

- [57] Franken, Hill, Peters, Weinreich, *ibid.* 7, 118 (1961); P. A. Franken and J. F. Ward, *Rev. Mod. Phys.* 35, 23 (1963).
- [58] J. A. Giordmaine, *Phys. Rev. Letters* 8, 19 (1962); Terhune, Maker, Savage, *Appl. Phys. Letters* 2, 54 (1963).
- [59] J. Ducuing and N. Bloembergen, *Phys. Rev. Letters* 10, 474 (1963).
- [60] Armstrong, Bloembergen, Ducuing, Pershan, *Phys. Rev.* 127, 1918 (1962); N. Bloembergen and P. S. Pershan, *ibid.* 128, 606 (1962).
- [61] Chiao, Garmire, Townes, *Proc. Course XXXI, Enrico Fermi International School of Physics* (Academic Press, New York, 1964).
- [62] Chiao, Townes, Stoicheff, *Phys. Rev. Letters* 12, 592 (1964).
- [63] C. H. Townes, in *Quantum Electronics*, C. H. Townes, Ed. (Columbia Univ. Press, New York, 1960), p. 402; C. Kittel, *Phys. Rev. Letters* 6, 449 (1961).
- [64] E. B. Tucker, *Phys. Rev. Letters* 6, 547 (1961).
- [65] L. Brillouin, *Ann. Phys. Paris* 17, 88 (1922); M. Born and K. Wang, *Dynamical Theory of Crystal Lattices* (Oxford Univ. Press, New York, 1964).

原载 *Science*, 1965, 149, №3686, 831~841(梁培辉译 向立人校)

美国激光技术进展見聞

难波 进

激光是目前发展最为迅速的研究领域之一，美国在这方面相继报道了一些新的课题。

作者在1964年4月23日至5月28日及1965年3月31日至4月25日曾两度访问美国，相隔刚好差不多一年的时间，有机会看到了这一年中美国激光技术日新月异的进展情况。作者访问了美国各地有关研究所、大学及工厂，主要考察了与微型电子学有关的各种技术，其间，同时也对激光技术进行了考察。虽然并不是激光的专门考察，其内容亦不很充分，但是，鉴于这一年来激光技术的发展，作者愿谈一下自己的见闻及感受。

1964年的研究课题

作者在1964年春访问美国期间，听到了关于激光研究的两个新课题，一个是可以产生稳定连续振荡的固体激光工作物质钇铝石榴石($Y_3Al_5O_{12}$ ，简称为YAG，以下同)；另一个是输出功率比普通气体激光器大若干个数量级的氩激光器。这些都已发表在1964年4月至5月的《应用物理通讯》(*Appl. Phys. Lett.*)上，并且事先在学会上作过报告。关于YAG的情况，在以后的访问期间，未能再度看到。然而，在6月中旬归国途中，访问登维尔(Denver)时，在实验天文物理联合研究所看到了氩激光器。该台装置以脉冲方式工作，观察到了很强的绿光输出，现在回忆起来仍记忆犹新。在学会报告之后两个月，该所年青的研究工作者闻讯后，立即开始着手试制，并在当月成功地获得了振荡。

另一个感到兴趣的是于 1964 年春学术报告会前后，在《应用物理通讯》上发表的光调制用晶体 KTN($\text{KTa}_{0.65}\text{Nb}_{0.35}\text{O}_3$)。过去用 KDP、ADP 及 CuCl 等材料作为光调制元件，为获得 100% 的调制，都需要 1 万伏以上的电压，且在微波波段很难获得较深的调制；利用 KTN 晶体，只需加上 330 伏的直流偏压及 16 伏的调制电压就可以得到 100% 的调制，这是很惊人的。遗憾的是回国前没有看到这种晶体。

上述课题，在不到一年的时间，究竟进展情况如何，是作者第二次访美时最感兴趣的问题之一。

一年来的进展

(1) YAG

在 1964 年春，美国贝耳电话研究所及美国无线电公司几乎同时发表了 YAG 的研究结果，贝耳电话研究所在 YAG 中掺了 Nd^{3+} ，美国无线电公司在 YAG 中掺入 Nd 及 Cr 两种离子，后者作为敏化剂。

今年在美国无线电公司会见负责工作物质的研究人员时，发现他们已不再进行 YAG 的研究工作了，理由是现在可以由林德公司买到 YAG 晶体，而且价格比自己制作的便宜。掺有两种离子的 YAG 晶体，直径 3 毫米、长 40 毫米的棒，每根价格 2,000 美元。然而仅有两三个实验室使用这种晶体获得了连续振荡，他们用小型的汞灯作激发光源，YAG 用水冷却。

科拉德公司已研制出以 YAG : Nd^{3+} 为工作物质、以丝钨灯作激发光源、采用水冷方式的激光器。输入功率为 1 千瓦时，可获得 0.5~1 瓦的连续输出，现已成为商品出售，其中 YAG (价 1,500 美元) 是林德公司生产的。

贝耳电话研究所在新晶体研究方面一向具有较强的阵容，以尤特特 (Uitert) 为首的研究人员继续进行着晶体生长方面的研究工作。目前 YAG 的体积可生长到 4 立方吋左右，可以做成 4~5 根小棒，现仍在向生长大晶体方向努力。此外，还在 YAG 中加入其他各种离子，并比较其振荡特性间的关系。目前正在生长掺有 Er、Nd、Mn、Pr、Tb 以及同时掺有 Er-Tm、Er-Ho、Cr-Nd 等两种激活离子的 YAG 晶体。

振荡特性最好的是掺有 Er-Tm 及 Er-Ho 等两种激活离子的 YAG 晶体。其理由如下：Er-Tm 及 Er-Ho 的能级如图 1 所示，光泵将低能态粒子激发到 Er 的 $^4I_{13/2}$ 能级，再跃迁到 Tm 的 3H_4 或 Ho 的 5I_7 能级上，由 $^3H_4 \rightarrow$ 基态的跃迁即产生激光。这种场合，其必要条件是 Er 的能级寿命比 Tm 或 Ho 的寿命短，这一条件，以 Er-Tm, Er-Ho 的组合即可满足。这样就可以获得非常稳定、噪声较小的连续振荡。

另外，Cr-Nd 组合，由于 Cr 敏化作用，比只掺 Nd 时阈值减小一半，但是，因为 Cr 能级寿命(数毫秒)比 Nd 的寿命(数百微秒)长，所以上述条件不满足，因此，输出激光噪声大，脉冲工作较为容易。在该所已研制的材料中，以掺有 Ho-Er 的 YAG 晶体产生连续振荡效果最好。

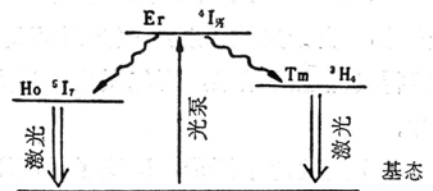


图 1 YAG : Er, Ho 及 YAG : Er, Tm 能级图

该所作为新材料探索的还有 $\text{CaMoO}_4 : \text{Nd}$ 、 $\text{PbMoO}_4 : \text{Nd}$ 、 $\text{SrMoO}_4 : \text{Nd}$ 等晶体，其中 $\text{CaMoO}_4 : \text{Nd}$ 已成功地得到了受激振荡。后两种仅从研究人员那里听到了成功的消息，但尚未正式见到报导。尤特是晶体生长方面的专家，他对晶体生长有极大的兴趣，但他对所生长出的晶体是否能产生振荡，似乎并不太关心。

我们常感到日本对于工作物质的研究工作展开得过于迟缓，在 YAG 晶体上亦使人产生同样的感慨。在美国，他们在报告发表后不到一年的时间里研究所需要的材料就已经大批生产，并成为商品。

(2) 氩激光器

如上所述，氩激光器是 1964 年春由休斯公司及贝耳电话研究所几乎同时发表的，氩激光器使用的是自身的激发能级，在这一点上与其他气体激光器有很大不同。这种激光器的特点是可以获得大功率输出，而且，输出波长较短。过去的气体激光器，当输入功率增加到某一值时，输出功率最大，再继续增大输入功率，输出反而减小；所以超过某一极限值之后，欲使输出功率增加就不可能了。但是氩激光器在连续振荡时，输出功率与输入电流的平方成正比，脉冲振荡时，与输入电流的四次方成正比，因此，增大输入电流，输出功率有可能大为增加。目前虽然氩激光器的激发机理还不十分清楚，但是绝不应放弃这种大有希望的激光器，并使其在技术上更趋完善。

作者在美国所看到的该种类型激光器的结构如图 2 所示，输出功率较小，约 1 瓦左右。目前正在研制输出功率为 25 瓦的氩激光器。一般说来，连续输出 25 瓦是相当可观的，它比太阳光（在地面上的辐射强度为 0.1 瓦/厘米^2 ）的强度大数百倍。输出激光发散角约为 10^{-4} 弧度，因此用透镜聚焦成数微米的光点，就可以得到 10^7 瓦/厘米^2 的连续点光源，这在激光应用方面具有非常重大的意义。

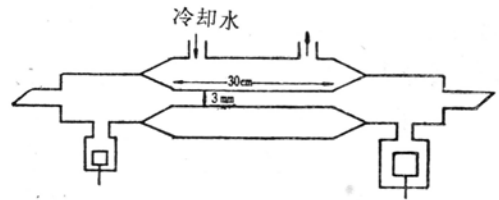


图 2 氩激光器管结构

输出功率为 1 瓦的小型激光器，管径为 2 毫米，长为 30 厘米，输入电流约为 20 安培，因此石英管壁要用水冷却，否则，管壁有软化的危险。输出为 25 瓦时，输入功率约为 35 千瓦。由于石英管壁不能经久耐用，所以需采用陶瓷管，并用水冷却。输出功率再高时，可绕上线圈利用箍缩效应使管内等离子体变细，这不但保护了器壁，而且由于电流密度增大，还可使输出功率增加。因而获得了效率为千分之一的连续输出氩激光器。

顺便谈一下，利用氩激光器摄影，可以得到非常漂亮的全光照相。过去使用氩-氖激光器，由于光线较弱，曝光时间约需数分钟，因此，在摄影过程中由于振动等原因，不能得到满意的结果，而氩激光器曝光时间在 1 秒以下即可完成，所以可获得非常清晰的照片。

上述的两个例子，反映了美国激光基础研究及新方向探索等情况，它是激光技术的新领域，因此亦特别引人注意。

激光输出的新记录

(1) 巨脉冲激光器

科拉德公司对图 3 所示的装置进行了极限输出功率的实验。红宝石-1 及作为 Q 开关元件的克尔盒产生巨脉冲，再使其通过具放大作用的红宝石-2，以获得高功率输出。所使用的两根红宝石的直径为 3/4 吋，长为 9 吋。该装置在不用放大时，得到 500~2,500 兆瓦的激光输出，利用放大时，得到 2,000~6,000 兆瓦。当输出为 6,000 兆瓦时，放大用的红宝石-2 已损坏，棒中出现气泡，因此，输出功率不可能再提高，估计 6,000 兆瓦的输出是目前采用的红宝石的最高输出极限。

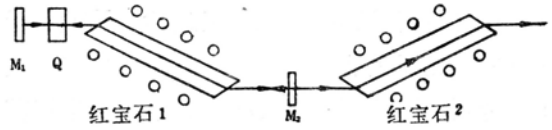


图 3 巨脉冲激光装置

M₁: 百分之百的反射镜, M₂: 百分之几十的反射镜, Q: Q 开关元件, 红宝石-1: 产生巨脉冲, 红宝石-2: 放大巨脉冲

(2) 大能量输出

在美国联合航空公司，迪默瑞 (Demaria) 在进行大能量方面的实验。正在把 20 万焦耳的电容器储能机构及充电电源、电感等排列在一个相当大的房间里，以组成激光实验的核心部分。他拟利用这套装置获得 3,000 焦耳的能量输出，这可能是目前公开发表的激光大能量输出的最高记录。激光总体部分是由两端磨成布儒斯特角、直径 1 厘米、长 1 米的铍玻璃棒及两支直管型氙灯组成的，直接采用铝箔包起来构成聚光系统。工作物质采用水冷外套。它还有防止紫外光照射使铍玻璃棒劣化的作用，据说一根玻璃棒价值 5,000 美元。

据进行玻璃激光器实验的人讲，棒的机械强度很差，在实验中需特别注意，否则将造成很大的损失。迪默瑞目前正用这台装置研究高能输出的激光振荡特性。

激光的一般研究

上面叙述了在这一年里特别引人注意的技术进展及创造了激光记录的研究工作，下面简略叙述一下一般激光的进展情况。

(1) 巨脉冲激光器

目前大多数从事激光研究的科研人员都使用巨脉冲激光器进行与非线性光学有关的科学研究。这一领域有着日新月异的进展，然而若将使用和制作巨脉冲这两个领域作一比较的话，作者本人对后者的兴趣来得更大些。

虽然，获得巨脉冲有种种不同的方法，但目前大体上都采用以下三种：

- (i) 利用转镜或旋转棱镜法；
- (ii) 利用硝基苯克尔盒或 KDP 盒等电开关法；
- (iii) 利用有色溶液(染料)或滤光吸收饱和法。

上述方法各有其特点。从输出功率角度来看，(i) > (ii) > (iii)，(i) 法可获得最大的输出功率。从光谱的锐度来看，则刚好相反，(iii) 法的锐度最佳。虽然日本绝大多数研究人员都采用 (i) 法，但是应当考虑每个方法的特点，以便合理使用。

例如科拉德公司的许多巨脉冲激光装置，都没有采用转镜结构，其理由在于装置中加入这种机械部分是令人讨厌的，同时转镜亦易于损坏。利用有色溶液及电开关法均可作成 Q 开关，但他们使用的有色溶液都是自己合成的，硝基苯也是自己制备自己提纯的。市场上出售的硝基苯呈橙色，提纯后为鲜黄色，在间隔为 1 吋的电极之间加 20 千伏电压时，漏电流为 1 微安。虽然市场上可以买到现成的材料，但不一定能满足实验要求。也有由于纯度不高而使实验中途而废的情况，这一点作者深有体会。

在科拉德公司另一感到兴趣的是钽玻璃激光器与有色溶液组合而成的巨脉冲激光器。这种类型激光器虽然在日本的实验室也进行过实验，但尚未成功。对于玻璃激光器的条件要求比较苛刻，即使有一点吸收，也不能产生振荡。因此，设法寻找对 1.06 微米的激光不吸收的溶剂是首要问题。这种方法，目前日本已不再继续研究，而在采用看来是比较容易稳妥的转镜法方面作了一些努力。但是，科拉德公司的同事们，全力以赴地进行了该种溶液的探索，终于在 1964 年获得成功。该公司为了保持该项专利，对所用溶剂采取了极端保密的态度。

与巨脉冲有关的，是产生高次谐波实验，采用输出功率较低(5 兆瓦)的红宝石巨脉冲激光器，可以获得变换效率为 10% 的二次谐波，高次谐波的角宽度为 10^{-3} 弧度，而且，单色性相当好，实验布置如图 4。

利用对红宝石激光 6,943 埃不发光而对紫外发光的荧光溶液来观察高次波的产生，开始时看不到荧光，插入 KDP 晶体后，即

使产生了约为入射光百分之几的高次谐波，亦足以使荧光溶液发出强光，当有荧光出现时，就表明有高次谐波产生。

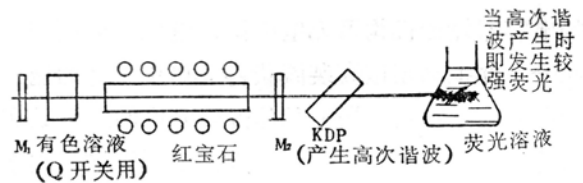


图 4 红宝石实验装置

(2) 输出激光的偏转方向控制

激光的方向偏转在应用方面是非常重要的，采用电学方法进行高速度的方向偏转控制是相当困难的。图 5 所示是利用超声波改变盒中溶液折射率的大小而使输出激光方向偏转的装置，此外还有把不均匀电场加到 KDP 晶体上使其折射率变化，以得到偏转。这些方法均已有过报导，但其偏转角均小于 1 度。另外还有如图 6 所示，用电压来改变激光振荡本身的方向(称为扫描型激光器)。这种方法是在谐振腔中加入一个相位差板，以补偿因光通过克尔盒所产生的相位滞后，这样在被补偿的方向上，可以得到 Q 值很高的振荡。在克尔盒中光的滞后

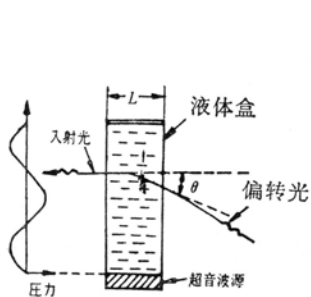


图 5 用超声波的激光偏转法

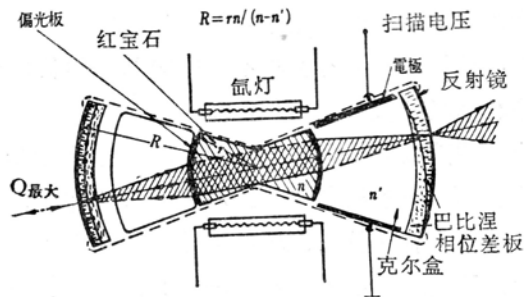


图 6 扫描激光器的原理图

的大小是通过加在盒上的电压来控制的,因此可以在任意方向上产生振荡。此法可使输出激光在很宽的圆锥角内扫描,但是,这种谐振腔的结构非常复杂,改变连续输出激光的方向的装置亦未制成。虽然听到过一些关于激光大角度偏转的某些谈论,但目前关于具体情况都还保密。

(3)加工用激光器

以加工为目的的激光装置,不需要太高的能量。但输出稳定、操作简便迅速却是首要条件。为此,棒的冷却、灯的寿命、主体及电源的设计等均需深入地进行研究。工作物质采用红宝石或钽玻璃,据作者所知,棒的冷却都是采用水冷方法。工作物质为钽玻璃时,由于紫外光照射,棒要劣化,因此,采用水冷方法,它同时有冷却棒及吸收紫外光等两种效果。通常棒的尺寸是:红宝石约为6~8吋,钽玻璃为50厘米左右。一般应用时,输出为10~20焦耳。在足够大的输入功率下,输出可达100焦耳。

氙灯的使用寿命,在输出为10~20焦耳的条件下使用时,约为5,000次,输出为100焦耳时,仅数十次。因此,需要进一步改进。氙灯的结构如图7所示,在其中心处,置入红宝石棒,棒与氙灯之间通水,两者均可冷却。目前正在制作可输入15,000焦耳的氙灯。这种激光装置的效率可望在4%以上,即当输入为15,000焦耳时,可获得600焦耳的输出。

常见的操作速度为每秒10次(每次数焦耳),最快可达每秒100次(每次输出0.5焦耳)。但是对于一般的焊接或加工,调整工件最低需要1秒钟,所以作者认为,每秒1次每次300焦耳左右是比较实用的。图8为激光焊接装置。

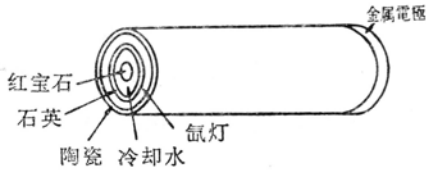


图7 氙灯结构

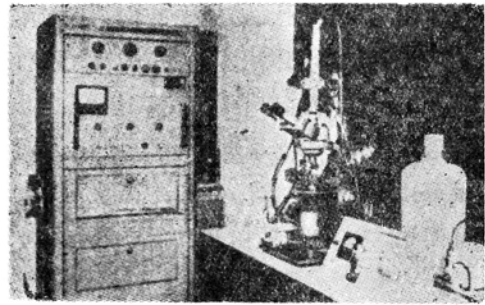


图8 激光焊接装置

加工及焊接已多次进行过实验。图9为激光振荡时间与焊接厚度的关系,在同一功率水平下,振荡时间愈长,焊接的厚度愈厚。此外,还进行了焊接部位的强度、硬度变化等实验,最佳焊接条件是在比蒸发温度略低的情况下进行的,这时可以获得满意的结果。过分提高单位面积上的能量时,蒸发损耗变大,焊接部位气泡增多,强度变低。图10为焊接直径为0.5毫米的两根镍线时,输出能量与焊接强度的关系。最佳焊接条件大约为

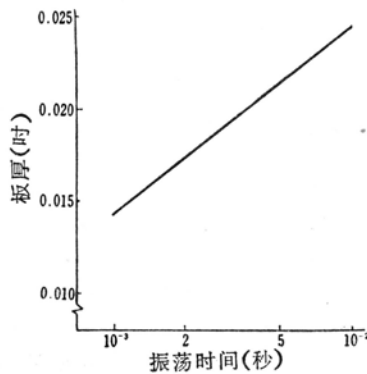


图9 振荡时间与可能焊接的板厚关系

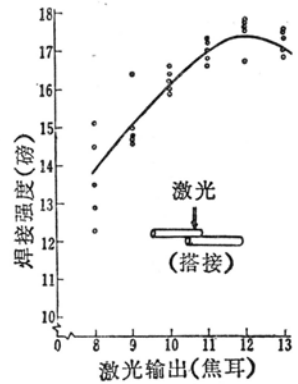


图10 激光输出与焊接强度(0.5毫米的镍线搭接)

12 焦耳。一般不易获得这样长的振荡时间，在电源加入电感后，可使脉冲持续时间拉长到 3~4 毫秒范围内。这种装置虽仍有一定的缺陷，但已经接近于实用阶段。

(4) 激光凝固机

用激光器可以作成眼科医疗器械，它可以使剥落的视网膜融接起来，照片 11 所示的装置目前已大批生产。该种装置的最大输出为 125 毫焦耳，振荡时间为 0.2 毫秒，最大操作次数为每分钟 10 次，光束角宽度为 $0.5 \sim 5^\circ$ 。

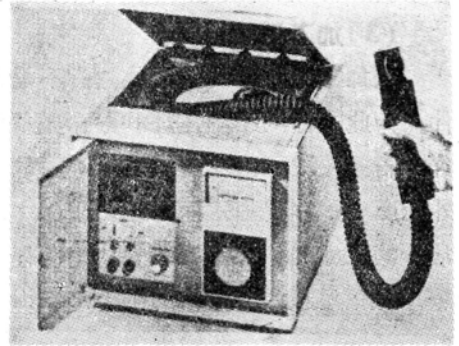


图 11 视网膜凝固机

(5) 用电子束激励的半导体激光器

以前均利用注入电流使 p-n 结发光的方法，因此只能采用制作 p-n 结比较容易且比电阻小的半导体材料。

1964 年利用电子束激励获得成功之后，对各种半导体材料进行了广泛的试验。激励方法如图 12 所示，当加速电压为 30 千伏时，电子束侵入最大深度约为数微米，所以在很小体积内可以获得大量的电子-空穴对。当 30 千伏的加速电子打到砷化镓上时，一个加速电子可以产生 5,000~8,000 个电子-空穴对。由于这种方法可以不用 p-n 结，比电阻高也可以，所以，半导体材料的选择范围很广，CdS 材料估计亦可使用，这是一项值得注意的新技术。

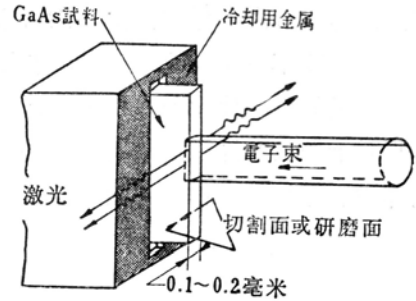


图 12 用电子束激励的半导体激光器

表 1 半 导 体 激 光 器

激光工作物质	波 长 (微米)	工 作 温 度 (°K)	备 注
p-GaAs	0.841	4.2	已获振荡
n-GaAs	~0.81	77	"
InAs	3.00	20	"
InSb	4.95	20	"
GaSb	1.53	20	"
CdS	0.479	4.2	已观察到受激发射现象(荧光谱线宽度变窄)
Te	3.72	20	

原载《电子材料》1965, 4, №10, 13~18(滕永禄摘译 屠世谷校)