nhiều lần thay đổi thiết kế cho các phức hệ gồm toàn những vi kênh như vậy. Để tạo dựng các nguyên mẫu thì laser excimer chính là công cụ thực hiện việc ấy vừa nhanh, vừa rất hiệu quả. Vật phẩm bằng chất dẻo cần gia công được di động trên mặt bàn trượt do máy tính điều khiển, sao cho từng đơn vị bề mặt được tiếp nhận đúng một số lượng xung laser nhất định. Trước khi chạm vào mặt vật phẩm, tia laser phải đi qua một chắn sáng lỗ, và một hệ chiếu (*projection*) quang học, để xác định mặt tiếp nhận xung laser chính xác tới một vài micromet (xem hình 7.1a). Một sự biến thiên có chủ đích năng lượng xung và số lượng xung theo từng đơn vị bề mặt và độ mở của mặt nạ sẽ thực hiện được các chi tiết cấu trúc ba chiều, chẳng hạn như kênh dẫn chất lỏng có những lối vào và các chỗ hẹp. Để thực hiện các thay đổi thiết kế không khó, vì chỉ cần thay đổi lập trình cho bàn trượt, và phải chuẩn bị cho việc gia công một vật phẩm mới.

**Hình 7.10:**

Phương pháp laser LIGA: laser excimer cấu trúc hoá một lớp chất dẻo trên lớp nền (a). Phủ một lớp kim loại lên cấu trúc ấy (b) rồi bỏ vào bể điện phân cho lớp kim loại dày lên (c). Bóc tách lấy âm bản của cấu trúc sơ cấp (d). Nó được dùng làm dụng cụ đúc và đột dập để nhân cấu trúc sơ cấp thành nhiều bản trên chất dẻo (e).

7.14. LASER LIGA

Sau khi kết thúc giai đoạn quy hoạch, để sản xuất hàng loạt những hệ vi mô hết sức phức tạp, phương pháp chế tạo từng chi tiết riêng lẻ theo cách vừa mới mô tả ở trên sẽ mất nhiều thời gian và rất tốn kém. Bởi vậy IMM đã xây dựng phương pháp laser LIGA (xem hình 7.11b đến 7.11e). Theo phương pháp mới này, để làm ra một nguyên mẫu không đắt và có thể nhân ra nhiều bản theo phương pháp sản xuất hàng loạt. LIGA là cách viết tắt từ lithografy - kỹ thuật in litô và galvanofiguring - tạo dáng điện. Người ta phủ lên chất nền một lớp chất dẻo, chẳng hạn như thuỷ tinh hữu cơ hay chất quang trở (*photoresist*). Chẳng hạn như laser excimer tạo ra ở lớp này một cấu trúc nguyên bản. Lại phủ một lớp kim loại mỏng lên trên lớp chất dẻo đã được cấu trúc hoá, rồi thả vào bể mạ điện cho lớp kim loại ấy lớn dần lên, đủ thay được lớp chất dẻo mà laser sẽ búng đi. Khi tách xong lớp phủ vừa nuôi ta có bản âm bằng kim loại của cấu trúc gốc. Sau đó mài cho bề mặt nhẵn đi là chúng ta đã có trong tay một công cụ gài vào máy phun hoặc máy đột rập để nhân ra nhiều bản.

Nếu chúng ta dùng dụng cụ đột rập để khoan từng lỗ nhỏ li ti vào màng nhựa mỏng chỉ dày vài micromet, thì thông thường khó tránh khỏi sinh rãnh khía, mà màng cũng hay bị rách. Nếu sử dụng laser phát xạ ánh sáng khả kiến hay hồng ngoại cũng sẽ chẳng ổn, bởi lẽ màng ở ngoài vùng chịu chiếu xạ sẽ nóng chảy nên không thể khống chế được. Laser excimer chỉ tương tác lạnh nên sẽ không làm hại đến màng mỏng. Chẳng hạn khi người ta chế tạo van màng cho loại máy vi bơm, bằng

cách bắn các lỗ trên màng polycacbonat chỉ dày hai micromet. Lỗ lớn, nhỏ thế nào cũng tái tạo được nên bảo đảm được chất lượng không đổi cho máy vi bơm. Do khống chế được lượng vật liệu cần bứng đi nên vẫn có thể gia công chính xác, thậm chí cả những hệ gồm nhiều lớp nhựa với các chất liệu khác nhau. Chẳng hạn như trong công nghệ sinh học, chúng ta có thể khoan theo số lượng lớn lỗ vào các màng mỏng, để tạo điều kiện cho vi sinh vật phát triển theo cách đã định trước.

7.15. KỸ THUẬT IN LITÔ

Như đã nói, năng suất phân giải không gian của một hệ quang học bị giới hạn bởi bước sóng. Laser excimer là nguồn phát mạnh nhất cho ánh sáng có bước sóng ngắn, cho nên nó rất quan trọng cho kỹ thuật vi in litô trong công nghệ bán dẫn. Nguyên lý cho kỹ thuật in litô bằng laser excimer chỉ khác nguyên lý kỹ thuật in litô chuẩn duy nhất ở bước sóng ngắn. Nguồn sáng khi in litô chuẩn thông thường là đèn cao áp thủy ngân, nhưng khi sử dụng laser excimer thì bước sóng bức xạ chỉ bằng 193 nm. Nếu có các hệ chiếu quang học thích hợp có thể đạt đến những độ lớn cấu trúc tới 180 nm. Nhiều nỗ lực toàn cầu đang hướng vào việc hoàn thiện hoá phương pháp này nhằm sản xuất các vi mạch điện tử có mức tổ hợp cao cần cho những thế hệ máy tính mới.

7.16. VI KHẮC CHỮ

Có thể khắc chữ, đánh dấu bằng laser excimer trên mọi chi tiết nhỏ bằng chất dẻo, chẳng hạn như các linh kiện vi điện

tử. Cách thức đơn giản là chỉ cần cấu trúc hoá bề mặt bằng những xung laser một cách có chủ đích (xem hình 7.12). Cũng có thể dùng các hợp phần bằng chất dẻo đã trộn với một số hợp chất chuyên dùng, chúng sẽ đen lại khi bị chiếu xạ bằng ánh sáng UV. Và người ta có thể đánh dấu các cửa kính bằng một dấu màu sữa trong mờ nhờ tương tác giữa xung laser UV với vật liệu. Khắc chữ bằng laser như vậy sẽ không cần tới sơn, mực và hết sức sạch sẽ, đơn giản, dễ dàng không chế.

Trên đây mới chỉ là một số ví dụ về các khả năng đa dạng của laser excimer trong vi kỹ thuật. Ngoài ra, người ta còn dùng nó để ghi các cách tử quang học trên sợi thuỷ tinh để tạo tiếp xúc xuyên suốt qua các tấm vi mạch nhiều lớp, để khoan những vi lỗ trên thân máy bay và các đầu chịu áp lực. Đáng kể nữa là để cải biến bề mặt của vật liệu gốm, để xử lý trước trong những quá trình phủ đắp, để laser khơi mào mà kết lắng kim loại từ pha rắn, lỏng hay khí xuống mặt những chất nền bằng chất dẻo.

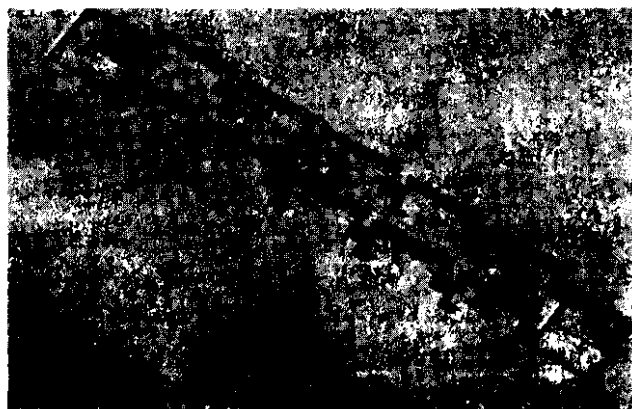
Công nghệ laser excimer thuộc hàng những lĩnh vực phát triển nhanh nhất của kỹ thuật laser. Một phần do sự bùng nổ của vi kỹ thuật, phần khác nhờ bản thân hệ laser đã gần như hoàn thiện. Chẳng hạn như vật liệu gốm chống ăn mòn đã làm tăng độ tin cậy cho các ống laser, đồng thời cũng đã làm giảm giá thành. Khoa học vẫn không ngừng đi tìm các vật liệu mới để gia công bằng laser UV. Chưa có laser nào có công suất ra sánh được với nó trong vùng tử ngoại. Chỉ duy các yêu cầu về việc cung cấp khí và tàng trữ nó là đang còn tốn kém. Cho nên thực tế vẫn đang đòi hỏi phải tìm ra được một hệ nào khác đơn giản

và rẻ tiền hơn. Trong tương lai laser neodym-YAG và những laser rắn khác có thể thay thế nó. Những loại laser này phát xạ ánh sáng trong miền hồng ngoại, ánh sáng này lại được một số tinh thể phi tuyến biến đổi thành bức xạ tử ngoại. Tiếc rằng những mất mát trong quá trình biến đổi lại quá cao, tới mức công suất ra của những hệ này đang còn thua hệ laser excimer hàng chục, nếu không muốn nói là hàng trăm lần.

Tất nhiên các laser xung siêu ngắn cũng là một phương án thay thế rất đáng lưu ý. Laser excimer phát xung có độ dài điển hình là 10 nanogiây. Khi chúng ta chiếu xạ một mẫu bằng một xung như vậy thì vật liệu nóng lên, và chỉ ngay trong phần lẻ của nanogiây đầu tiên đám mây plasma đã xuất hiện. Plasma này làm cho phần xung còn lại bị mất hội tụ, thậm chí còn chấn nó mất một phần. Những vùng giáp ranh trực tiếp với vùng bị chiếu xạ như vậy cũng sẽ bị luỷ hoại.

Với laser xung siêu ngắn, các hiệu ứng nói trên sẽ được giảm thiểu, bởi vì độ dài xung bằng chưa đầy một picogiây. Vậy là những hệ laser này có thể tạo ra những cấu trúc còn chính xác hơn cả laser excimer. Rất tiếc hiện nay chúng chưa đạt tới độ chín muồi để tiếp cận thị trường và nó vẫn đang còn được thử nghiệm tại Trung tâm Laser Hannover mà ở trên có nhắc tới, cũng như ở Cục nghiên cứu vật liệu Liên bang tại Berlin.

Cuối cùng, để gia công kim loại, phải nói đến "laser Oxford" hiện cũng đang được thử nghiệm, đó là loại laser hơi đồng, phát xạ ánh sáng trong miền khả kiến. Với đặc điểm là tần số xung cực kỳ cao, khoảng vài chục kilohec, chúng sẽ cho phép tạo ra được những quá trình hết sức nhanh.



00004829

— 300 μm 

00004830

— 50 μm 

Hình 7.11:

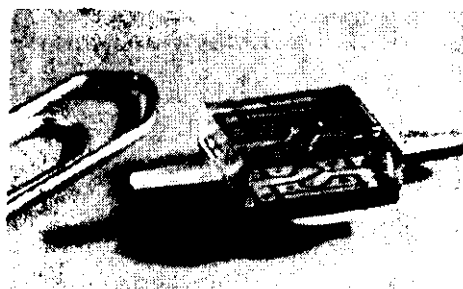
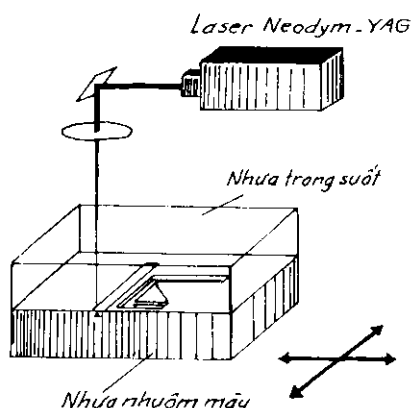
Vi cấu trúc hỗn hợp trong thủy tinh hữu cơ, do laser excimer tạo ra, phía phải là mặt cắt.

7.17. VI HÀN

Môi trường hoạt tính của laser rắn là neodym - YAG, gồm một tinh thể đã được pha tạp neodym, có tuổi thọ cao. Vậy là không còn tồn tại vấn đề phải tiếp khí như với laser excimer. Cũng chẳng hề có vấn đề khí halogen ăn mòn, và không có vấn đề phải thiết lập biện pháp bảo vệ. Loại laser này phát xạ trong miền hồng ngoại ở bước sóng 1,064 micromet. Laser neodym - YAG có nhiều ứng dụng trong vi kỹ thuật, chẳng hạn như khoan, cắt, khắc chữ lên kim loại. Đương nhiên loại laser này không tạo ra được những cấu trúc nhỏ như khi ta dùng laser tử ngoại. Thế nhưng so với laser excimer thì nó lại có điểm vượt trội: giá thành rẻ và chi phí vận hành máy cũng thấp.

Nói chung laser neodym-YAG không phù hợp để tạo ra các vi cấu trúc trên chất dẻo, bởi vì nhiều loại chất dẻo không hấp thụ bức xạ ở bước sóng trong khoảng 1 micromet. Tuy chúng ta có thể thay đổi tình thế nếu phối thêm vào đó một sắc tố làm phụ gia hấp thụ ánh sáng, nhưng lại sẽ phát sinh tương tác nhiệt với bức xạ hồng ngoại. Tương tác này sẽ khiến cho hầu như không thể vi cấu trúc hoá một cách có chủ đích bằng cách bứng vật liệu đi. Thế nhưng chính các hiệu ứng nhiệt ấy lại mở ra một khả năng ứng dụng khác vào các yêu cầu kết nối và tạo dựng, hết sức lý thú mà cũng chẳng kém quan trọng: hàn bằng laser. Các loại chất dẻo đã được nhuộm màu sẽ hấp thụ ánh sáng hồng ngoại nên chúng ta có thể hàn chúng y như hàn kim loại, chỉ cần chúng ta ép hai chi tiết cần hàn vào nhau rồi cho tia laser quét trên mối nối.

Sau đây sẽ mô tả một phương pháp hàn chịu áp lực cho những linh kiện vi lỏng (*microfluidish*) (xem hình 7.13). Chúng ta đặt lên trên vi hệ bằng chất dẻo đã được nhuộm màu một cái nắp trong suốt, còn trong hệ ấy, vẫn còn những kênh bỏ ngõ để chứa chất lỏng. Bức xạ laser chỉ lướt trên tấm nắp, song vẫn bị tấm nền hấp thụ. Tấm này nóng lên ở lớp tiếp giáp giữa hai tấm rồi hoá lỏng. Sau khi nguội dần, xung quanh diện tích chịu chiếu xạ sẽ hình thành một mối nối bền vững. Ta sẽ có một mối hàn chạy xuyên suốt, nếu như ta cho vật gia công di động tương đối với tia laser.



Hình 7.12:

Hàn bằng laser neodym-YAG, bên phải là những mối hàn màu đen ở mặt tiếp giáp giữa hai nửa linh kiện.

Kỹ thuật kết nối vừa nêu rất có ý nghĩa trong y học, hoá học và sinh học, bởi vì với những keo dán thông thường chúng

ta rất khó tránh tình trạng có những lượng keo cực nhỏ bít kín lòng kênh và dĩ nhiên là linh kiện trở thành vô dụng. Cho dù định lượng keo dán thật chính xác chẳng nữa, lại có những kết cấu cân đối để tiếp nhận lượng keo thừa đi nữa, vẫn khó tránh khỏi. Keo dán lại còn hay phản ứng với chất dẻo, làm cho mặt chất dẻo trương lên, gồ ghề. Hơn nữa, chẳng phải keo dán nào cũng tương hợp sinh học. Khi hàn bằng laser thì keo trở nên thừa. Phương pháp hàn này chính xác, sạch sẽ, cho phép tự động hoá. Một ví dụ điển hình là việc lắp ráp vi bơm ở IMM (xem hình 7.13, phải).

Vi kỹ thuật đã bước ra khỏi giai đoạn nghiên cứu cơ bản. Ngày càng có nhiều ứng dụng nên số lượng sản phẩm tăng liên tục. Vì vậy phải có những kỹ thuật gá lắp và kết nối thích hợp để làm ra những sản phẩm vi kỹ thuật có giá trị cao mà giá thành lại có thể chấp nhận được. Rõ ràng là trong tương lai phương pháp hàn bằng laser sẽ giành được chỗ đứng xứng đáng của mình.