

激光与高科技

Laser and Advanced Science and Technology

徐积仁
(中国科学院物理研究所, 研究员 北京 100080)

20 世纪 60 年代初发明的激光器和观察到的激光现象, 是最激动人心的高科技发明之一, 也是基础研究走向应用成果的范例。这项发明已经引起科技、军事、工业、农业和医疗等一系列的变革, 预期也将会进一步推动 21 世纪高科技的发展。

激光器的发明是物理学界经历了至少 50 年努力的结果。1900 年德国物理学家普朗克首次提出辐射的能量是量子化的概念, 解释了黑体辐射的能量与光波长的关系。以后在如光电效应等一系列实验结果的基础上, 建立了光的量子理论。1913 年丹麦物理学家玻尔最先用量子理论进行原子结构的研究, 发现了原子中电子运动状态的变化与光辐射的联系。1917 年爱因斯坦在阐述辐射的量子模型时指出: 原子中电子吸收光量子只有一个过程, 而原子中电子发射光量子存在两个过程, 即自发发射过程与受激发射过程。这是在理论上首次预言, 光源发光可能有受激发射或称感生辐射, 并且受激发射的光子与原入射的光子具有同频率、同位、相同偏振等特性。但在通常温度下, 即平衡态下受激辐射是无法观察到的, 只有当高低能态上的粒子数具有反平衡态的分布, 或称处于负温度态时, 光通过这类物质才会获得增强, 或称光放大、负吸收。另一方面, 为了观察到光获得足够的放大, 原则上需要光经历足够长的负吸收介质, 由此设想到: 利用 1896 年法国物理学家法布里、珀罗发展起来的平行平板干涉仪, 将有负吸收的介质置于法布里、珀罗干涉仪内, 可获得足够的光放大。此后又经历多名学者约 40 年的潜心研究, 终于在 1955 年由美国及前苏联科学家用氦分子束实现了微波受激发射放大, 并提出三能级粒子反转分布理论。1958 年, 美国科学家唐斯及萧洛与前苏联科学家巴索夫与普罗霍罗夫几乎同时预言了在红外及可见光波段实现受激光发射的可能性。1960 年, 美国的梅曼首次报道, 在红宝石介质中用三能级理论实现了光频的受激振荡, 这一现象很快地在全世界许多实验室里得到重复, 并且发现由激光器发出的激光显著地不同于普通光源发出的光, 明显地表现出传播的方向性、波

面的相干性与单色性, 且输出光有极高的亮度, 即输出光能量大、功率高。这表明发光光源中的原子或分子被组织起来协同发射。不久, 激光的理论与实践都有了突破性的进展, 几乎所有物种, 如固态、气态、液态、等离子态、半导体等无机材料或有机材料, 都可成为激光的工作物质。除三能级外, 四能级, 甚至更为复杂或简单的形态都可形成粒子数分布的反转, 甚至不用反转。例如化学反应中, 放电气体中瞬态构成的准分子, 在周期磁场中运动的自由电子等, 也可成为激光的工作物质。

从第一台激光器运转至今的 40 年内, 光学获得前所未有的高速发展。伴随着光源、光传输和探测技术的发展, 人们对光与物质相互作用有了进一步的深刻认识。新的光电子产业也应运而生。例如在美国, 光电子产业的年产值已超出 40 亿美元。激光的脉冲峰功率已从最初 10 千瓦增加到 100 太瓦, 功率密度超出 10^{18} 瓦·厘米⁻², 时间上已从连续输出到短脉冲、超短脉冲输出, 甚至于达到 4.5 飞秒(4.5×10^{-15} 秒), 已接近单个光波波长。激发波长已从微波、红外、可见光、紫外、真空紫外直至 X- 波段的全波段运转。稳频激光器频率稳定度可达 1 周秒⁻¹ 以下。凡此种种, 不仅推动光学及其他基础学科的进展, 而且将直接影响下个世纪的光电子产业和其他种类高科技的发展, 甚至会影响人类未来的生产及生活方式。自从 1964 年前苏联科学家巴索夫、普罗霍洛夫与美国科学家唐斯因激光研究共同获得诺贝尔物理学奖以来, 至少有 4 次以上的诺贝尔物理学奖被授予激光研究及其应用的有关科学家。1997 年诺贝尔物理学奖又授予为激光致冷原子作出贡献的科学家。用激光冷却原子的方法(使原子运动冷却到 10^{-6} K 绝对温度以下), 能观察到玻色—爱因斯坦凝聚现象, 这是首次将 70 年前提出的理论预言变为现实, 它将进一步加深物理学对原子、分子在新形态下的相互作用、运动方式等的认识。又如 1997 年底观察到高功率激光直接与加速器中输出的高速电子对撞, 光直接转变为正、负电子对的事例, 再次证实了能量与物质可以互相转

变。激光和光电子技术现已广泛应用于高科技领域,尤其在生命科学、能源科学、信息科学、武器系统和先进自动机五个方面发挥了更大的作用。

1. 生命科学

生命科学是人类认识自身的科学,也包括对动植物、微生物等有生命物种的认识。人体由约 60 万亿个细胞组成,其中人脑约有 1 000 亿个脑细胞,每个细胞都构成一个独立的个体,且包含约 2 000 ~ 3 000 种物质,细胞不断进行新陈代谢、相互作用,才形成活动的人。这许多细胞以及人体器官之间协调的活动以及相互控制等等,是由遗传基因决定的。因此需要知道遗传基因的构成与密码,从而确定其功能。遗传基因存在于细胞中染色体内,由 DNA 构成。DNA 有双螺旋结构,由称为 A、G、C、T 的 4 种碱基组成,不同的碱基顺序构成不同种类的 DNA,约 30 亿对碱基组成的约 10 万种不同的 DNA 构成了全部人类基因。不同生物物种具有不同的 DNA 顺序,由碱基的吸收光谱可以确定其顺序。碱基的荧光寿命约小于 10 皮秒,因此需用皮秒或飞秒激光器来准确确定碱基光谱与寿命,确定其顺序及多层结构。要做到这一点,首先要编制人类基因图谱与结构,然后确定每种基因的功能及其在生命过程中的作用,最后设想用超短脉冲激光去控制遗传基因,从而达到控制生命物质及生命的目的。另外,细胞还包含了人类发展至今的全部历史信息。掌握细胞演化的历史与信息,将有助于进一步了解人类起源,从而有可能改善人类自身的质量。这将是十分巨大的系统工程。激光技术短期的应用还将对疾病的形成、癌症的早期诊治以及对基因病的了解都有直接作用。美国于 90 年代初实施人类基因图谱工程,投资 30 亿美元,计划于 2005 年完成,据称目前已完成计划的 70%。我国正着重研究功能基因,已获得水稻的基因图谱。

细胞的活动常伴随微弱发光现象。是否细胞之间也存在信息联系?这些光又是怎么发射、传播、相互影响和作用的?这就需要弱光进行探测、记录、研究,而激光与光电子技术在这方面提供了足够的工具。例如用光镊可以在无菌空间下操作悬浮的单个细胞,并可进行选择,观察其行为动力学,提供分子水平的研究。又如脑组织通过神经组织控制人体各部分的活动,神经突触之间是通过一定物质联系的,而利用光脉冲有可能取代这些物质的作用。再如激光可用作探针探测细胞内物质的行为,以及用激光在细胞壁上钻小孔,完成细胞融合技术等等。

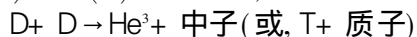
激光作为手术刀,在眼科、外科、耳鼻喉科、心脏外科已有广泛应用。心脑血管病的治疗中,血管重建术已取得长足的进展,治疗动脉粥样硬化、心肌梗塞等病症有可能不用开胸手术。在肿瘤诊断上光动力疗法也已可以临床应用。低功率激光的血液

照射术可大大改善血液循环性能,提高血液系统的免疫功能。光 CT 扫描无损人体器官,为检查疾病提供了重要手段。

激光技术在农业、畜牧业方面也大有可为。以人造光源取代太阳光的自然光,可达到提高单产的目标。以水稻为例,其营养物质生成的基础,是依靠阳光的光合作用,在二氧化碳加水及其他养料补给足够的条件下,植物的叶绿素通过光合作用自动合成人类所需的营养成份。实际上,光合作用的光源并不需要所有的太阳光谱,只有红光及蓝光才能有效地被叶绿素所吸收,其中红光尤为重要。因为太阳光中的红光比例并不很高,所以通常植物对太阳光的利用率只占百分之几;而激光的红光光源足可替代阳光进行植物的光合作用,是合适的取代光源。最近日本报道,在他们的实验工厂内,水稻的生长期已缩短至 70 天,一年足够产 5 季稻。在植物工厂内没有病虫害,不受自然条件的影响。按他们的估计,工厂如设计成 5 层楼房,每层楼内种 5 层水稻,密植度再提高 5 倍,那么水稻单产有可能提高 625 倍。目前半导体激光器红光的光合作用的光效率已达 30%,半导体激光器的电光转换效率已超出 60%,准连续平均功率达几百瓦,可见激光在农业方面的应用是大有可为的。此外,在农业育种、大田增产、防治病虫害、蔬菜花卉育种、改善牲畜品种,给牲畜治病等方面,激光都表现出特殊的效果。

2. 能源科学

未来能源的主体估计为水力资源及核能。核能利用通常分为裂变反应及聚变反应。裂变反应就是有控制地爆炸原子弹,一般用 U^{235} 同位素为原料,天然铀矿中 U^{235} 的含量约占 0.7%,反应堆燃料至少需要浓度为 3%,武器级约需 60% 以上,因此天然铀矿开采后必有一个 U^{235} 的浓缩问题。利用激光单色性好,可以对铀原子或铀化合物进行选择性的激发、离解,再用物理或化学方法分离,加以收集。生产 1 公斤 U^{235} 激光原子法的成本仅为离心法的 10%,消耗电力仅为扩散法的 4.2%,相对小的车间即可完成,具有经济、小型、便于隐蔽、分散等特点,且能对浓缩后的尾料发挥作用。美、法、俄、日、以色列等国都选用激光分离法作为下个世纪的 U^{235} 同位素分离的方法。但随着核裂变反应工厂的增加,核废料的处理和储藏带来放射性污染的麻烦,对此目前各国都缺少有效的解决途径,且地球上的铀矿资源也十分匮乏,因此,发展核聚变反应堆将成为下个世纪的首要目标。聚变反应就是受控氢弹反应,通常用氘(D)和氚(T)作为原料,其反应式为:



式中的 He^3 、 He^4 是氦的稳定同位素。该反应可释放巨大的能量,1 克氘原料,放出的能量高达

3 600 亿焦耳, 或 100 兆瓦·小时的电, 氘在海水中的比例约占 1/5 000, 可以说, 海水中的氘是取之不尽的。据估计, 按 1997 年全世界发电总量计算, 受控核聚变反应堆建成后, 足够全人类使用 50 亿年, 且无放射性废料, 属清洁能源。但产生聚变的条件是十分苛刻的, 反应温度需近亿度, 反应时间需足够长, 只有当满足反应的时间与中子通量的乘积大于 10^{14} 时, 反应才能持续进行。为此科技界已进行 50 余年的努力, 目前已筛选出 2 种主要的方法: 用磁约束等离子体的放电方法, 又称托克马克装置; 激光惯性约束核聚变方法, 又称激光受控核聚变。目前这两种方法都可使约束等离子体达到约 1 亿度高温, 但是尚有大量的工程技术问题有待于下个世纪解决。激光核聚变方案中, 目前多束激光(约 100 束以上激光) 瞬间对称分布辐照含氘氚靶的小球, 激光功率密度可达 10^{21} 瓦·厘米⁻², 产生 10^{13} Pa 的内爆压力, 使小球瞬间完全离化产生高温高压, 形成 DT 反应。目前压缩比已超出 30, 激光对靶的吸收率达 80%, X 光转换率为 70%, 单个毫米直径小球靶可产生聚变能 3.45×10^{11} 焦耳热。目前受激光介质的光泵散热限制, 有待改用单色半导体激光作泵, 增加聚爆装置的重复率, 每秒工作 10 ~ 100 次, 1 秒钟可输出 10^{12} 焦耳能量。若以聚变发电站效率 1/10 计, 即可建立吉瓦以上的聚变能发电站, 届时人类能源可望基本解决。

此外, 太阳能的开发与利用也将是下个世纪的目标, 太阳每年向地球输送约 10^{24} 焦耳热。我国陆地地表太阳能资源也高达 10^{22} 焦耳热, 相当 1 700 亿吨标准煤的热量, 因此充分与合理利用太阳能也大有可为。目前单晶硅太阳能电池光电转换效率约为 20%, 成本较高; 纳米晶光化学电池效率约为 11%, 一般植物吸收太阳能效率不到 10%, 可见发展高效、廉价、长寿命的太阳能利用装置也不失为下个世纪能源科学的目标。

3. 信息科学

当今信息的获取、传输、存储、处理等技术手段已成为人类活动的重要工具。当前计算机技术发展很快, 每秒钟处理 100 亿次的计算机在美国已经上市。IBM 公司声称已试制成功每秒运算 3.8 万亿次的计算机。到 2004 年将获得运算速率高达每秒 100 万亿次的超级计算机, 足可解决全球气象预报和核爆炸模拟等超大型计算机任务。尽管如此, 发展速度更快、集成度更高、存储容量更大、体积更小、功能更全的计算机仍将是下个世纪的奋斗目标。利用生物芯片, 以光速互联的极限能力计算机将会有更快的发展。只有用光子取代电子才能获得极限速度, 因为电子与电子之间存在相互作用, 硅芯片的集成度是有最终极限的, 而光子之间相互作用几乎为零。光子计算机可以并行处理, 原则上可达到极

限速度和极限能力。但由于原器件、材料、工作方式等仍存在一系列理论与实际的问题, 全光子计算机尚不能于短期内完全取代电子计算机, 也许需要经历光电子混合集成等过渡性阶段, 其中超大容量光存储器将很快问世。预期用短波长激光读写, 每比特只占 0.2 微米以下的线度, 每平方英寸存储密度比现有水平提高 4 ~ 5 个量级是完全可能的。美国科学家用原子力显微镜存储技术, 1 平方厘米的介质表面可存储 10^{10} 比特的信息; 利用全息存储技术, 1 立方厘米可存储 10^{13} 比特。此外, 利用光谱烧孔实现时域存储也取得很大进展; 利用纳米材料技术, $10^{10} \sim 10^{14}$ 比特的海量存储器即将问世; 可读写相变光盘、光集成、光开关、光计算技术等也将取得突破。

通信技术是信息的另一基础技术, 是信息交流的手段。通信传输干线用光纤代替铜缆, 已成为不可逆转的潮流, 因为光纤具有经济、耐用、保密、传输率高、信息容量大等特点, 已广泛用于洲际通信干线, 传输率可高达 10^9 比特·秒⁻¹ 以上, 误码率保证在 10^{-9} 以下; 用飞秒重复脉冲, 数字传输率可高达 10^{14} 比特·秒⁻¹。据报道亚太地区与横穿大西洋的光缆干线已超出 15 条, 总长度已超出 30 万公里。目前发达国家通信已经由光纤直接到户, 100 公里传输无中继已经实现。正在发展的长波长 1.3 ~ 1.6 微米光纤, 将进一步降低传输损耗。未来光纤通信将包括高速数据传输率、本地区局域网络、光纤入户 3 大类, 与计算机相结合, 构成信息高速公路的技术基础。这些系统都要求宽带集成技术和数字化网络技术, 统一成综合技术服务网, 既要支持常规信息交流, 也要适合图像的高速传输, 并与个人的网络互联, 形成数字光纤通信系统和有线、无线相结合的光纤系统。开发光纤系统技术, 要求在几太赫带宽的功能内采用波分复用技术, 无需电放大, 即可将光纤放大器置于中继线路获得 30 ~ 40 dB (1 000 ~ 10 000 倍) 的增益。在发展光纤通信中有若干关键技术, 如单频单模大功率半导体激光器、接收器、调制解调技术、光集成与电子集成的混合技术、低损耗光纤、光纤制造、合成技术等。

与此同时, 无光纤的激光通信技术, 也将成为下世纪通信的重要手段之一, 因为激光频率高达 $10^{14} \sim 10^{15}$ 周秒⁻¹, 足够传输几百万路电视、几亿路电话。在全球通信中, 包括我国边远山区不可能到处架设光纤系统, 只有通过卫星转播来解决。未来的宇航通信、飞船之间的通信联络等都可以利用激光的方向性强、准直性好、单色性好、高带通的特点。

4. 武器系统

未来的战争不仅仅是人力物力之战, 而且是海陆空立体战争和高技术之战。几年前的海湾战争已表现出技术战、光电子战的特点, 激光与光电子技

高技术新材料的发展方向 Development of the New Hi-Tech Materials

李茂山 赵宝荣

(中国兵器工业第五二研究所 包头 014034)

高技术新材料是指新近研制成功或正在研制的、具有比传统材料更优异的特性和功能,能够满足高技术发展需要的新型材料。它具有多学科交叉和知识密集、技术密集的特点,是一类品种繁多、结构特性好、功能性强、附加值高、更新换代快的材料。目前全世界已经注册的新材料约有 30 万种,并且还以每年大约 5% 的速度迅速增长,其中相当一部分具有发展成为新材料产业的潜力。

新材料与现代科学技术特别是高技术联系密

切,它们互相依存、互相促进,共同推动经济发展和社会进步。一种新材料的出现,可以给人类的生产和生活带来新的变化,甚至引起生产技术的革命,加快社会发展的历程。新材料既是当代高技术的重要组成部分,又是高技术得以发展和应用的物质基础。一切高技术及其产业的发展,都必须以新材料为基础和先导,紧密地依赖于新材料的研究开发和生产。例如,没有半导体材料的工业化生产,就没有电子计算机问世;没有耐高温的轻质高强结构材

料,它们互相依存、互相促进,共同推动经济发展和社会进步。一种新材料的出现,可以给人类的生产和生活带来新的变化,甚至引起生产技术的革命,加快社会发展的历程。新材料既是当代高技术的重要组成部分,又是高技术得以发展和应用的物质基础。一切高技术及其产业的发展,都必须以新材料为基础和先导,紧密地依赖于新材料的研究开发和生产。例如,没有半导体材料的工业化生产,就没有电子计算机问世;没有耐高温的轻质高强结构材

术已成为这次战争的特殊表现。在未来的战争中,激光在战略武器及战术武器系统中都将发挥重要的作用。

在战略武器系统中主要发展自带能源的大功率化学激光器。它克服了一般激光器的能源限制,将以机载为主;克服了大功率激光在空气介质传输中的能量损耗。据报道 1997~1999 年度美国将改装 3 架波音 747 飞机,进行机载激光反弹道导弹与反卫星系统的实验。激光器输出功率达百万瓦水平,只要连续工作几秒钟,就可以命中几十公里以外的目标,着重破坏卫星或导弹的传感系统,或使导弹偏离航线不能命中目标,也可以摧毁敌方的飞行器。这也是星际武器系统,可能用于未来宇宙飞船的防御系统。

激光与光电子技术已广泛应用于军事领域的各个方面。例如,精确激光制导炸弹,投弹误差几率不足 3 米;致盲武器用于战场可使敌方人员丧失战斗力;激光制导炮弹,可准确引导炮弹击中行进中的坦克;巡航弹中的光电子目标识别系统,可用作自动搜寻目标。又如红外焦平面成像,已广泛地用于夜视,适应步兵的单兵作战;利用夜间星光仪可看清 5 公里距离的兵员移动;美国已制成的激光防护镜可瞬间自动调节光强 6~7 个量级;俄罗斯、欧洲诸发达国家,也纷纷发展各种类型的激光武器系统、反激光装置和光电子对抗技术。其他用途如测距、侦察、警戒、目标指示、制导、导航、战场照明、作战屏幕演示、作战模拟器、遥感遥测等方面,在下个

世纪都将有更大的发展。

5. 先进自动机

过去常提光、机、电一体化,实际上当前已发展成光、机、电、算、材一体化。自动加工系统是下个世纪工业企业产品的必然趋势,它可完成加工的程序化、自动化、智能化、自适应,甚至自动修复。因此发展各种类型的传感技术是必不可少的,如机器人的视觉、触觉、反馈指令的动作协同。中等功率的激光器可以满足各类加工自动化的要求,如对钢铁、塑料、布料、陶瓷材料以及超硬、超薄、脆性等特殊材料的切割、打孔、焊接、表面热处理、表面合金化。适合由微机控制的自动加工系统和在恶劣环境中的遥感遥测技术等都可望获得较大的发展。

利用激光的方向性和单色性可提供各种基准,如长度、频率、时间。又如大型装置的安装、准直,水坝应力监测,机场的夜间导航,矿山的远距离引爆,大型隧道的自动导航钻进等都可利用激光的准直定位装置。

激光分子束外延技术已应用于研制新材料,如人工合成材料中以原子层数为单位的材料合成。其他如激光光谱术、全息术、非线性光学、激光化学动力学等高科技也将获得广泛的应用。

高效率的半导体二级管激光器有可能应用于下世纪的普通照明光源。此外,激光在光显示技术和光印刷技术中都将发挥更大作用。

(责任编辑 肖庆山)