

高能激光六十年：回顾与展望*

许晓军

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 长沙 410073)

摘 要: 激光的本质是微观粒子的有序运动, 而热是微观粒子的无序运动, 高能激光产生过程中这一对矛盾贯穿始终, 可以说高能激光的发展史, 就是一部与废热的斗争史。回顾高能激光发展的六十年, 剖析高能激光的科学内涵, 我们大致将其划分为前后三十年的两个阶段, 前一阶段着重解决能用的问题, 后一阶段重在解决好用的问题。围绕产热、散热, 我们剖析了激光功率、光束质量、效率三者之间的内在关联, 简要回顾了各类高能激光器的发展历程, 评价了各类高能激光的特色, 展望了高能激光未来的发展路径。

关键词: 高能激光; 废热; 化学激光; 半导体激光; 全固态激光; 碱金属激光

中图分类号: TN248

文献标志码: A **doi:** 10.11884/HPLPB202032.0480

Retrospect and prospect on 60-year development of high energy laser

Xu Xiaojun

(College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Ordered motion of quantum particles produces laser, while disordered motion produces heat, this conflict overwhelms development of high energy laser since its beginning, and the guide-line of its history is just a battle with waste heat. Reviewing the 60-year development of high energy laser and examining the science behind it, we divided its history into pre and past 30 years, which separately solved the problem of capability and was just solving the problem of easy-to-use ability. Sticking with heat generation and dissipation, we discussed inner links between power, beam quality and efficiency of high energy laser, reviewed the rise and fall of different kinds of lasers, and predicted future development of high energy laser.

Key words: high energy laser; waste heat; chemical laser; diode laser; all solid state laser; alkali laser

1960 年激光发明之后, 立即催生了其军事应用的需求, 高能激光的研究与发展也几乎同步而生^[1], 到 2020 年正逢六十年。这六十年是高能激光挫折与希望不断交织的六十年, 也是理想与现实不断接近的六十年。在中国传统文化中, 六十年有着特殊的含义, 标志着一段纪年的结束和另一段新纪年的开启, 在这个时刻对高能激光的发展史进行回顾就具有特别的意义, 因为未来的线索往往就藏在历史之中。当我们在时间的长河中回望时, 就更能清晰地识别出那些标志性的事件, 也更能清晰地串联出历史的逻辑, 同时我们也将对其科学之源进行回溯, 寻找其科学上的逻辑, 掌握了科学, 也就在纷繁中掌握了理解高能激光的钥匙。

激光的概念可上溯至 1916 年爱因斯坦受激辐射概念的创立, 作为一种高度有序的辐射, 其核心在于实现宏观材料中微观粒子的有序运动, 从无序中建立有序是典型的熵减过程, 因此激光是一个开放系统, 必须注入外界能量, 同时也必然伴随着能量的损失, 那就是废热。高能激光之所以高能, 首先就在于其绝对的能量注入是巨大的, 如果没有高的转换效率, 废热以绝对量计将很可观, 这些大量而无序的能量在介质中快速累积, 以温升的形式表现出来, 统计上减弱能级之间粒子数的反转, 动力学上降低能级的寿命, 导致激光器效率的降低; 在宏观的固体、流体力学上则体现为各种应力、应变、损伤, 以及规则流场的破坏, 最终传导至光学, 以光束质量恶化的形式表现出来。因此, 我们常说高能激光要满足的“三高”——高能、高光束质量、高效率——从来就不是孤立存在的, 其背后的关键点就是废热。

正因为如此, 在回顾高能激光六十年发展史时, 我们将清晰地看到一条主线贯穿于其中, 那就是与废热的斗争! 简言之, 如何减少废热的产生, 如何快速带走废热, 一直以来都是高能激光领域科学家们孜孜不倦的追求, 而

* 收稿日期: 2019-11-30; 修订日期: 2019-12-25

基金项目: 国家重点研发计划项目

作者简介: 许晓军 (1973—), 博士, 研究员, 从事高能激光、大气光学和自适应光学研究; xuxiaojun@nudt.edu.cn。

每一次换热方式的变化、每一次新的换热结构的推出、每一次新的低热介质的应用,都是高能激光领域一次大的变革。在这六十年的斗争史中,我们对这条规律的认识越清楚、越深刻,我们离高能激光的彼岸也就越接近。本文以 20 世纪 90 年代初为界,将高能激光的发展史分为两段:前三十年(1961—1991),这一时期化学激光快速发展,走出了一条既能实现高效散热,又能实现兆瓦级激光输出的道路,着重解决了高能激光能用的问题,但其体积规模偏大限制了大多数机动平台的应用;后三十年(1991—至今),随着电驱动半导体激光的发展,半导体泵浦的固体/气体激光效率快速提升,激光器体积规模有望适应机动平台的应用,重在解决高能激光的好用问题,但实现高效紧凑型 MW 级激光输出的模式仍在探索之中。

1 超音速流动气体散热,解决了高能激光能用的问题(1961—1991)

1960 年红宝石激光器诞生仅一年后,美国科学家 Snitzer 演示成功钕玻璃激光器^[2],并提出了光纤激光的概念^[3],同年 12 月美国 ARPA 组织的科学委员会将宝石和玻璃基质激光器作为优先发展对象,1962 年贝尔实验室的 Geusic 和 Scovil 建立了一套激光晶体的筛选准则,在 40 余种晶体中选出了钇铝石榴石(YAG)晶体并实现出光,今天全固态激光器的雏形此时都已出现。

1.1 流动气体激光的优势初显

一开始,美国军方鉴于气体密度太低,首先选择的就是采用玻璃和晶体基质的固体激光器,钕玻璃激光很容易获得光学级大尺寸增益介质,自然就成为发展的重点。然而挫折、或者更确切地说对高能激光的深刻认识也就此产生,那就是废热以及高光束质量的重要性。闪光灯泵浦的效率极低,大量的废热在钕玻璃棒中累积,固体材料的低热导率很难及时将废热导出来,很容易使材料炸裂。到 1965 年美国 ARPA 基本上否决了固体激光这条道路。

气体介质在热管理方面的优势就体现了出来。最先是 1963 年 Patel 发明的放电激励纵向流动二氧化碳激光器^[4],Patel 通过引入氮气传能实现了选择性激励,电光效率显著提高,Patel 很快通过纵向流动散热将二氧化碳激光放大到当时很震撼的连续 200 W 输出;然而气体放电的电子能量是非量子化的,难以实现选择性泵浦,这从根本上限制了效率,纵向流动的散热能力远远跟不上要求。休斯公司的 1.5 kW 激光器需要约 16 m(54 英尺)长的放电管,雷声公司虽然实现了 8.8 kW 和据说 13% 的电效率,需要的放电管达到 600 英尺^[5]!这显然不现实。

这时两个对高能激光发展影响深远的技术产生了,那就是大口径非稳腔,以及超音速横向流动散热技术。1963 年,苏联科学家 Basov 等提出利用分子快速绝热膨胀时不同能级的差分弛豫来实现反转,随后有人建议将高温气体通过超音速喷管膨胀来产生;1966 年,美国 Avoc 公司的 Gerry 等依据此原理建成了燃烧驱动气动二氧化碳激光器。这种模式又称为自持式,原因在于能量由燃料燃烧获得,不需要额外注入。超音速横向流动将快速散热和大尺寸增益介质完美地结合起来,再加上 1965 年 Siegman 提出的大口径非稳腔就为激光器的功率放大铺平了道路。到 1970 年时 Avoc 公司就将气动二氧化碳激光放大到 135 kW,并很快为美国陆海空三军分别建造了一台^[1],美国空军则在 20 世纪 70 年代后期将其装载在波音 707 飞机上,这就是著名的机载激光实验室(ALL)计划。但是二氧化碳激光燃料利用效率偏低,燃料比功率约 10 J/g,并且由于大气传输的热晕效应,使得随着激光功率的提升,到靶功率密度不升反降,实际使用并不理想。

1.2 化学激光的成功演示

二氧化碳激光的发展为后来者储备了宝贵的思想和技术,那就是波长更短、效率更高的化学激光器,因为工作模式接近,两者又往往统称为气动与化学激光器。早期的化学激光都是脉冲运转的,更多的是研究化学动力学的工具,1969 年美国宇航公司 Spencer 等利用高温电弧分解 SF₆ 获得自由 F 原子,再往超音速横向低温含氟气流中注入 H₂ 气,很快实现 1 kW 以上 HF 激光连续输出^[5];紧接着联合技术公司的 Meinzer 将电弧驱动改为燃烧驱动^[6],解决了能量注入问题,实现了自持式运转,化学激光的运行模式开始自洽。化学激光的能源直接来自于化学能,即分子键能在化学反应中的释放,而分子键能具有自然界除核能之外的最高储能密度。以 HF/DF 化学激光为例,其燃料比功率大于 100 J/g,喷管面积比功率大于 100 W/cm²,且具有非常好的流量和体积定标放大性能。随后在 TRW 公司,燃烧驱动 DF 化学激光很快就放大到惊人的水平,1971 年基线演示激光器(BDL)实现 100 kW 输出,1974 年海军先进化学激光器(NAACL)实现 400 kW 高光束质量输出,1980 年就建成了 2.2 MW 的先进中红外化学激光器(MIRACL),此功率水平至今仍然保持了高能激光领域的世界纪录。1978 年美国空军实验室 McDermott 发明的 1.315 μm 短波长氧碘化学激光器(COIL)也解决了放大的关键技术问题,到 1991 年,HF 化学激光器也实现了兆瓦级输出。即使以今天的眼光看,这个发展速度也是惊人的!此后面向天基、地基、机载的化学激光都进入了工

程研制,直到2010年装载在波音747上的氧碘化学激光器击落了飞行中的导弹。

在这三十年里,可以说化学激光是当之无愧的主角,它之所以能解决高能激光能用的问题,其核心在于采用了超音速横向流动散热技术,更确切的说,是将废热随介质直接以超音速高速排走,而非散走,这样就基本不需要考虑介质中废热的累积,超音速流在扩张过程中创造的低温低密度气体环境也确保了优异的光束质量。但随着逐渐推向应用,化学激光的两大软肋也逐渐暴露出来:一是低腔压下需要用与火箭发动机同源的引射式压力恢复系统才能将废气排出去,而引射系统的燃料消耗和体积远远大于激光器本身;二是化学激光必须有复杂而庞大的燃料供应,这就限制了激光武器的弹仓,且战场保障困难。

1.3 化学激光的展望

虽然化学激光器在今天受到很多质疑,但它验证了高能激光的存在性,其所具有的无与伦比的单口径功率定标放大能力、优异的光束质量和 $1\sim 4\ \mu\text{m}$ 光谱覆盖范围也是其他类型高能激光无法比拟和难以取代的。排除机动性要求高的场合,体积规模偏大的化学激光在地基等应用中仍然具有很大的发展空间。随着新技术和新材料的发展,如新型微阵列喷管3D打印、再生冷却、高效低温吸附、高密度储氢、光腔引射增压等技术的应用,化学激光器有望大幅度压缩体积,仍具有巨大的发展潜力。

2 半导体激光的实用化,有望解决高能激光好用的问题(1991—2020)

在化学激光蓬勃发展的同时,一项影响深远的技术已经悄然成熟,那就是大功率半导体激光器的实用化。1992年,基于量子阱的大功率半导体激光器经过十年左右的技术积累后迎来了突破,美国SDL公司1 cm巴条室温下连续波输出超过100 W^[7],随后近三十年中半导体激光的性能指标不断提升、价格不断下降。无论是从应用还是科学的角度,半导体泵浦都具有极重要的意义。半导体激光高的电光转换效率使得全电驱动成为了可能,而全电驱动模式使无限弹舱成为可能,并具有更灵活的战场适用性;从科学的角度,大功率半导体激光器实用化为高效、高强度的选择性泵浦创造了必要条件,从而为采用低产热激光体系提供了可能。

激光器废热源于量子亏损,三能级激光器具有更低的量子亏损,也更适合用于高能激光器,但其代价就是泵浦阈值的显著上升,还需要通过选择性泵浦精确地实现能量向特定能级的输送,要完成这个目标,从泵浦的角度只能选用激光泵浦。有了半导体激光泵浦源,接下来就是选用什么体系的问题,镱离子和碱金属原子相继走上了舞台,两者都是三能级体系,分别具有固体和气体介质中最低的量子亏损,也都具有极其简单的能级结构,可以有效实现强泵浦下能量在能级间的可控传递,抑制不必要的能量耗散。

2.1 半导体泵浦掺镱全固态激光器

1991年,美国林肯实验室的Fan T Y首先建议用量子亏损更低的镱离子替代钕离子,并利用半导体激光泵浦演示了室温运转^[8]。此时的激光基质仍然主要是YAG,在热导率没有显著变化的前提下,提高介质的比表面积加快散热就成了重点。德国斯图加特大学Giesen教授在听了1991年Fan T Y的报告后,发明了至今有重要影响的盘片激光器^[9];同年俄罗斯科学家Gapontsev成立了光纤激光领域赫赫有名的IPG公司,在此之前的1988年,Snitzer就提出了双包层光纤^[10],再加上更早出现的板条,全固态激光器的三种典型结构已经聚齐。

进入21世纪,在美国军方联合高功率固体激光器(JHPSSL)和全电驱动鲁棒激光计划(RELI)的支持下,大功率半导体激光泵浦的板条激光、盘片激光、光纤激光的输出功率和效率都获得了显著提升,再加上工业界激光先进制造的市场推动,半导体泵浦全固态激光器迎来了发展的黄金时代。这里面最大的明星无疑是光纤激光器,双包层大模场增益光纤结构完美地实现了泵浦光的约束和激光的模场控制,特有的模块化组装和分布式散热结构又极大地促进了均衡散热,到2009年IPG公司的单纤单模全光纤结构实现10 kW功率输出。工业化生产的模式为高能激光的应用提供了“货架商品”,电驱动全固态高能激光器的试装应用开始全面铺开。

盘片和光纤为代表的结构通过比表面积的增大,提高了换热能力,但却以增益体积减小为代价。在IPG公司单纤单模10 kW的报道之后,全光纤结构再无功率突破;盘片激光单片的功率水平也在6 kW左右。为了进一步提高散热效果,以美国通用原子公司为代表发展了多片晶体浸入式液冷技术,将多片单模块功率水平提升至75 kW^[11];鉴于掺镱体系对温升更为敏感,以Fan T Y为代表的科学家一直强烈建议在低温下工作^[12],这样既有利于降低阈值泵浦强度,又能显著提升激光晶体的热导率,以YAG为例,100 K下的热导率是常温下的3倍,因此深冷技术也是全固态激光器的一个发展方向。但这些都增加了系统的复杂性。

在经历数十年发展后,半导体泵浦全固态激光器的发展似乎又进入了一个瓶颈期,散热能力的限制导致单路

全固态激光器的输出仍然远低于化学激光器,因此无一例外都需要合束。合束是全固态激光器绕不开的一个关键词,但随着合束数量的增加,波前控制残差的累积将导致光束质量退化,这也是不小的挑战。正因为如此,目前的电驱动全固态高能激光器绝大部分仍然在 100 kW 水平,离军事需求差得比较远。

2.2 半导体泵浦碱金属蒸气激光器

另一种具有极低量子亏损的激光体系就是碱金属原子,1999年,波兰学者 Konefal 在混入乙烷的铷蒸气中观察到了放大的 D1 线自发辐射^[13],这一现象马上被美国利弗莫尔实验室的 Krupke 捕捉到,经严格估算后,他立即申请了半导体泵浦碱金属蒸气激光器(DPALs)的专利^[14],并做了单口径兆瓦级系统的概念设计。DPALs 的原理非常简单,以流动碱金属饱和蒸气做增益介质,以大功率窄线宽半导体激光器做泵浦源,以碱金属原子著名的 D 双线分别作为泵浦线和激射线,构成一个标准的三能级激光系统,通过添加缓冲气体促进粒子数在泵浦和激射上能级的快速转移,并实现谱线的均匀展宽。

Krupke 本人和很多学者都将 DPALs 称为气固混合激光器。它首先继承的就是气体激光器流动热管理的优点,又继承了掺镱系统量子亏损小的特点,甚至可以说具有迄今为止所有激光系统最低的量子亏损,通过碱金属原子双 D 线强电偶极跃迁的高发光能力又弥补了气体介质稀薄的特点,全电驱动的方式克服了燃料供给的难题,最终成为一种近乎理想的高能激光器,既具有优良的单口径定标放大能力,又具有非常诱人的功重比前景,目前已经受到越来越多的关注。

虽然原理很简单,但 DPALs 的物理和工程门槛却一点也不低。它既需要足够高的泵浦强度越过三能级系统的阈值,又需要高强度泵浦支持的快速受激吸收和发射过程来压制碱金属原子的强自发辐射,但碱金属蒸气无法像固体介质一样实现对泵浦光的天然约束,在整个增益介质长度范围内实现高强度泵浦并不容易。在工程上 DPALs 也有三大挑战,首先就是窄线宽大功率半导体泵浦源的发展,其次是碱金属饱和金属蒸气的可控流动,最后是抗腐蚀、耐强光、低损耗光学元件的研制。好在这些困难都只在技术层面,而非原则性的物理障碍。一旦物理和工程上的门槛越过,DPALs 的发展就非常快,从 2012 年左右开始工程放大算起,DPALs 功率逐年快速提升,到 2016 年 9 月,美国利弗莫尔实验室已经实现了单口径 34 kW 输出^[15],计划 2019 年实现 120 kW 输出。

2.3 半导体泵浦激光的展望

近三十年的发展,半导体泵浦全固态激光虽然转到了产热更少的镱离子,并采用了各种比表面积更大的几何结构,但基质材料在这六十年来并没有显著变化,仍然是 YAG 为主热导率($\sim 14 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})@20^\circ\text{C}$)不高的氧化物体系,深冷条件下热导率的提高也非常有限。近年来基于化学气相沉积法(CVD)生长高品质光学级金刚石等碳基高热导率($\sim 2000 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})@20^\circ\text{C}$)材料的技术越来越成熟,已经可以获取较大的口径,并在金刚石拉曼激光上获得了成功应用。我们大胆设想,有没有可能设计出碳基复合激光材料?如果成功,将极大地改变全固态激光的现状。

对于半导体泵浦气体激光,Krupke 的研究经历就是一个心路历程。他的职业生涯起始于 1961 年在宇航公司研究掺稀土离子和过渡金属的固体激光器,1966 年到休斯公司后又研究过化学激光,后来又尝试过光泵浦的含钕稀土配合物、螯合物气体激光,1972 年进入利弗莫尔实验室后,他的大部分研究转向了固体激光,曾长期担任激光部执行主管,并受邀为 IEEE 量子电子学千禧年专刊撰写掺镱全固态激光器 10 年发展评述^[16],但他退休前最后一次重要的发明却是向气体激光的回归。在化学激光与全固态激光各领风骚数十年后,DPALs 开创了一条气固融合的新道路,而在这条道路的指引下,可能还有更深的融合空间,比如我们提出的半导体泵浦高能纳米气体激光器^[17-18]。

3 结 论

高能激光与废热斗争的六十年发展史表明:解决了废热也就能解决高能激光能用的问题,而解决了高效全电驱动,也就能解决高能激光好用的问题。正是因为固体和气体介质在散热方面有着各自的特点,从而也就决定了不同的发展模式、路径和特色。通过回顾过去,高能激光未来的发展路径也变得越来越清晰,那就是一定要在全电驱动的模式下,从激光体系的源头减少废热,并发展如碳基复合材料这样的高热导率激光介质;或是寻找新的运行体制,全面融合气体与固体的优点。有着六十年的经验与教训做积累,随着能用的问题得到解决,好用的问题逐步克服,高能激光一定会在全面应用中迎来精彩未来。

参考文献:

- [1] Hecht J. Lasers, death rays, and the long, strange quest for the ultimate weapon[M]. New York: Prometheus Books, 2019.

- [2] Snitzer E. Optical maser action of Nd^{3+} in a Barium crown glass[J]. *Phys Rev Lett*, 1961, 7(12): 444-446.
- [3] Snitzer E. Proposed fiber cavities for optical masers[J]. *J Appl Phys*, 1961, 32(1): 36-39.
- [4] Patel C K N. Continuous wave laser action on vibrational-rotational transition of CO_2 [J]. *Phys Rev*, 1964, 136(5A): A1187.
- [5] Spencer D J, Mirels H, Jacobs T A, et al. Continuous-wave chemical laser: US3688215[P]. 1972-08-29.
- [6] Meinzer R A. A continuous-wave combustion laser[J]. *Int J Chem Kinet*, 1970, 2(4): 335.
- [7] Sakamoto M, Endriz J G, Scifres D R. 120 W CW output power from monolithic AlGaAs (800 nm) laser diode array mounted on diamond heat sink[J]. *Electron Lett*, 1992, 28(2): 197-199.
- [8] Lacovara P, Choi H K, Wang C A, et al. Room-temperature diode-pumped Yb: YAG laser[J]. *Opt Lett*, 1991, 16(14): 1089-1091.
- [9] Giesen A, Hugel H, Voss A, et al. Scalable concept for diode pumped high power solid-state lasers[J]. *Appl Phys B*, 1994, 58(5): 365-372.
- [10] Snitzer E, Po H, Hakimi F, et al. Double-clad, offset core Nd fiber laser[C]//Proc Conf Optical Fiber Sensors. 1988.
- [11] Warwick G. General atomics: Third-gen electric laser weapon now ready[J]. *Aviation Week & Space Technology*, 2015, 3(1): 30-31.
- [12] Fan T Y. Cryogenic Yb^{3+} doped solid state lasers[J]. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron*, 2007, 13(3): 448-458.
- [13] Konefal Z. Observation of collision induced processes in rubidium-ethane vapour[J]. *Opt Comm*, 1999, 164: 95-105.
- [14] Krupke W F. Diode-pumped alkali laser: US6643311[P]. 2003-11-04.
- [15] Wiscoff P J. Diode pumped alkaline laser system: A high powered, low SWaP directed energy option for ballistic missile defense high-level summary[R]. LLNL-TR-730237, 2017.
- [16] Krupke W F. Ytterbium solid state lasers—The first decade[J]. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron*, 2000, 6(6): 1287-1296.
- [17] 许晓军, 张汉伟, 王红岩, 等. 激光泵浦的流动纳米颗粒稀土离子激光器: CN102570283[P]. 2012-07-11. (Xu Xiaojun, Zhanghanwei, Wang Hongyan, et al. Laser pumped flow nanoparticles rare earth ion laser: CN102570283[P]. 2012-07-11)
- [18] Yang Xu, Wang Hongyan, Yang Zining, et al. Diode pumped nanoparticle gas laser physics: A preliminary modeling study[J]. *Opt Expr*, 2017, 25(9): 10574-10585.