

综合评述

量子电子学的发展

提要：回顾了以往电路电子学的一些看法，阐述微波激射器和激光器的发展对光学和光谱学所产生的影响，从历史的角度对其现状作一论述。

所谓“量子电子学”其含义包括微波激射器（简称激射器）、激光器及其应用，它是1959年以来使用的新术语。如果稍为详细的给它下一定义，那么量子电子学就是应用分子、原子、离子等和电磁波的相互作用来实现信息传递、控制、测量等工作的一门技术。

量子电子学涉及的范围较普通电子学的范围远为广泛。例如，所谓信息传递，不局限于通信和电视等，也包括利用激射器和激光器很好地起到相当于摄影、电子计算机或显微镜的作用，可以预料今后在许多方面还会有所发展。另外，所谓测量也不只是精确地测量一些通常的长度和时间，还包括测量宇宙中的氢、OH等的密度、速度和温度以及精确地分析分子的构造和原子、固体中的电子状态等，进而还可以考虑在基本粒子物理学等方面的应用。

本文在回顾量子电子学的发展以后，分析其发展的历史背景，对将来作一展望。为了解量子电子学的特征，首先叙述一下激射器的有关基本性质。

1. 激射器的基本性质

所谓激射器是通过原子和分子等从高能

级 E_2 到低能级 E_1 的受激辐射所引起的跃迁，使频率为

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (1)$$

的电磁波放大或产生振荡的一种装置。通常由于分子的转动能级差而引起的转动谱所处的频率大多在 $10^9 \sim 10^{12}$ 赫，分子的各种振动引起的振动谱所处的频率大多在 $10^{11} \sim 10^{14}$ 赫的量级，而由原子和分子的电子状态的改变所引起的光谱通常在 10^{13} 赫以上，即处于红外到紫外的区域。

因此，如果在这些跃迁上能产生激射作用，就能制成各种频率的激射器。可能产生激射作用的频率范围不局限于无线电波段，它的特征是波段范围很广，已经实现的有红外激射器、光激射器以及紫外激射器，这些激射器一般总称为激光器。X线和 γ 线的激射器虽然尚有相当的困难，但在将来还是有可能制成的。

如果只是处于激发状态的原子（或分子等）产生受激辐射，那么激射器放大时就根本没有噪声，或者以完全一定的频率振荡。但是由于激发状态的原子因自发辐射而引起的跃迁实际上是无法避免的，因而激射器用作放大器多少会有些噪声，用作振荡器频率

也多少会有些变动。尽管如此，激光器的噪声仍然只有厘米波和毫米波真空管放大器的1/100左右。

此外，激光器的振荡输出和通常的单色光源相比，振荡谱线宽度要狭许多，而且象用真空管产生的振荡波形一样，可成为连续波，这是它的特征。因而激光具有很好的相干性，成为极好的相干光源，它还可用于光的外差接收和全光照相。

由激光器射出的光不仅时间位相存在着一定的关系，而且空间位相也有着一定的关系。因此从激光器输出端表面的各点上射出的光彼此强烈地相干，仅在特定的方向上产生尖锐的发射。如果从激光器输出端各点射出的光的位相很一致，就成了平行光线，那么用透镜和反射镜聚光时，可将输出光聚集到一个很小的面积上。在这焦点上，电磁波的强度可在瞬间提高到 10^{12} 瓦/[厘米]²以上，这意味着在光频上能得到 3×10^9 伏/米以上的电场及 10^5 奥以上的磁场。或者说激光具有极高的亮度，其亮度温度可高达 10^{22} 度以上。

2. 终于填补了光和电磁波的空白

在以往使用速调管之类的微波电子管的实验中，波长最短的是由其高次谐波产生的微波频谱。如表1所示，观察到的最短波长的波谱在0.5毫米以下。

表1 用微波管的高次谐波观察到的亚毫米波波谱

波长(毫米)	分 子	年 度
0.587	OCS	1956
0.509	BrCN	1960
0.480	HCl	1964
0.433	CO	1964

表2 远红外激光器的振荡波长

波长(毫米)	物 质	年 度
0.035	Ne	1963
0.119	OH	1964
0.337	CN	1964
0.373	CN	1965
0.538	CN	1965

另一方面，最初的相干光振荡器，是波长为6,943埃的红宝石激光器，于1960年制成，以后逐步制成了长波长的振荡器。最近主要的远红外激光器的振荡波长示于表2，65年年底终于制成波长在0.5毫米以上的远红外激光器，于是光和电磁波振荡器的波长范围完全衔接。当然，来自太阳光或高温物体的热发射中，从红外到无线电波存在着连续的频(光)谱，这是众所周知的，但是在这里要强调的是用单色性强的光源或相干振荡器填补了光和电磁波的空白。

比较一下表1和表2的数字可知，与微波技术的进展相比，量子电子学的发展速度是何等之快。1961年，把固体激光器和气体激光器加在一起，从红光到近红外的2.6微米，大约只有10条振荡谱线；1962年，从0.6微米到7.2微米的波长范围内，大约有40条振荡谱线；1963年，在到35微米的波长范围内，大约有270条谱线产生振荡。1964年波长范围加宽到从紫外的0.24微米到远红外的337微米，65年年底终于获得了波长达538微米的受激发射，如今知道在到紫外的2,300埃的波段中间有一千几百条谱线产生振荡。仅在可见区域，如果计入脉冲振荡的谱线，那么单是气体激光器就可能有250条振荡谱线。即从红外到紫外的全部可见区域中，每隔不到100埃，大致就有一条谱线产生激光振荡。这主要是由于离子

激光器和分子激光器发展之故。

有些读者在担心，虽然激光器和激光器的种类确实在增加，但和当初量子电子学在报纸和杂志上所引起的盛极一时的喧嚷相比，最近看不出什么进展，似乎此路不通。这样的读者请看一下示于图 1 的激光功率输出的变迁，这是由红宝石激光器的脉冲振荡而得到的峰值输出图。

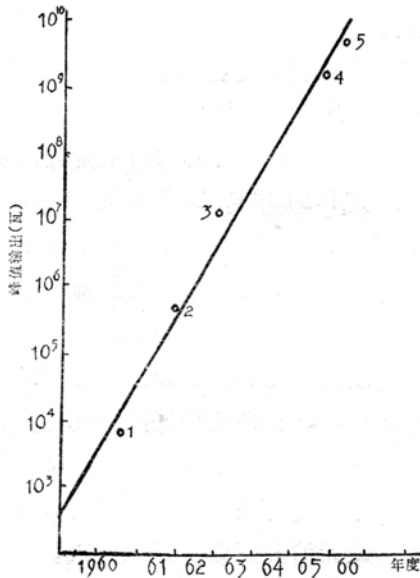


图 1 红宝石激光器脉冲振荡产生的峰值输出的增长。①T. H. Maiman *et al.*: *Phys. Rev.* **123** (1961) 1151; ②F. J. McClung and R. W. Hellwoth: *J. Appl. Phys.* **33**(1962)828; ③C. G. B. Garret: "Proc. 3rd Qu. El." eds. P. Grivet *et al.* Dunod Edit. 1964, PP971; ④P. E. Tannenwald: "Phys. Qu. El." eds. P. L. Kelley *et al.*, McGraw-Hill 1966, PP 223; ⑤1966 Internat. Quantum Electronics Conf April 1966

据报道，Maiman 于 1960 年夏首次制成的红宝石激光器的峰值输出是 5 千瓦。1961 年夏 McClung 等人在共振器中加入克尔盒，利用迅速改变共振腔 Q 值的 Q 开关法，成功地产生宽度极窄的脉冲振荡，得到约 300 千瓦的峰值输出。1962 年已能产生 1 兆

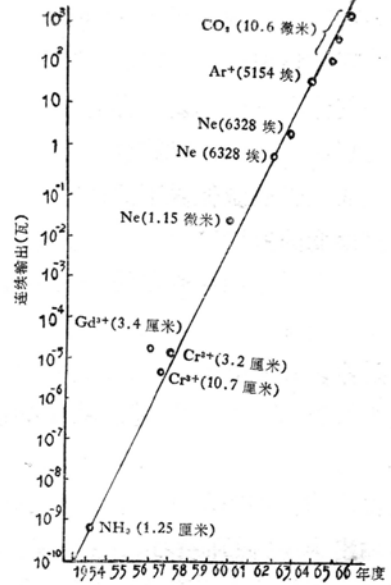


图 2 激光器及激光连续振荡输出的增长。在工作物质的化学符号右边括号内所示的数字是振荡波长。NH₃ 是分子束激光器，Gd³⁺ 和 Cr³⁺ 是顺磁物质的三能级激光器，Ne、Ar⁺、CO₂ 分别是 He-Ne 混合气体放电激光器、Ar 气体激光器、CO₂-N₂-He-H₂O 混合气体放电所引起的振荡

瓦以上的峰值输出，通过来自各种有机液体的受激喇曼效应，观察到了高次斯托克斯光及反斯托克斯光，使喇曼激光实验盛极一时。1963 年，由于旋转棱镜 Q 开关法的普及，因而实现了高达几十兆瓦的峰值输出。如果用焦距短的透镜对峰值输出约 10 兆瓦的激光束聚焦，那么在空中(焦点处)就能看到有啪、啪声的白色火花飞出，这是 1963 年的事情。

1964 年得到了 100 兆瓦以上的峰值输出，开始盛行研究激光破坏固体的现象和布里渊散射等。为了搞清上述的光放电是否可能在核聚变方面加以利用以及出于对光放电机理本身的兴趣而进行了种种研究，同时也研究了强光场下的各种过程。红宝石激光器的输出，在 1965 年约达 1 千兆瓦，至 1966

年的最高输出是3千兆瓦，能在空中飞出2米多长的猛烈的火花。用 Прохоров 的话来说，他感到在核聚变应用方面的可能性已很接近了。气体中发生上述那样的光放电，在尚未达到超高温时，能量就全部损失，因而以如此强的激光照激低温下的固态氢，可能是实现核聚变的方法之一。

其次，雷射器和激光器的连续振荡输出每年是如何增加的呢，其结果示于图2。最初的雷射器，在1954年氦分子束振荡器的连续振荡输出为 5×10^{-10} 瓦。从1956年末到1957年，使用各种顺磁物质的微波固体雷射器获得成功。如图所示，这些雷射器的微波振荡输出为10微瓦左右。

1960年末，Javan等人利用氦-氖混合气体，成功地获得了波长为1.15微米的约15毫瓦的红外激光连续振荡器。1962年，氦-氖气体激光器在可见光的6,328埃谱线上，其输出提高到100~200毫瓦；1963年，E. I. Gordon得到了近1瓦的输出，而用作喇曼散射的光源。1964年许多地方都获得了氩离子产生的4,880埃和5,145埃的蓝绿光的振荡，得到了几瓦的连续输出。

1965年用氩激光器获得了10瓦以上的输出，使用分子的红外激光器的发展更为显著，据 Patel 报导，二氧化碳激光器10.6微米的振荡得到了106瓦的连续输出，而1966年达到500瓦以上，看来得到1瓦已为期不远。将10瓦以上的红外光束射到纸和木头上，立刻就着火燃烧；如果聚光后射到玻璃板和金属板上，转瞬间就白热化，象玻璃和钨等材料，在白热后便蒸发，形成一个圆孔。将10瓦或100瓦的红外光束聚焦到直径约0.1毫米，这或许是理所当然的事。然而令人惊奇的是未经聚焦的几毫米以下的光束仍是很危险的，不留神射到手上或壁上将

会引起大的事故。

有趣的是图2和图1相同，输出几乎每年以10倍的比例增长。我认为还举不出其他的例子每年是以10分贝的比率增加的。汽油发动机和电气马达当然不消说，就是电子管的输出和原子反应堆的热输出也没有过这样的激增。由此可见量子电子学的进展是何等之快。然而由于人们能简单加以利用的能量和电力是有限的，因而，激光的输出今后几年不会以图1或者图2这样的比例增加，2~3年内大致要接近饱和值。

以上谈及波长和输出，在其他各种特性方面也有显著进展。最初的氦雷射器的频率稳定度，在1954年是 10^{-8} 量级，1961年时达到 10^{-11} 量级，现在氦雷射器至少能得到 1×10^{-13} 的绝对精度。激光器的振荡模、频率、振幅等能很好地加以控制，并可以统计地测量出激光的光子，能和量子噪声理论作详细的比较。现在性能很好的激光器其振荡谱宽或空间、时间相干性已很接近理论极限值。因而今后各种激光器的使用将越发稳定和可靠，激光的应用终将正式实现。

3. 发展的历史

和量子电子学有关的电子学和物理的主要项目作成的年份表示于表3。距今约80年以前，赫兹用火花振荡器进行实验，首次产生了电磁波。但是赫兹所产生的电磁波不是相干振荡，其振幅和位相是不断地变化的。用1906年发明的三极真空管产生无线电波的连续振荡乃是1912年的事，用三极真空管进行无线电广播，美帝是在1920年、日本是在1925年开始的。产生微波振荡的磁控管于1921年发明，从此开始了微波的研究。

电磁波谱学的最早期实验于1934年由 Cleeton 和 Williams 着手进行。他们作出波

表 3 和量子电子学有关的主要事项年表

1887年	Hertz	赫兹波的产生
1906年	Lee de Forest	三极真空管
1912年	Armstrong	反馈振荡器
1921年	Hull	磁控管
1925年	Heisenberg, Schrödinger	量子力学
1928年	Raman	喇曼效应
1934年	Clepton 等	氦的微波吸收
1939年	Variam 等	速调管
1945年	Zaboisky	顺磁共振
1946年	Bleaney 等	微波波谱
1951年	Purcell 等	核旋转的负温度, 星体氢 原子的发射光谱
1954年	Townes 等	氨激光器
1960年	Maiman	红宝石激光器
1960年	Javan	红外气体激光器
1965年	Giordmaine	光的参数振荡

长从 1 厘米至 4 厘米左右的各种磁控管, 将产生的微波射向充有氨气的橡皮轻气球, 发现氨在 1.3 厘米波长处有着强烈的吸收。这是用相干振荡器发现电磁波和分子相互作用的最早的实验。但是在这种实验中, 由于氨的压力约为 1 大气压, 振荡器的频率稳定性又差, 所以分辨率相当低。

其后在 1939 年作出速调管, 加上雷达的出现, 使微波技术获得迅速的发展。作为战时发展重点的微波技术, 到了战后已在物理、化学以及天文学等方面得到了应用。气象雷达和射电天文学的发展即是其中的例子。无线电波谱学开始于 1945 年, 当时进行了磁共振、强磁共振等实验, 并用频谱纯度较高的速调管对氨和其他低压气体的微波波谱进行研究。1946 年美英两帝国几乎同时发现氨谱线中的精细结构和超精细结构, 继而对氢和氧的微波波谱进行了精密的测量。

这种无线电波谱学的显著特点在于: 它不是象以往的光谱学那样, 用衍射光栅和棱镜对来自非相干光源的光进行测量, 而是用可任意调整其振荡频率的相干振荡器进行测

量的。同时由于在电子学的领域中能精确地测定频率, 因而只要能观察到尖锐的谱线, 测量精度是非常高的。如果将气体压力降至 1/100 毫米汞柱以下, 则谱线宽度便窄至 100 千周左右, 如测量几万兆周的微波, 精度可达 10 千周左右, 即可获得 7 位有效数字。正因为如此, 对分子结构作高精度的研究时, 广泛地使用着微波波谱这一有力工具。

不仅对分子, 而且对原子的微波波谱也进行了研究, 但是这些都是作为吸收谱加以观察的。这是由于在常温下处于热平衡的物质中微波的感应吸收一定比感应发射大的缘故。Townes 在 1951 年想到, 如果使处在微波激发状态 E_2 的分子数大于处在低能级 E_1 的分子数, 则感应发射就会占优势, 于是就能观察到微波的发射谱。并使微波的放大成为可能。Purcell 和 Pound 于 1951 年首次用核磁共振造成这样的负温度状态。

Townes 等人的实验开始于氨分子束, 1954 年才成功地制成氨分子共振频率为 23,870 兆周(波长 1.25 厘米)的分子振荡器。这是在实验室内最早观察到的微波发射谱, 用射电望远镜发现来自处于宇宙空间的氢原子的 1,420 兆周的发射光谱乃是 1951 年的事, 同年提出激光器的原理。

由于氨激光器当作放大器不甚理想, 故专门用作频率标准振荡器。1956 年到 1957 年制成的三能级固体量子放大器则作低噪声放大器使用。用三能级固体激光器使厘米波(SHF)和分米波(UHF)的高灵敏度接收成为可能, 可用于射电望远镜和宇宙通信中。

从最初的叙述可知, 微波波谱在分子和原子的光谱中是一种频率特别低的光谱。于是就企图在频率更高的谱线上实现激光作用, 终于在 1960 年成功地获得红宝石激光器的脉冲振荡和氨-氙激光器的连续振荡。这

相当于在 1921 年和 1939 年在微波领域内制成的磁控管和速调管振荡器。象微波雷达和微波波谱在这些微波电子管发展之后而得到发展一样，光和红外振荡器在 1960 年以后得到了前述的充分的发展，因而它将促进激光器的实用。不言而喻，在激光器的应用中亦可分为与微波雷达相似的实际应用和与微波波谱相同的基础应用两个方面。

从上面的叙述可知，几乎每 5~6 年就能看到新的发展，由此可以联想到 1965 年或 1966 年可能就是激光器在正式应用方面的一个新的起点。如同从微波波谱学产生激光器一样，从最近才开始的激光光谱学中也可能产生些新的东西。

以上主要叙述了振荡器的进展，此外检波器的发展也不能忘怀。由于 1906 年发明矿石检波器，使以火花振荡器作为发射机的无线电通信的可能距离飞跃伸展。以后由于真空管检波器的发展，矿石检波器就不太使用，但是速调管等微波振荡器制成后，它又再度采纳作为微波检波器，从而带来了硅、锗检波器的发展。由于追求这些半导体的整流作用，于是在 1948 年发明了晶体三极管，从而带来了固体电子学的发展，对电子计算机、人造卫星和火箭的控制和测量有着很大的贡献。

此外，半导体在量子电子学领域中也起着重要的作用。1962 年在砷化镓半导体的 pn 结上顺向通过一个大电流，成功地获得波长约 8,400 埃的半导体激光器，它以小型和高效率而引人注目。以后又制成了几种半导体激光器。如果在 PbTe 上加一压力，振荡波长甚至可超过 11 微米。最近，将强光(激光)和电子束射到半导体上激发而产生激光振荡的方法亦有所发展，CdS 和 CdSe 已能产生可见光(波长分别是 0.49 微米、0.69 微米)

的振荡，从约 $3[\text{厘米}]^2$ 的面积上得到了最高为 200 瓦的激光输出(峰值)。

以半导体作为激光，特别是红外和远红外的检波器的研究，近年来有显著的进展，试制了灵敏度好且响应快的检波器。对可见光使用硅检波器，远红外使用锗检波器，而 2 微米以上的波长则使用了锗中掺金和铟等的杂质半导体。它们需低温的工作条件。波长大于 10 微米时则必须使用液氮。最近研制出的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 半导体可在液氮温度下使用，在 10 微米附近具有最大的灵敏度，是一种时间常数为 60 毫微秒的高速光检测器。借此在长波长的红外波段中也可观察高的拍频。然而，为了进一步发展量子电子学，需要性能更好、更易使用的检波器。

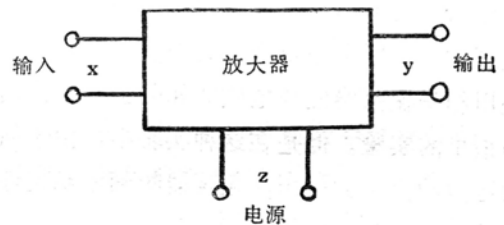


图 3 放大器是 6 端网络。如果放大器仅由线性元件组成，则增益小于 1 (就是说不是放大器，而是衰减器)

4. 量子电子学的本质

现在看一下量子电子学的特征，特别是其在科学技术中所具有的意义。众所周知，到了 20 世纪，科学技术的中心已从经典物理学过渡到现代物理学，开始强调从原子的观点看问题。固体电子学或量子电子学可以看作是由于原子物理学和固体物理学的成果而产生的一门技术。原子和分子光谱学、半导体的电子现象、磁性体等现代物理学研究的进展，产生了晶体管、激光器乃是当然的事，此外电子学的成果又被用于原子核实验和物性物理的实验中，对其发展有一定作

用。

但是电子学不仅是作为实验的手段和方法通过电子计算机发挥其作用，而且它有可能在本质上影响科学技术的基本观点。企图以一句话表示电子学的本质是困难的，但是或许可以说，它的本质在于操纵信号，或主要是利用非线性现象。甚至可以肯定这样说，在电子学的领域中其实质是使用非线性要素。例如用放大器输出和输入 x 成比例的讯号 y 时，在放大器中必须有非线性元件存在。

由于放大不单是振幅的扩大，能量也要变大，所以在输入 x 放大时，来自放大器电源的输入电流已是变化的。在线性网络中具有下列关系：

$$y = ax + bx^2 \quad (2)$$

a 和 b 为常数。为了叙述简单，假定输入、输出以及从电源各接头处看到的阻抗相等， x^2 表示输入功率， y^2 表示输出功率。如果 a 和 b 是常数，则由能量守恒定律可以证明有关系式

$$a^2 + b^2 \leq 1$$

存在。 a^2 (严格说是 $|a|^2$ 即放大率) 小于 1。因而为了能不折不扣的放大，在回路中含有非线性元件无论如何是必要的。电子管、晶体管、参量二极管、激光器即是这种非线性元件。

在具有这种非线性元件的电子放大器中，由输入 x^2 ，得到能量变大的输出 $a^2 x^2$ ($a^2 > 1$)。乍一看这一点似乎不符合能量守恒定律。以现有的物理观念来分析，这是由于忘掉了来自电源的能量之故，如果把它考虑进去，显然就不会违反能量守恒定律。这就是说，考虑来自电源的能量是极其本质的事，忘掉它是不行的。然而以电子学的观点看，单是输入和输出是重要的，电源几乎

不成问题。在画电子回路的系统时，放大器中仅画上输入和输出，这里关心的不是能量守恒法则是否满足，而是信号如何被改变的问题。

此外关于非线性现象的见解也有不同。在以往的自然科学中所谓的基本现象大致都符合线性规律，例如弹性理论、电磁学、热学、光学等都各自构成一个体系。此外，在物性物理和原子物理中，采用微扰理论，特别是一次微扰，作为解决问题的基本立场。而非线性方法即是上述理想的线性方法及微扰法则以外的又一个描述方法。

但是在电子学中，一开始就发现不采用非线性方法就无法成立，故应把非线性当作基本的现象。以往认为数学上难以处理，这当然不是基本的理由。对于 x 的任何非线性函数 y 均可以按 x 的方幂加以展开：

$$y = ax + bx^2 + cx^3 \dots \quad (3)$$

把电路中开关的作用和整流器(二极管)的作用看作是对线性特性的偏离来描述是不合适的。尽管如此，以往在分析电子回路时，虽则是一个非线性问题，为使其线性化，因而采用小信号的分析方法。

最近由于大功率输出激光器的发展，在可见光和红外波段中已能产生 10^7 伏/厘米或 10^8 伏/厘米的电场和几万奥斯特或几十万奥斯特的磁场，光学现象和电磁现象大大超出常规区域，非线性效应不断发现，非线性光学已十分普遍，于是人们发现以往的光学理论只不过是一种小信号近似而已。在这里，决定光的直线传播、反射、折射或由原子和分子引起光的吸收和发射频率的波耳条件(1)亦改变了。如强激光照射物质时，则有以

$$E_2 - E_1 = 2h\nu$$

的关系式表示的双光子吸收，或者以

$$h\nu_s = E_1 + h\nu - E_2$$

表示的频率为 ν_s 的斯托克斯光发射出来。迄今已经证实，如使用极强的激光，甚至可引起 7 个光子的吸收。

被认为是古典光学基础的光的反射和折射定律，对量子电子学说来，也必须重新考虑。如以某一入射角将频率为 ν 的光射到金属和半导体的表面上，则频率为 2ν 或 3ν 的光将以不同的角度分布射出。另外，对于折射也会发生同样的情况，如以激光照射石英或 KDP 晶体时，便有波长为一半的或为 $1/3$ 的光射出。这些反射光的角度和强度须用非线性光学的反射折射定律表示，通常的反射折射定律只是光强为无限弱时的一种近似。此外，在激光实验中，多数物质的折射率并不一定是常数，随强度而变化，当激光是偏振光，且无光入射时是各向同性的媒质，也会显示出双折射现象。

光的自陷现象是能很好显示这种非线性折射效应的一例。激光似乎本来就不能在均匀介质中直线地传播。用透镜将激光聚集到二硫化碳液体中*，当光弱时如图 4(a) 所示，激光直线传播；当光强时如图 4(b) 所示，聚集在焦点附近的激光封闭成细束传播下去。红宝石激光的自陷使其激光封闭在直径为 6 微米的细束中。其原因在于将强光聚焦时，可使其部分媒质的折射率变大，因而就象在波导管传播微波的相同的作用下，便自然而然地形成了封闭光的波导管[图 4(c)]

此外光的吸收系数也不是一定的，因光强而变。随着物质种类的不同，当光强增加时，有的是吸收系数变大，也有的是变小，这种特性较为显著的物质大都用作量子电子学的器件。在液体中、固体中、气体中，由于喇曼散射和布里渊散射，光稍有衰减，但当超过某种程度的强光入射时，便会引起感

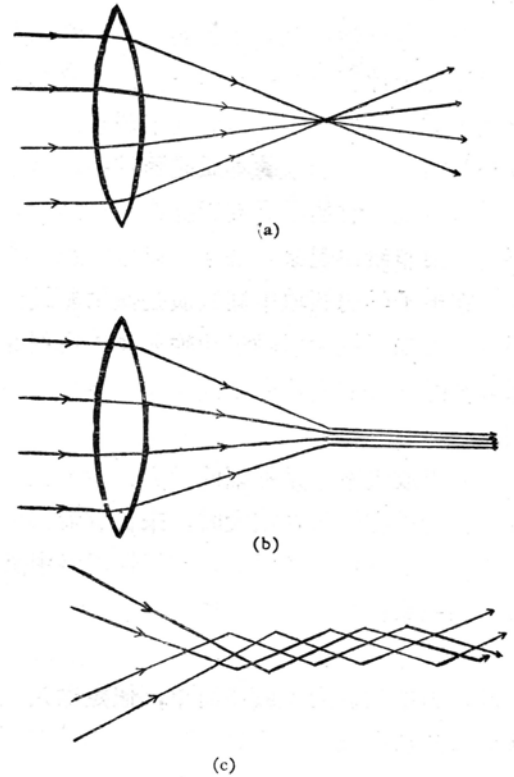


图 4 将光射入二硫化碳等溶液中引起的光的自陷。光弱时，如(a)所示，直线传播；光变强时，如(b)所示，引起自陷。这可以看作在折射率变大的部分波的分量被强光捕获，如(c)所示，一边全反射一边前进

应喇曼散射和感应布里渊散射，因而就会强烈吸收这种强入射光。此外，作为韧致辐射的逆过程，在强光下会发射高速电子，由前述的多光子吸收和由此而引起的原子电离也会产生非线性吸收。

量子电子学发展的结果，在各种光学现象、电磁现象、光和原子以及分子的相互作用中一般都发现有非线性效应，并开始积极地对其加以利用。激光的变换或控制，例如高次谐波的发生，和频和差频的发生，调制

* 用苯、硝基苯及其他许多媒质，一般都会发生这种现象。

等,以及最近才实现的可变频率的光参量振荡等均是这种非线性效应。同时也产生了应用多重量子跃迁和饱和效应的光谱学研究技术。

因而,它涉及的不仅是电子回路(以非线性效应作信息处理为中心工作)的较窄的领域,而且涉及范围极广的光学及光谱学现象。可以说量子电子学在某种程度上改变了我们对自然界的认识。

自然科学是通过我们从自然界发掘新的知识,对它进行解释而得到发展的。在我们的实验观察手段尚未涉及到的地方,一直存在着许多未知的宝库,诸如用宇宙线和加速器实验产生的高能现象、宇宙空间的各种现象、生命现象等。而激光器的发展,实现了频率较无线电波更高的极其相干的电磁波和以往连考虑也无法考虑的强磁场,从另一个

新的角度上表达了丰富多采的自然现象。

积极而彻底地追究物质的非线性特性往往会认清被遗忘了的物理学的本质,并由此推进量子电子学技术。因而量子电子学将随着在宇宙空间的研究及其应用,或随着生物物理的研究和医学应用的发展而有着锦绣的前程。

量子电子学的研究人员感到欣幸的一件事是,象基础和应用、实验和理论这种往往对立的部分,在这里并不是各自独立的,而是密切联系的,令人感到科学的休戚相关。量子电子学把已经分化和陈旧了的各种科学领域结合起来,给这些部分带来新的生气,这种例子是很多的。量子电子学由于其潜力很大,所以虽然目前企图对它运用自如或许尚有相当困难,但将来还是很有希望的。

译自 霜田光一,《自然》,1966(7月),№7,17~24

半 导 体 激 光 器

提要: 本文评论半导体激光器的工作,讨论运转的原理。重点放在1964年以后。对GaAs结型激光器的工艺现况作了描述。

自从1962年第一次观察到GaAs的受激发射以后^[1~3],半导体激光器领域取得了不小的进展。许多种材料都已制成激光器。相干辐射的波长已经由可见光伸展到紫外^[4~4a]和远红外^[5~6],波段的两端还很可能进一步延展。已采用了好几种泵浦方法: $p-n$ 结^[1~3]、电子束^[7~7a]、光泵法^[8~8a]和雪崩衰减注入^[9]。

本文将评论半导体激光器方面的研究工作。为完整起见,将讨论工作原理。早至1964年2月的早期工作,以及激光器的原理已发表于较早的文章,即G. Burns和本

文作者所写的“ $P-N$ 结型激光器”^[10]。因此,本文只简略谈及早期的研究工作。准备着重讨论的是更新近的发展和工艺现况。最近还有其他一些评论文章^[11~14]。

一、工作原理

在激光器中,受激发射是通过集居数反转来完成的。当高能级被电子填充的几率比低能级大时,就在这两个电子能级间发生反转。如果一个能量等于两能态间距 $h\nu$ 的光量子感应向下跃迁的几率大于向上跃迁的几率,就导致纯净受激发射。若能制成合适的