

高能半导体泵浦气体激光器

刘泽金*, 王红岩, 许晓军

国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073

摘要 在重新梳理高能激光底层物理问题的基础上, 指出半导体泵浦气体激光器将是未来高能激光器的重要发展方向, 讨论了半导体泵浦气体激光器的基本原理和核心要求, 并以半导体泵浦碱金属蒸气激光器为例进行了详细剖析, 对半导体泵浦气体激光器的前景进行了展望。

关键词 激光器; 高能激光; 半导体泵浦; 气体激光; 碱金属蒸气激光

中图分类号 TN248

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0401001

1 引言

人类对光武器的梦想已有两千余年历史, 1960 年激光的诞生催生了将其作为定向能武器的需求^[1], 高能激光器是激光武器系统的核心, 其更新换代往往意味着整个激光武器系统的革新。科学家们迄今为止观测到的激光谱线有万余条, 仅列举这些数据就需要上千页^[2], 然而能称得上高能激光的却是屈指可数, 高能激光的科学规律何在? 高能激光的特殊性在哪里? 都是值得我们思考的问题。

作为一种武器的核心器件, 高能激光器既要立足于科学、又要面向应用, 既要解决存在性问题、又要解决适用性问题。在激光史上, 研究人员对这些问题的思考一开始并不是全面的, 而是逐渐深入的, 到今天研究人员已经可以给出一个相对更全面的认识: 高能激光器之所以区别于普通激光器, 需同时满足高能/高功率、高光束质量、高效率三个先决条件, 这三个条件相互关联, 共同决定了其存在性; 当考虑到能源供给和各种机动平台应用时, 高能激光器又需满足全电驱动、高功重比、高功体比的新要求。一言以概之, “五高一电”将是未来高能激光器发展的原则。

以“五高一电”原则为起点, 当研究人员重新思考高能激光的科学基础时, 结果就自然地指向了一种新的高能激光器架构, 即半导体泵浦的气体激光

器(DPGL)。这种特殊的激光器既不同于传统的气体激光器, 也不同于固体激光器, 具有鲜明的特点。它的体系架构的总原则是什么? 气体介质所起的功能是什么? 气体种类选择有什么依据? 这些都需要深入研究。通过研究发现, 半导体泵浦碱金属蒸气激光器(DPAL)提供了一个近乎理想的案例。基于本团队十余年的研究积累和理解, 依据 DPGL 的普遍原理分析了 DPAL 的科学逻辑, 以期判断 DPAL 的发展前景, 并为寻找更新的 DPGL、促进高能激光的发展提供思路。

2 高能激光器的新方向——半导体泵浦气体激光器

自 20 世纪 90 年代初大功率半导体激光器获得突破以来^[3], 半导体激光器的性能不断提升, 价格不断下降^[4]。半导体激光器实现了电光的高效转换, 无论在应用、还是在科学基础层面都为全电驱动高能激光器的发展提供了支点。高能激光器成功的关键在于快速散热, 为此, 首先是要少产热, 而废热最根本的来源就是量子亏损, 换言之, 就是要追求高的量子效率, 而随着量子效率的不断提高, 原有的四能级、三能级系统将进一步演化为准二能级系统, 当然其代价就是高阈值。相比于早期的灯泵浦, 半导体激光泵浦更易越过阈值, 实现高强度的选择性泵浦, 从而实现高量子效率, 这是之前任何一种泵浦方式

收稿日期: 2020-11-02; 修回日期: 2020-11-13; 录用日期: 2020-11-27

*E-mail: zejinliu@nudt.edu.cn

都难以做到的。

进入 21 世纪,随着激活离子从早期的钕换成了产热更低的镱,采用板条、光纤、盘片等高比表面积的散热结构,再加上激光加工牵引下源源不断的市场推动力,半导体泵浦全固态激光器(ASSL)迅猛发展^[5],至今全世界已建成了多套 10~100 kW 战术激光武器演示系统。随着 ASSSL 功率放大倍数的提高,激光器受晶体内部热效应的限制越来越明显,其单路输出能力难以满足用户要求。究其根本在于:ASSSL 的基质材料在 60 年的时间里并无大的变化,而提高比表面积对应的就是缩小模体积,这从根本上限制了 ASSSL 的单路输出。一般认为平均功率为 100 kW 是高能激光的入门门槛,以此为标准,目前鲜有一种 ASSSL 仅凭单路输出就能越过这个门槛,所以合束始终是 ASSSL 绕不过去的一个关键词。可以说,除相控阵这种将分布式光源与分孔径发射相融合的新体系架构外,绝大多数单口径输出的合束方案都是不得已而为之的。

经过一个轮回,一些高能激光领域的科学家们又将眼光重新投向了气体介质^[6]。对于固体激光而言,如果基质材料没有大的变革,高效热管理与高能激光所需的模体积就始终是一对矛盾。但这个问题早已在气动与化学激光上得到了很好的解决:超音速横向气流快速排走废热的同时又提供了均匀性良好的大口径气相激光介质,再配以大口径非稳腔,研究人员很快就在 20 世纪 80 年代初实现了单口径兆瓦级高光束质量输出^[7]。然而这些光源无一例外都工作在低气压下,因此需要庞大的压力恢复系统将废气排出去,这就使得整个系统的体积、重量居高不下,复杂的燃料供给也给后勤保障增加了不小的难度。以装载兆瓦级氧碘化学激光(COIL)的机载激光武器(ABL)为例,其光源的功重比仅为 0.018 kW/kg^[8]。2010 年 ABL 在飞行试验中击落了数英里(1 mile = 1609.344 m)远飞行中的导弹^[9],这可谓技术上的巨大成功,但由于激光器效能低,无法满足机载更高输出功率的要求,美国导弹防御局(MDA)不得不将其搁置,转而寻求更紧凑的全电驱动光源,MDA 给出的远景需求是功重比达到 0.5 kW/kg^[8],差距之大可见一斑。

能否充分结合两者的优势,将半导体泵浦用于横向流动气体介质,这已经成了高能激光界研究人员这些年新的思考方向。

但要让大家接受 DPGL 的概念并不容易,日常多见的放电激励气体激光器等已给人们留下了刻板

的印象,以至于当提到气体激光时,过时、笨重、低效等已经成了它的标签。为此,有必要先回答一个问题:光泵浦是否适用于气体激光器?其次回答另一个问题:半导体激光能否用于气体介质的高效泵浦?

3 半导体泵浦气体激光器的可行性和基本原则

实际上气体和固体都只是宏观物质的物性划分,从微观角度看,所有的激光行为都发生于量子态之间的跃迁,在这一点上两者并无本质的差别,而气体介质的均匀性使得泵浦方式的多样性成为可能。在气体放电等传统泵浦方式中,能量非量子化的自由电子无法用于选择性泵浦,从而显著降低了转换效率,并造成了大量的废热沉积,这是造成体积大、效率低的原因。光子能量的量子化特征使其可用于高效的选择性泵浦,从而降低废热沉积,单从这一点讲光泵浦在提升效率方面就具有很大的价值。但气体介质的能级受环境影响要远弱于固体,其光谱多为“干净”的线状谱,因而对泵浦源的线宽提出了苛刻的要求,这也正是光泵浦气体激光器此前只用于个别特殊谱段,如远红外和太赫兹^[10]的重要原因。人们认为气体激光器的体积大,这并不见得准确,事实上,用于衡量激光介质的出光能力的参数,除了粒子数密度外还有一个最重要的变量,那就是发光截面。很多气体介质(如下所述)拥有大的发光截面,也能弥补气体介质的稀薄属性。

众所周知大功率半导体激光器的光谱特性要差得多,这样就形成了两个自然的发展方向:1)寻找高峰值发光截面的介质,大量添加缓冲气体形成均匀加宽线型,通过减小吸收线型尾部的下降速率来降低对半导体线宽的要求,并同步适度压窄半导体激光的光谱;2)直接寻找或设计具有宽带吸收谱的气相介质。前者如 DPAL^[11]、半导体泵浦亚稳态稀有气体激光器(DPRGL)^[12]等;后者如碱金属-稀有气体准分子激光器(XPAL)^[13]、光泵氧碘传能激光器(DOIL)^[14]、半导体泵浦一氧化硫分子激光器(DPSOL)^[15]等。本团队独立提出的掺稀土离子纳米气体激光器(DPNGL)^[16-17]也可以归在后一类。

气体介质与泵浦源的光谱匹配只是 DPGL 最基础的一环,依据高能激光“五高一电”的原则,综合兼顾激光动力学和实用性,本团队给出全电驱动高能激光视角下 DPGL 的统一描述和要求:

1)能级体系。气体介质必须构成始自基态的准二能级工作体系,且泵浦跃迁发生在目前功率、效

率、可靠性最高的 GaAs 系列半导体激光器谱段 (700~1000 nm) 内,为了抑制泵浦能量的不可控传递,其能级结构应该尽可能的简单。

2) 能级寿命。为了弥补气体介质相对于固体介质的密度劣势,上述准二能级体系间的跃迁要具有较大的发光截面,从根本上来说要具有相对大的爱因斯坦自发辐射系数或短的自发辐射寿命,且介质本身或是额外添加的缓冲气体不能形成对高能级的浓度淬灭。

3) 物理特性。上述气体介质要容易获得,且要在高能激光的强辐射场中满足物理上的稳定性,并尽可能具备化学上的稳定性。

回过头来看,DOIL 利用氧分子在近红外谱段的宽带弱吸收谱实现单重态氧激发,再将能量传递给碘原子,利用其磁偶极电子态跃迁实现 $1.315\ \mu\text{m}$ 的激射,其中最大的问题在于吸收强度太弱,多级能量传递导致效率偏低;XPAL 这种分子吸收、原子激射的架构虽然实现了宽带吸收,但也是吸收偏弱,经分析可得其连续输出阈值可能达到 MW/cm^2 量级^[18];DPRGL 倒是充分借鉴了 DPAL 的运转模式,但首先需要在较高气压下通过气体放电等方式获取亚稳态稀有气体原子,工程实现难度显著增加,其复杂的能级结构也增加了能量传递的不确定性;DPSOL 则充分利用了一氧化硫在 $900\sim 1000\ \text{nm}$ 较强的电子态宽带吸收谱,但它本身是一种很不稳定的分子,随着密度的上升很容易转换成更稳定的双聚体。

综合来看,DPAL 和 DPNGL 是两个更典型的案例,前者将碱金属原子这一“天然原子”的天赋发挥到了极致,而后者则充分发挥了纳米颗粒这一“人工原子”的可设计性。相比而言,DPNGL 的研究才刚刚起步,而 DPAL 的发展已经迈入了工程放大,讨论的意义更大,下面重点对其进行分析。

4 成功案例——半导体泵浦碱金属蒸气激光器

2010 年,长期跟踪激光武器发展的专栏作家 Hecht^[19] 在著名的《激光世界》杂志以“新的军用激光器诞生了”为题撰文,对 DPAL 进行报道。也就是在当年,ABL 试验完毕即被搁置;同年美国空军武器实验室(AFRL)成功演示流动 DPAL^[20],一举解决了此前静态 DPAL 实验中的热翻转问题,使 DPAL 的概念不断完整;同样是在这一年,MDA 将 DPAL 纳入支持,并逐渐成为其青睐的方案,利弗莫

尔实验室(LLNL)在 MDA 的支持下基本是一年一个台阶,在 2013 年基于其独特的波导增益结构设计实现峰值为 3.9 kW 的激光输出功率,2015 年将激光输出功率提升至 14 kW,到 2017 年实现单口径 34 kW 激光输出功率^[21],目前最新的计划表明其将在 2024 年演示 300 kW 紧凑化系统^[22]。

任何一种激光器成功的背后都有它的科学基础和逻辑,理解了这一点,也就更能看清它未来的发展趋势。下面在 DPGL 的概念框架下以铷元素为例来专门分析 DPAL 背后的科学逻辑:

1) 高量子效率。铷 DPAL 运转于铷元素最低的三个电子态能级间,以第一激发态 $5P$ 因电子自旋分裂而成的 $5P_{3/2}$ 和 $5P_{1/2}$ 态分别作为泵浦和激光上能级,二者与基态 $5S_{1/2}$ 构成一个标准而简洁的准二能级系统,特别值得注意的是, $5S_{1/2}$ 、 $5P_{3/2}$ 和 $5P_{1/2}$ 态的能级简并数分别为 2,4,2,这一组合降低了连续波运转的难度。780 nm 的泵浦波长恰好落在 GaAs 半导体激光谱段范围内,这就为半导体泵浦提供了可能,而其 98.1% 的量子效率更使其他激光器都相形见绌,相比之下,ASSL 中 Yb: YAG 激光器的最高量子效率也仅为 91%^[23],这样就在源头上保证了高效率以及低废热沉积。

2) 高发光截面。铷原子外层仅有一个单电子,其双 D 线跃迁属于强电偶极跃迁,激发态自发辐射寿命仅为 26 ns,对应极强的发光能力^[24];与之相比,ASSL 中的掺稀土离子跃迁来源于 f-f 电子的电偶极禁戒跃迁,自发辐射寿命长达数 ms,谱线强度远低于铷原子。即使通过添加大气压级缓冲气体实现谱线均匀展宽后,铷原子的发光截面仍然要比镱离子高出 6~7 个量级^[11,23]。如此高的发光截面与碰撞加宽的洛伦兹线型相结合,显著降低了激光器对半导体泵浦线宽和中心波长漂移的要求,事实上只需将商用大功率半导体激光器的线宽(约 2~3 nm)往下压缩一个量级,就足以保证铷原子对泵浦光的高效吸收,而获得窄线宽半导体激光输出并不存在原则上的困难;在如此大的发光截面下,极稀薄的碱金属原子 ($10^{13}\sim 10^{14}\ \text{cm}^{-3}$) 就足以支持 DPAL 的高效运转,这也正是 DPAL 实现高功重比、高功体比的基础。

3) 高缓冲气压。将碱金属元素加热到 $100\ ^\circ\text{C}$ 左右就可以产生足够浓度的原子蒸气^[24],虽然碱金属元素的化学活性很强,但这种单原子蒸气在大量稀有缓冲气体的保护下具有非常高的稳定性。事实上,自研的数代循环流动碱金属蒸气装置已安全运

行多年,并未因发生化学反应而损坏。在这里,大气压级稀有缓冲气体的添加在 DPAL 的成功运转中起到了关键作用,不仅能促进粒子数在激发态之间的快速转移,又能通过碰撞均匀加宽实现半导体激光的高效吸收,气体还承担了吸纳 DPAL 运行中因量子亏损产生的废热积累的作用,在合适的气压下,只需数十米每秒的低速横向气流就足以带走这些废热^[25]。

这几点环环相扣,共同在科学基础上构成了一个自洽的逻辑链条。在 DPAL 的物理问题解决后,其发展本质上就转到了技术和工程上,随着窄线宽半导体泵浦源、流动蒸气结构、高品质光学元件三大关键技术^[26]的解决,DPAL 在功率放大上的快速进步也就可以理解了。但这不意味着 DPAL 将是 DPGL 的终点,反而因为其展现出来的巨大潜力和初步成功,将成为未来 DPGL 发展的标志性起点。事实上 DPAL 也并非完美,碱金属原子极强的自发辐射速率本身就是一把双刃剑,在保证大增益和对泵浦光高效吸收的同时,也留下了压制自发辐射荧光的难题。我们应该继续解放思想,积极地寻找更完美的 DPGL 体系,从这个意义上讲,DPGL 的思想实现了气体与固体在更高程度上的融合,也实现了从被动选择激光介质到主动设计激光介质的转变,我们有理由也对它报以大的期望。

5 结 论

回顾高能激光 60 年曲折而辉煌的发展历程,面向高能激光的适用性,我们看到了半导体激光发挥的巨大作用,也相信流动气体介质在热管理上的优势将使其成为未来高能激光发展的不二之选,并预期两者融合而生的半导体泵浦气体激光器将是未来重要的发展方向。

参 考 文 献

- [1] Hecht J. Lasers, death rays, the long, strange quest for the ultimate weapon [M]. New York: Prometheus Books, 2019.
- [2] Weber M J. Handbook of lasers [M]. Boca Raton: CRC Press, 2001.
- [3] Sakamoto M, Endriz J G, Scifres D R. 120 W CW output power from monolithic AlGaAs (800 nm) laser diode array mounted on diamond heatsink [J]. Electronics Letters, 1992, 28(2): 197-199.
- [4] Kanskar M, Keeney S, Martinsen R. Laser diodes: the power of brilliance: the past and future of high

- power semiconductor lasers [EB/OL]. (2018-01-18) [2020-11-02]. <https://www.laserfocusworld.com/lasers-sources/article/16555251/laser-diodes-the-power-of-brilliance-the-past-and-future-of-highpower-semiconductor-lasers>.
- [5] Bowman S R. High-power diode-pumped solid-state lasers [J]. Optical Engineering, 2013, 52 (2): 021012.
- [6] Krupke W F. Diode-pumped alkali laser: US6643311 [P]. 2003-11-04.
- [7] Cook J. High-energy laser weapons since the early 1960s [J]. Optical Engineering, 2013, 52 (2): 021007.
- [8] Chronology of MDA's plans for laser boost-phase defense [EB/OL]. (2016-8-26) [2020-11-02]. <https://mostlymissiledefense.com/2016/08/26/chronology-of-mdas-plans-for-laser-boost-phase-defense-august-26-2016>.
- [9] Gaylord C. Airborne laser shoots down missile in mid-flight [EB/OL]. (2010-2-12) [2020-11-02]. <https://www.csmonitor.com/Technology/Horizons/2010/0212/Airborne-laser-shoots-down-missile-in-mid-flight>.
- [10] Jacobsson S. Optically pumped far infrared lasers [J]. Infrared Physics, 1989, 29(5): 853-874.
- [11] Krupke W F. Diode pumped alkali lasers (DPALs): an overview [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7005: 700521.
- [12] Han J D, Glebov L, Venus G, et al. Demonstration of a diode-pumped metastable Ar laser [J]. Optics Letters, 2013, 38(24): 5458-5461.
- [13] Readle J D, Wagner C J, Verdeyen J T, et al. Pumping of atomic alkali lasers by photoexcitation of a resonance line blue satellite and alkali-rare gas excimer dissociation [J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(25): 251112.
- [14] Danilov O B, Zhevlakov A P, Yur'ev M S. Optically (solar) pumped oxygen-iodine lasers [J]. Optics and Spectroscopy, 2014, 117(1): 145-151.
- [15] Krupke W F. Novel diode pumped sulfur oxide laser: DPSOL [C]//2015 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 10-15, 2015, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2015: 1-2.
- [16] Xu X J, Zhang H W, Wang H Y, et al. Laser-pumped flowing nano-particle rare-earth ion laser: CN102570283B [P]. 2012-07-11.
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: CN102570283B [P]. 2012-07-11.
- [17] Yang X, Wang H Y, Yang Z N, et al. Diode pumped nanoparticle gas laser physics: a preliminary

- modeling study[J]. Optics Express, 2017, 25(9): 10574-10585.
- [18] Carroll D L, Palla A D, Verdeyen J T. Exciplex pumped alkali laser (XPAL) theory and modeling [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8677: 86770J.
- [19] Hecht J. Photonics frontiers: military lasers: a new generation of laser weapon is born[EB/OL]. (2010-04-01) [2020-11-02]. <https://www.laserfocusworld.com/lasers-sources/article/16552128/photonics-frontiers-military-lasers-a-new-generation-of-laser-weapons-is-born>.
- [20] Rodriguez M, Go with the flow: novel diode-pumped alkali laser achieves first light[EB/OL]. (2010-04-01) [2020-11-02]. <https://www.wpafb.af.mil/News/Article-Display/Article/400115/go-with-the-flow-novel-diode-pumped-alkali-laser-achieves-first-light/>.
- [21] Wisoff P J. Diode pumped alkaline laser system: a high powered, low SWaP directed energy option for ballistic missile defense high-level summary - April 2017 [R]. Oak Ridge: Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2017.
- [22] Approaches for technology transfer of diode pumped alkali laser (DPAL) technology to industry [EB/OL]. (2020-05-19) [2020-11-02]. <https://govtribe.com/opportunity/federal-contract-opportunity/approaches-for-technology-transfer-of-diode-pumped-alkali-laser-dpal-technology-to-industry-ousdrandededpalrfi-2020>.
- [23] Koechner W. Solid-state laser engineering [M]. 6th ed. New York: Springer, 2006: 97-101.
- [24] Steck D. Alkali D line data[EB/OL]. [2020-11-02]. <https://steck.us/alkalidata/>.
- [25] Gavrielides A, Schlie L A, Loper R D, et al. Analytic treatment of beam quality and power efficiency in a high-power transverse flow diode pumped alkali laser[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2018, 35(9): 2202-2210.
- [26] Department of defense. Critical DPAL technologies: diode pumps, circulators, optics/coatings [EB/OL]. (2013-04-24) [2020-11-02]. <https://www.sbir.gov/node/401770>.

High Energy Diode Pumped Gas Laser

Liu Zejin*, Wang Hongyan, Xu Xiaojun

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

Abstract We predicted diode pumped gas lasers will be the future development direction of high-energy lasers (HELs) by re-investigating underlying physical problems of high energy laser. We further discussed the principle and key requirements of diode pumped gas lasers, through detailed case analysis with diode pumped alkali metal vapor lasers, and the prospect of high energy diode pumped gas lasers was given.

Key words lasers; high energy laser; diode pumping; gas laser; alkali vapor laser

OCIS codes 140. 4130; 140. 3460