

他负责研制成功的 1 兆位汉字 ROM, VLSI 芯片, 集成度突破了 100 万晶体管, 为我国自力更生建立 1—1.5 μm 成套工艺技术作出了重大贡献。

他指导研究生在器件物理, 微电子基础技术, 电路等方面进行了大量研究工作, 主要成果有: (1) 对 Si/SiO₂ 界面电子态的研究, 创建了一种“脉冲 Q(V) 瞬态谱法”, 用此方法可以探明界面态在全禁带的分布, 得到国际学术界的重视。

(2) 他研制成功 MOS 电流型多值逻辑电路, 并完成了 CMOS 电流型高速模糊逻辑微处理器芯片的设计, 为他领导的系统集成技术打

下良好的基础。这项工作国际上少量的先驱工作之一, 达到国际先进水平。

(3) 他与钱佩信教授合作发明的快速热处理技术和设备, 获国家发明二等奖, 取得国际工业界的好评, 设备已向香港出口。李志坚先后发表论文 100 余篇, 曾四次被聘为 IC 有关国际会议国际顾问委员会委员, 在国际上有较大影响。

他是中国电子学会副理事长, 中国半导体和集成技术专业学会副主任委员, 国家自然科学基金奖励委员会委员, 获国家级有突出贡献专家和全国劳动模范称号。

(中国科学院技术科学部办公室)

论激光诞生和发展的动力

徐 启 阳

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

激光是 20 世纪 60 年代初出现的一门新兴科学技术, 它的诞生道路曲折, 但发展迅速。受激辐射理论的提出和量子电子学的发展是激光诞生的内动力, 军事上的需要是激光诞生的直接外动力; 激光的优异特性和基础研究是激光发展的内动力, 社会的需要和现代科学技术手段的具备是激光迅速发展的外动力。

一、简单的回顾和展望

1907 年爱因斯坦提出受激辐射概念^[1], 并在 1933 年 Ladendury 和 Kopferman 等人的实验中得到证实, 这为激光的诞生奠定了理论基础。1954 年汤斯和他的两个学生成功地制造了波长为 1.25cm 的氨分子振荡器, 即微波激光放大器。1958 年汤斯和肖洛, 巴索夫和普罗克霍夫分别提出激光的概念, 1960 年由美国梅曼研制成世界上的第一台激光器, 宣布了激光器的诞生。

经过 30 年的不懈努力, 激光器件已发展到相当高的水平^[2]。例如, 激光输出波长覆盖了 X 射线到毫米波段, 其中相当部分可连续调谐,

脉冲输出功率密度超过 10¹⁹W/cm², 最短的光脉冲达 6 × 10⁻¹⁵s 等。大部分器件逐步系列化和商品化, 使激光成功地渗透到近代科学技术的各个领域。在科学研究方面, 激光把原子物理、分子物理、化学动力学等科学推进到新的阶段, 开创了非线性光学、激光光谱学、量子光谱等新学科; 在技术应用上, 激光成了材料加工处理、医疗技术的新工具, 尤其是与信息工业的结合, 使光盘、激光印刷迅速形成了产业, 有了很大的市场。射束武器、核聚变和同位素分离是激光的重大应用项目, 它们既是高技术的集中表现, 又服务于国际的竞争与斗争。美国战略防御倡议计划(即星球大战计划), 是一个争议极大的项目, 但不可否认的事实是激光在国

际舞台上扮演着重要角色。1991年春季的海湾战争，用激光制导的炮弹和炸弹一次又一次准确射向伊拉克的目标，以及各种激光探测和光电子对抗技术的成功应用，都显示了激光与其他先进技术相结合所产生的无比威力和成就。目前激光核聚变尚未达到发电的阶段，但其实验装置模拟核爆炸，帮助了核武器的设计评估。70年代末原子法激光分离同位素技术上取得突破，显示出巨大的经济价值，继美国之后，法国、日本等发达国家，以及个别发展中国家，都先后投入了力量发展和跟踪这一项目。迄今，分离同位素是激光重大应用中最先取得成功的例子。

激光的诞生和发展过程充分体现了激光科学技术具有强大的生命力，今后它将更广泛、更有效地应用到科学、技术、生产和生活中去。同时，这些应用过程也将促进激光科学技术本身的不断发展。

汤斯认为，激光器完全有可能在1925—1940年这段时间里发生^[9]，为什么直到1960年才问世？激光一旦问世，在短短30年内其技术和应用发展的速度是如此之快，产生的军事上的威力和经济效益是如此之大，其动力何在？

二、受激辐射理论的提出和量子电子学的发展是激光诞生的内动力

科学理论是客观事物运动和发展规律的正确反应，是人类不断认识和总结的结果，但是，生产力发展在某一阶段，科学技术限制在某一水平上时，反映科学技术发展的客观事物运动和发展规律还不明确时，人的认识能力往往受到限制。一旦深入研究，人类认识能力提高了，认识了这些发展中还没有认识到的规律，则理论和技术将有新的突破。

例如，1873年爱尔兰的史密斯首先发现了光电效应，对于这种效应的解释，光的电磁理论是无能为力的。19世纪末叶，人们对“黑体辐射”的研究，产生了物理学史上的“紫外区的灾难”。因为这些难题是经典的电磁理论和辐射

理论所不能解释的自然现象。1900年，德国物理学家普朗克提出了电磁振子量子假说，并推导出黑体辐射公式，圆满地解释了“黑体辐射”现象。普朗克的量子理论，在1905年由爱因斯坦更向前推进了一步，提出了关于光的本性的光子假说，即光量子理论，从而圆满地解释了“光电效应”。1907年爱因斯坦研究黑体辐射，在气体平衡计算中，发现辐射有两种形式：自发辐射和受激辐射，从而提出了受激辐射理论。根据这个理论，人们可以控制光源发光，受激辐射产生的光子的能量，几乎等于引起受激辐射的光子能量，因此与它相联系的光波具有相同的频率；其次与两个光子相联系的光波是同相位的——它是相干的；再次，受激辐射的光获得了放大。这种新的光源一经产生，对人类必将带来重大的影响。

激光是一种特殊的光。按其常规，激光应该在光学领域里首先诞生。但是，事实并不是这样的。

激光诞生出现的不必要的推迟，部分原因是因为量子电子学兼跨物理学和电气工程两个领域。虽然这两个领域很接近，但量子电子学的必要概念不为电气工程师所知或欣赏，而物理学家尽管对量子力学的有关方面懂得很多，却常常不太熟悉与电气工程有关的想法。此外，物理学家的观点有点偏向于光的光子特性，而不是光的相干性。实际上，稍早些时候量子电子学没有完整的理论，其真正的成长是在第二次世界大战后无线电和微波波谱学迅速蓬勃发展之后不久。这是可以理解的，因为许多物理学家由此进入量子力学和电气工程间的交界区。绝大部分电气工程界的科学工作者对辐射被原子和分子吸收很熟悉，但当他们了解到受激分子可能把能量相干地交给电磁波时，却十分惊奇。许多物理学家知道受激辐射，但很少有人将它与有用的放大联系起来。大量早期档案表明，有许多科学家都很清楚用受激辐射来放大，从1924年R. Tolman发表文章讨论用粒子数反转放大，到40年代末哥伦比亚大学的J. Trischka认真考虑过怎样演示受激无线电发射，

但均未实践和坚持研究下去。

在研究受激辐射时，必须考虑与它相反的受激吸收过程。受激吸收和受激辐射是同时发生的，而且这种可能性是同等的，在热平衡条件下，按玻耳兹曼分布规律，在 高能态上的原子数总是少于低能态上的原子数。那么，要使受激辐射比受激吸收占优势，必须打破平衡状态，使原子数目在上能级上大于下能级，形成“粒子数反转”。因此，从激光原理上讲，“粒子数反转”是形成激光的重要条件。

据汤斯回忆说，我认为许多物理学家懂得受激辐射，但他们觉得在受激吸收和受激辐射同时存在的物理过程中，很难把受激辐射分离出来。反馈和在单模中大量量子的概念还没有产生，这些概念可能提出实际应用的建议，并给实验加添额外的价值。此外，还存在一些误解和混淆，它们推迟了量子电子学的出现。约在 1954 年，在贝尔电话实验室我自己就写过一份内部备忘录，说明原子和分子可能用来产生短的微波，但是强度只能很低，因为受热力学第二定律的限制。那时我还没有想到利用非平衡分布和粒子数反转。

强调光的光子性使一些物理学家想不到相干放大。结果是在微波激光器投入运行前，John Von Neuman 提出用中子轰击固体，使电子触发以产生强级联光子发射。相干性没有人提出过。30 年代，J. H. D. Jensen 曾想到由粒子数反转产生受激辐射，彼此无关的光子级联，像宇宙射线雨一样，经过一番实验，失败了。当时，电气工程师也从未关心过光的相干性问题。但是，当电气工程师和物理学家处理无线电或微波波段问题时，他们便自然考虑到了相干性。由此推动了两者的结合，使量子电子学的出现和发展有了基础。

1950 年兰姆和里瑟福对微波波谱进行了精密测量。1951 年珀塞尔和庞德用核磁共振造成了粒子数反转。在这些工作的基础上，汤斯受到启发，想到用氨分子本身有可能作为一个微波源。1951 年底，在美国海军和陆军的资助下，戈登、蔡格和汤斯进行了两年的研究，于 1954

年初成功地制造了波长为 1.25cm 的氨分子振荡器，即最早的微波激光器（“脉冲”）^[4]。1955 年，苏联的巴索夫和普罗克霍夫提出用三能级方法来得到粒子数反转。1956 年普洛姆伯根详细地计算了获得负温度的条件，提出利用晶体中的过渡族离子来得到微波的放大，于是微波固体量子放大器的基本原理就确定下来了。同年贝尔实验室的斯科维耳等人制成了第一台微波固体量子放大器。一年后（1957 年末），密执安大学工程研究所的马克夫、兰贝和特尔亨等用红宝石在微波 9060MHz 上获得了量子放大。1958 年，在以上量子电子学研究基础上，汤斯、肖洛和巴索夫、普罗克霍夫等，分别提出把量子放大技术用于毫米波、亚毫米波、红外以及可见光波段的可能性，从而建立起激光的概念。

三、军事上的需要是激光诞生的直接外动力

依据受激辐射理论，要实现受激辐射，第一，要有处于激发态的原子；第二，必须使受激辐射机会比较受激吸收机会多。由于原子系统处于平衡状态，所以受激吸收机会多，受激辐射机会少。因此，在通常实验条件下，总是只观察到受激吸收现象，而观察不到受激辐射现象。在光谱学范围，受激辐射不能引起研究者的注意。如果造成原子体系中“粒子数反转”，可以获得受激放大辐射。但是，按照爱因斯坦系数关系式，在微波（如波长为 1cm）波段，自发辐射与受激辐射比较，几乎可以忽略不计，所以微波波谱学工作者都必须重视微波的受激辐射，因而十分注意了对它的研究。尤其是在第二次世界大战中，由于军事雷达的需要，大大促进了微波和脉冲技术的发展，生产高分辨率无线电波谱仪的任务提到日程上，这就促进了微波波谱学的研究。为了提高线谱强度，要求分子按能级分类，假如分类后的分子处于高能级，则这样的系统将起到放大作用，由此可以得到微波振荡。空腔谐振器是无线电波谱学家早已熟知的器件，

在此基础上,微波放大器很快就被研制成功,从而为激光的诞生创造了条件。由此可见,军事技术上的迫切需要,对于激光的诞生起了重要的外推力作用。汤斯最初对激光器的前身——微波激射器进行研究,就是为着军事目的,是由美国军用部门提供军费完成的。

第一台激光器建立以前,军方已对激光就产生了兴趣。1958年汤斯和肖洛发展了红外和可见光激射器的理论,汤斯当时在哥伦比亚大学任教并兼贝尔实验室顾问。他仔细考虑了光激射器在军事上的应用潜在可能性,向普林斯顿大学的 John Wheeler 提出报告。Wheeler 是国防分析研究所和高级研究计划局一项计划的负责人。在给汤斯的一封信中,Wheeler 说,该计划的目的是寻求“一些目前尚未受到尝试的办法,用这些办法有可能对国防作出至关重要”的贡献,他认为,激光“正好符合我们的要求”,他预言,“激光会受到高级研究计划局的非常关注。”1959年,当一家在微波激射器方面颇有经验的电子公司——技术研究集团 (TRG) 要求承包军方支持的激光器研制时,这种关注就到来了。戈登于1958年毕业于哥伦比亚大学,他写下了有关激光器的想法,并于1959年申请专利,该公司雇用了他^[5]。由于 Wheeler 的评议引起了高级研究计划局的兴趣,公司从那里得到100万美元,比公司想要的钱多了三倍。高级研究计划局关心的目标不只是该公司提出的把激光用于雷达和通信,还想用死光来防御苏联导弹的威胁或“导弹差距”。在这种军事上需要情况下,美国工业界的一国防机构——休斯飞机公司老板支持激光的研究,于1960年梅曼研究成功世界上第一台激光器——红宝石激光器,从而宣布了激光的诞生^[6]。

四、激光的优异特性和基础研究是激光迅速发展的内动力

1. 激光的优异特性使激光得到迅速广泛的应用

受激辐射决定了激光的物理特性,使它比

物理

普通光具有着异常高的光子简并度。以往的光源,包括太阳在内,它们的光子简并度一般都不大于 10^{-3} ,即平均在1000个量子状态中才有一个光子,分布是很稀的。而激光束的光子简并度可高达 10^{17} ,即在一个量子态里有 10^{17} 个光子^[7]。一个光学参量,在短短十几年里,提高了20个数量级,这在光学史上是第一次。“纯粹量的增多和减少,在一定的关节点上就引起质的飞跃。”(《反杜林论》第42页)光子简并度的急剧增加,必然引起质的飞跃。这种质的飞跃表现在普通光所不可能具有的激光特性上。激光具有高亮度、高方向性、异常好的单色性和相干性。激光的这些宝贵特性,使它广泛地应用于各个领域,并且对光学及其学科技术发生着深刻的影响。

激光可以做许多通常光学技术办不到的事情。过去能办到的,应用激光以后,效果和精度得到成倍,甚至几十倍、几百倍的提高。所以,激光在工农业生产、医疗卫生、国防军事、科学研究等各个方面都有广泛的应用。

2. 激光的基础研究是激光迅速发展的又一内动力

激光的诞生,是与电子学、光谱学、原子物理和量子理论的发展相关联的。量子理论是现代物理学的重要基石之一,它深刻揭示了物质微观运动的规律。如果没有量子理论以及其他基础理论的研究和发展,受激辐射理论就不可能得到巩固和完善,激光就不可能诞生。从理论基础的准备和积累,特别是从受激辐射概念的提出到激光器概念的形成,孕育了50年的时间,而建立第一台激光器却只用了两年。因此,正好说明:来源于科学实验的一个有创见的科学概念的提出是十分重要的”。激光的诞生是这样,激光的迅速发展过程也是这样。一台新的激光器的出现,除了必备的技术条件外,理论研究起着先导作用。要寻找新的激光工作物质,人们对世界上存在的千千万万种物质进行化学的、原子物理的及量子理论的研究。正是人们作了这些研究,才陆续发现了数百种能产生激光的物质,从而做出了数百种激光器。人们

对光激励,放电激励和化学激励等泵浦理论进行不断地研究和实验,使各种激光器泵浦性能不断提高,激光器性能及参数也不断达到新的水平,从而促使激光应用的不断扩大。当人们研究了电激励气体原子和分子产生受激辐射以后,就产生了氦氛、二氧化碳、氩离子、氦-镉等低功率的气体激光器;当人们对气体放电理论进一步深入研究,并通过一系列实验之后,就出现了横向激励的二氧化碳激光器,使连续输出功率大大突破新的指标;当研究了流体力学、化学反应动力学理论之后,完成了气动 CO₂ 激光器。这样,CO₂ 激光器从最初几W连续输出功率水平,一年上升一个数量级,1973年达60kW,目前最高达400kW,其工业产品为20—30kW,已成为材料加工和高能激光的一种。当人们不断对固体介质能级结构和光谱特性的理论和实验研究后,又出现了新的性能良好的固体激光工作物质和激光器及新的固体可调谐激光器。如掺钛蓝宝石激光器可调谐范围和输出功率强度都比染料激光器高三倍,在红外波段已可取代染料激光器。当苏联发现在水中能产生“光水力效应”,产生的冲击波压力高达百万个大气压时,就开始准备研制能摧毁水下潜艇的激光武器。当美国在激光产生等离子体屏蔽的基础研究获得一个一个进展之后,激光摧毁高速飞行导弹的实验也一个一个获得成功,从而使战术防空激光武器逐步接近实战的要求。在1962年,国际上发表了用大功率激光与等离子体相互作用的理论之后,激光受控热核聚变的研究就逐步开展起来了。1972年又提出了所谓“多路激光向心照射引发聚变”的理论,使激光受控热核聚变出现了新的前景,以致几年后,法国、苏联、(原)联邦德国、日本、波兰、中国等国先后都用激光产生聚变,探测到了中子。激光分离同位素已获得成功,也正是一系列原子物理、激光光谱学等基础研究获得大的进展的结果。激光与生物的相互作用基础研究,促进了激光在医学上的广泛应用和激光生物学的建立。激光基础理论的许多方面,诸如激光动力学(研究激励机理、物质发光机制、谐振腔模式、

锁模激光动力学、基本粒子相干受激辐射等)的研究,直接影响激光武器、激光在材料上加工、受控热核聚变、分离同位素等重大应用研究课题的发展。超短脉冲成型理论影响着激光雷达、测距、远距离通信、激光光谱学、激光化学、激光生物学等领域的发展。

总之,在当代科技发展水平下,人对激光领域里的各种基本现象和规律的认识是激光技术发展的先导,每一次认识的突破,就把激光技术的发展向前推进一步。

五、社会实践的需要和现代科技手段的具备是激光迅速发展外动力

激光提供的相干定向密集光束,使得古老梦想的实现有了新的希望。为了进攻罗马的舰队,阿基米德曾设想用反射镜和透镜将太阳光会聚到海面的军舰上。死光的科学幻想给古老的梦想抹上了现代的色彩,发射了人造卫星,将第一批宇航员送入空间,同时在苏联出现了可用来发射弹头的大型助推器,为死光提供了合适的靶子。实现射束武器的希望增加了军方对激光的兴趣,为此开始了许多工业和军事部门的计划,超过了对激光测距、通信和探测的兴趣。工业界的国防机构迅速开始进行射束武器应用的研究。在梅曼1960年发明红宝石激光器的几个月内,他的雇主休斯飞机公司就有了一项发展射束武器的内部计划,以“杀老鼠”的激光器开始^[4]。陆、海、空三军很快抓起这项工作,有关公司也积极参加。1964年,空军科研局报告,美国有500多个研究单位从事激光研究,“没有哪一项技术的发展像激光这样点燃科技界的想象力。”在人造卫星以及一代原子弹发展之后,军方,特别是那些从事这项研究的实验室热切盼望着这样的刺激。激光研究和发展扩大到美国几十个内部实验室和几百个订合同的实验室,对他们来说激光不仅意味着激动人心的技术挑战,而颇有希望从中获利,“以光的速度防御”成了军事工业集团的口号。60年代和70年代迅速增加的激光品种,为尖端研究和市场

提供了大量候选器件。一些激光器，例如钕玻璃、掺钕 YAG、气动和电子束泵浦的 CO₂ 激光器以及氟化氢化学激光器，成为大部分军方计划的焦点，其功率和能量不断提高。70 年代末，美国高能激光研究和发展计划每年大约投入 1.5—2 亿美元，到 1980 年共花掉 15 亿美元。低能激光研究和发展，生产可用于战场的装置，花的钱也差不多。1980 年，激光器市场在美国政府所占的部分约为 60%，或 4.53 亿美元，显然激光工业是以军用为主的。

由此，激光在军事上的研究和应用十分突出^①。1964 年，美国福兰克兵工厂开始了激光枪的试验，经过几年时间，就研制成一种作用距离为 1.5km 的激光枪，重约 10kg，能使衣服着火，爆炸物燃爆，在短距离内能使装甲车击穿。1966 年美国试验成功激光制导炸弹，命中率极高，比手控投放无制导炸弹提高了 300 倍，比计算机控制投放制导炸弹提高了 50 倍，投掷目标误差半径仅 1m（普通炸弹为 80—100m）。1972 年美国在越南战场实用了激光制导的炸弹，取得了高精度投掷效果的战例。战争的实践验证了激光技术的威力，从而又推动了激光技术的发展和它在军事上的应用。1973 年中东战争，美国又成功地使用了激光制导的炸弹，产生极高的命中率。此后，美国发展到用激光制导导弹，从而在 1991 年的海湾战争中应用激光制导的炮弹、炸弹及其他激光武器，这些均发挥了重要威力。

随着生产和科学技术的发展，人们对于光波的要求也越来越高，对新颖光源的要求越来越迫切。由于通信、导航、射电天文学等现代科技的发展，迫切需要亚毫米波向更短波段提高一步，急需光频段内的相干波，20 世纪中期建立在光的波动理论基础上的全息照相术，由于得不到一束高强度光学波段的相干光源，而停顿于大约十余年，急需有高强度的“空间和时间的相干光”的诞生；20 世纪 50 年代以后，大工业生产的发展，对精密计量技术的要求日益提高。由于原有氩-86 灯谱线宽度 $\Delta\lambda = 0.00047\text{nm}$ 很宽，使得最大可测长度仅为 38.5

cm，远远不能满足实际测量的需要，因而迫切需要新的单色光源；在近代物理学的发展中，人们要深入观测微观世界更精细的结构和物质运动规律，也急需有波长更短的相干光；在材料加工上，人们遇到许许多多难熔、坚硬及特殊的材料，苦于不能加工……。总之，在各个领域内，对激光的需要迫在眉睫。正如恩格斯所说：“社会一旦在技术上需要，则这种需要会比十所大学更能把科学推向前进。”（《马克思恩格斯选集》第四卷第 505 页）因此，也正是各个领域对新光源的迫切需要，才推动了激光的诞生和迅速的发展。

现代生产和科学技术手段为激光的诞生和发展提供了有利的条件。激光是原子物理、量子理论、光谱学、电子学等自然科学基础理论和现代技术相结合的产物。如果没有 20 世纪初到 60 年代初的自然科学基础理论和现代技术，诞生激光是不可能的。而恰恰这些正是现代生产力发展的反映。爱因斯坦提出的受激辐射理论，是在研究黑体辐射中，依据原子物理学，发展了普朗克的量子假说的结果。正是在玻耳兹曼得出原子数目在能态上正常分布规律之后，才有了相对的“粒子数反转”的概念。在光谱学的发展情况下，有了法布里-珀罗干涉仪。由于电子学的发展，微波技术才有发展，才会出现微波激射器，即激光器的前身。当人们把受激辐射、“粒子数反转”和光学谐振腔三个重要概念有机地联系在一起的时候，激光器的概念形成了，从而有了激光的诞生。

激光的科学研究是紧紧依赖于现代生产的科学技术手段的。只有用电子显微镜高精度的光学仪器来观察物质的精细结构，才能为激光产生的机理进行研究，新的工作物质才能有所发现；只有有了先进的电力设备，才可研究先进的泵浦源，高能激光武器的研究才有迅速的发展；只有有了原子能技术，激光受控热核聚变的研究才有可能进行；只有有了先进的电子技术，激光通信、激光雷达的应用，才能得到迅速的发展。特别是在激光应用研究中，使用了先进的电子计算机，使激光更加充分地发挥其特长。如

在电子器件制造中,美国、日本等国采用激光作业,取得显著成绩。它们的共同特点是采用了计算机控制,实现了高度自动化。不难设想,用落后的手工操作,是不能发挥先进技术的特长的。正是因为有传统的加速器,才能有激光加速器的研究。因为有了超导加速器和强磁场技术条件,第一台自由电子激光器才可能于 1977 年在美国建成,并且得到新的发展。正是有了先进的军事技术和武器装备,才能使激光夜视、坦克激光测距和激光制导的各种炸弹、炮弹发挥了重要的军事威力。

总之,有了现代生产和科学技术手段提供的有利条件,激光才能诞生和迅速发展。激光

诞生和发展紧紧依赖于生产、技术手段,这有力地证明了科学来源于生产,依赖于生产的基本原理。

- [1] A. L. Schawlow, *IEEE J. Quan. Electron.* QE-20-6(1984), 558.
- [2] 王之江, *国外激光*, No. 12(1990), 9.
- [3] C. H. Towns, *IEEE J. Quan. Electron.*, QE-20-6(1984), 547-550.
- [4] 徐启阳, *物理*, 9(1980), 476.
- [5] R. W. Seidel, *Physics Today*, No. 10 (1988), 36-43.
- [6] J. L. Bromberg, *Physics Today*, No. 10 (1988), 26-33.
- [7] 徐启阳, *现代工业技术史文集*, 自然辩证法通讯出版社, (1979), 52.

高效率大功率二次谐波产生在理论和实验上的新成就

二次谐波产生的基本理论早在 1962 年就由 N. Bloembergen^[1] 建立起来。在转换效率不高,基频光波的消耗可忽略的条件下,二次谐波转换效率可表示为(“无消耗”近似)

$$\eta = \eta_0 \sin^2 \delta, \quad (1)$$

式中 η_0 称为“激励量”, δ 称为“失配量”, 各由下式表示:

$$\eta_0 = C^2 L^2 I, \quad (2)$$

$$\delta = \frac{1}{2} \Delta k L, \quad (3)$$

其中

$$C = \left(\frac{8\pi^2 d_{eff}^2}{\epsilon_0 c \lambda_1^2 n_1 n_2} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

d_{eff} 为有效非线性系数, ϵ_0 为真空介电常数, c 为光速, λ_1 为基频波长, n_1 和 n_2 各为基频光波和二次谐波的折射率, L 为非线性晶体长度, I 为入射基频光强, Δk 为相位失配的波矢差。在转换效率较高时,如果相位失配可以忽略,则可采用“无失配”近似(有消耗):

$$\eta = \tanh^2 \sqrt{\eta_0}. \quad (5)$$

同时考虑相位失配和泵浦波的消耗,平面波的

二次谐波转换效率为

$$\eta = \eta_m \text{sn}^2[\sqrt{\eta_0/\eta_m}, \eta_m], \quad (6)$$

其中 sn 表示雅可比椭圆正弦函数, η_m 为最大转换效率,

$$\eta_m = 1 + \frac{\delta^2}{2\eta_0} - \sqrt{\left(1 + \frac{\delta^2}{2\eta_0}\right)^2 - 1}. \quad (7)$$

上述(1)和(5)式是在作二次谐波的光学设计和选择晶体时过去常用的估算经验公式,但在高功率激光高效率产生二次谐波时,这些公式往往不适用。第一,上述经验公式的基础是无限大平面波近似,在高亮度激光束入射的情况下这个近似往往不适用。第二,按照(2)式应该能通过聚焦基频光束来增大输入强度,从而提高转换效率,但这种方法并不有效,聚焦太紧时相位失配量变大,转换效率反而下降。第三,晶体折射率依赖于温度,非线性晶体吸收基频或谐波将发热而引起折射率的局部变化,造成相位失配,对总的失配的热贡献是一个必须解决的重要问题。

D. Eimerl^[2] 在 1987 年发展了一个模型,把基频光波电场表示成平面波的相干叠加,光