

# 星球大战计划与自由电子激光

张世昌

(成都电讯工程学院物理系)

## 一、自由电子激光在星球大战计划中的地位

美国总统里根于1983年3月提出“战略防御计划”，俗称星球大战计划。其基本设想是：如果苏联发动攻击，那么在苏方战略弹道导弹还未达到美国或其盟国本土之前，便对进犯导弹实行拦截并摧毁，即采取所谓积极战略防御。根据这一基本设想，星球大战计划大致由下述四个主要部分构成：

(1) 搜寻、探测、跟踪进犯导弹，并对其杀伤力进行判别；

(2) 对进犯导弹拦截并摧毁；

(3) 在双方交战时，处理错综复杂的战况，对战斗进行指挥管理；

(4) 建立有效的自卫系统，以保护战斗设施，提供后勤支援(如将百吨以上重量的设备射入空间轨道等等)。

从现有技术条件看，上述第二部分所需要的武器系统，尚处于初期研究阶段，其成败在整个星球大战计划中起着非常重要的作用。目前考虑的方案有两个：(1) 定向能武器(directed-energy weapon)，即光速武器(speed-of-light weapon)；(2) 动能武器(kinetic-energy weapon)。研究表明：由于自由电子激光(free-electron laser)可以高效率地在短波长区域运行，既能地基布署(ground-based)，也能天基布署(space-based)，因此成了极受星球大战计划重视的候选对象。早期的打算是把天基氟化氢化学激光器放在次要地位，优先发展地基自由电子激光器以及热寻的制导火箭拦截器。而且，战略防御倡议局(SDIO)曾声称用于地基自由电子激光的中继反射镜有了良好开端，据

1985年6月SDIO的报告说，已制造出满足中继反射镜需要的平面镜<sup>[1]</sup>。SDIO负责人亚伯拉罕森(Abrahamson)将军在1985年11月举行的记者招待会上还声称：劳伦斯-利弗莫尔实验室(LLNL)关于自由电子激光的实验已取得“惊人”的进展，表明地基自由电子激光可能拥有足够的能量克服大气衰减而摧毁敌方飞行器。随后，SDIO又公布了1986年给国会报告中的部分解密内容，强调天基激光器，仍然把自由电子激光列入天基激光武器的候选队列，重新提起使用2.7 μm波长的氟化氢化学激光器<sup>[2]</sup>。由上可以看到，自由电子激光的研究在星球大战计划中占有重要地位。

## 二、普通自由电子激光器作为武器所存在的问题

自由电子激光器是七十年代出现的新型激光器<sup>[3,4]</sup>。其普通结构是：相对论性电子束进入wiggler(或undulator)磁场，产生相干电磁辐射(如图1所示)。电磁波的波长λ与wiggler(或undulator)磁场的周期长度λ<sub>w</sub>，具有如下相对论性多普勒频率上移关系：

$$\lambda \approx \frac{\lambda_w}{2\gamma_{\parallel}^2}, \quad (1)$$

式中 $\gamma_{\parallel} = (1 - v_{\parallel}^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$ ， $v_{\parallel}$ 为电子纵向速度， $c$ 为真空中光速。从(1)式可以看到，改变电子的能量因子 $\gamma_{\parallel}$ ，则辐射电磁波的频率连续可调，原则上可以工作在从微波到X射线整个波段。

但是，普通自由电子激光器要用于星球大战，目前还存在不少困难，主要有：

(1) 由于工程制造的局限性，wiggler磁场的周期λ<sub>w</sub>一般只能做到厘米量级，因此如工

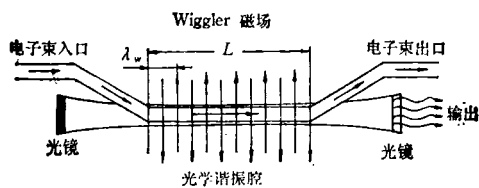


图1 普通自由电子激光器结构示意图

作在紫外及 X 射线波段,则由(1)式可知,  $\gamma_{\parallel}$  的量级为  $10^3-10^4$ , 这需要庞大的加速系统。

(2) 计算表明<sup>1)</sup>, 当电子束的速度离散量  $\Delta v_{\parallel}$  达到下述值时, 电磁波将出现严重的朗道衰减:

$$\Delta v_{\parallel} = \frac{\omega_p}{(k + k_w)\gamma^{\frac{1}{2}}}, \quad (2)$$

式中  $\omega_p$  为电子束的等离子体频率,  $\gamma$  为能量因子,  $k_w = 2\pi/\lambda_w$ ,  $k = 2\pi/\lambda$ . 由此可见, 当工作在紫外及 X 射线波段时,  $k$  非常大, 因而电子束的速度离散量必须非常小。

(3) 普通自由电子激光器工作在短波长时, 其最大效率  $\eta$  近似为<sup>1)</sup>

$$\eta \approx \frac{1}{2N}, \quad (3)$$

式中  $N = L/\lambda_w$  为 wiggler 磁场的周期数,  $L$  为相互作用区长度. 因此, 在保证有足够增益的情况下 ( $L$  足够长), 在短波长不可能获得高效率。

### 三、自由电子激光研究进展

根据以上分析, 克服自由电子激光器作为攻击武器面临困难的工作, 可以分成两个方面进行: (1) 工程方面, 建造新型加速系统, 寻求高质量电子束; (2) 探讨缩短波长、提高效率的新机理. 目前, 自由电子激光在这方面的原理性研究, 已取得了令人鼓舞的进展。

在提高效率方面, 研究表明下述三种方法是行之有效的:

(1) 采用纵向导引磁场与 wiggler 磁场相结合. 1983 年, 美国海军研究实验室 (NRL) 在 4 mm 波长产生了 35 MW 的峰值功率, 效率达到了 2.5%<sup>16)</sup>, 比早期的效率 ( $10^{-3}$ ) 提高了一

个数量级. 1984 年改进了电子束质量, 并采用渐变导引磁场, 获得了 75 MW 输出功率, 效率提高到 6%<sup>17)</sup>. 麻省理工学院 (MIT) 在 1986 年进行的原理性实验中, 获得了 10% 的效率<sup>18)</sup>.

(2) 采用有坡度的 wiggler 磁场 (tapered wiggler). 1983 年, 洛斯-阿拉莫斯国立实验室 (LANL)<sup>19)</sup> 用 12% 坡度的 wiggler 磁场, 在波长为 10.6  $\mu\text{m}$  时获得了约 900 MW 的功率, 效率从早期短波长实验的 0.25%<sup>140)</sup> 提高到 4%, 比采用均匀的 wiggler 磁场提高了一个数量级. 1986 年, 劳伦斯-利弗莫尔国立实验室 (LLNL) 与劳伦斯-贝克利实验室 (LBL) 在战略防御倡议局及美国能源部等单位的资助下, 合作进行了一次原理性实验<sup>11)</sup>. 该实验采用 45% 坡度 wiggler 磁场, 在 8 mm 波长获得了约 1000 MW 的输出, 效率提高到 45%.

(3) 使用储存环, 对电子束能量加以补偿, 然后循环使用. 1983 年和 1984 年, 法国在 Orsay 的南巴黎大学储存环上进行了首次实验, 波长为 0.65  $\mu\text{m}$ , 增益约  $7 \times 10^{-4}$ ; 1985 年, 他们将增益提高到  $19 \times 10^{-4}$ , 但平均功率仍然较小<sup>12)</sup>. 据认为, 该储存环相互作用区长度仅 1m, 严重地限制了实验水平. 目前, 斯坦福大学已从美国空军获得了 330 万美元的资助, 用以组建 X 射线实验室, 其储存环相互作用区长度为 20 m, 能产生波长为 10 nm 的自由电子激光, 可望有新的突破<sup>13)</sup>.

在缩短波长的机理探讨方面, 也取得了很大的进展. 下述方案十分令人瞩目:

(1) 高次谐波光速调管. 这一设想已为法国的实验所证实<sup>14)</sup>. 该实验利用在 Orsay 的 ACO 储存环自由电子激光器 (SRFEL) 作为非线性介质, 使一个波长为 1.06  $\mu\text{m}$  的外界 Nd: YAG 激光器产生三次谐波, 实现了波长为 0.335  $\mu\text{m}$  的超紫外相干辐射. 目前这一实验的功率水平较低, 预计改进 ACO 储存环的质量以及缩短 Nd: YAG 激光器的脉冲后, 相干峰值

1) 见 1987 年 5 月 G. Bekefi 在成都电讯工程学院的讲学报告。

功率可达 1kW.

(2) 电磁 wiggler 自由电子激光, 或两级自由电子激光. 如果由第一级辐射的电磁波作为第二级的 wiggler 磁场, 那么将出现二次相对论性多卜勒频率上移, 即

$$\lambda \approx \frac{\lambda_w}{8\gamma_{\parallel}^2}. \quad (4)$$

与(1)式比较可知, 工作在紫外及 X 射线波段时所需要的  $\gamma_{\parallel}$  将从原来的  $10^3-10^4$  降低到 30—100 左右, 这在工程上不难获得. 美国海军研究实验室 (NRL) 用返波做 wiggler 磁场, 证实了电磁 wiggler 方案的可行性<sup>[15]</sup>. 该实验用第一级所产生的频率为 12.5 GHz 的返波做第二级的电磁泵, 结果得到了频率大于 140GHz 的自由电子激光输出. 理论分析表明, 如用回旋管做电磁 wiggler,  $\gamma_{\parallel} < 20$  的电子束便可获得红外波段自由电子激光.

此外, 还提出了气体负载自由电子激光<sup>[16]</sup>, 以及受激谐振渡越辐射自由电子激光<sup>[17]</sup> 的设想. 理论分析表明, 它们可以有效地工作在可见光、超紫外及 X 射线波段, 但目前尚未见有关实验报道.

星球大战计划本身就是一个富有争议性的问题, 是否具有可行性, 要到九十年代初才能做出决定; 而且, 苏联克里姆林宫 1986 年 12 月 7

日举行了一个新闻会议, 公布了《空间武器: 安全的困境》一书, 书中已提出了“抑制”或“中和”星球大战计划的对策. 至于自由电子激光是否能最终当选为星球大战中的攻杀武器, 现在则更难定论. 但是, 有一点却是十分肯定的: 自由电子激光在通讯、等离子体加热以及医疗等方面, 有着广阔的应用前景. 重视和发展自由电子激光, 具有十分重要的意义. 杨振宁博士把自由电子激光比喻成“新金矿”, 耐人寻味.

- [1] D. C. Morrison, *Lasers & Applications*, V(1986), 2, 19.
- [2] D. C. Morrison, *Lasers & Applications*, V(1986), 9, 20.
- [3] J. M. Madey, *J. Appl. Phys.*, 42(1971), 1906.
- [4] L. R. Elias et al., *Phys. Rev. Lett.*, 36(1976), 717.
- [5] T. C. Marshall, *Free-Electron Lasers*, Macmillan Publishing Company, New York, (1985).
- [6] R. H. Jackson, et al., *IEEE J. Quantum Electronics*, 19(1983), 346.
- [7] S. H. Gold et al., *Phys. Fluids*, 27(1984), 746.
- [8] J. Fajans et al., *Phys. Rev. Lett.*, 57(1986), 579.
- [9] R. W. Warren et al., *IEEE JQE*, 19(1983), 391.
- [10] D. A. G. Deacon et al., *Phys. Rev. Lett.*, 38(1977), 892.
- [11] T. J. Orzechowski et al., *Phys. Rev. Lett.*, 57(1986), 2172.
- [12] M. Billardon et al., *IEEE JQE*, 21(1985), 805.
- [13] *Lasers & Applications*, III(1984), 3, 32.
- [14] J. M. Ortega et al., *IEEE JQE*, 21(1985), 909.
- [15] Y. Carmel et al., *Phys. Rev. Lett.*, 51(1983), 566.
- [16] J. Feinstein et al., *IEEE JQE*, 22(1986), 587.
- [17] M. A. Picstrup et al., *IEEE JQE*, 19(1983), 357.

## 全国第三届低温物性物理会议在烟台召开

由中国物理学会主办的全国第三届低温物性物理会议于 1987 年 7 月 16 日至 21 日在山东省烟台市烟台大学召开. 来自全国各地的 44 个科研单位和大专院校 183 人参加了会议.

本届会议的中心议题集中在 1987 年年初发现的高临界温度氧化物超导体的物性研究上. 管惟炎教授应邀向大会作了题为“高临界温度氧化物超导体研究的新进展”的报告. 高临界温度超导体的研究在国内外许多研究单位及人员的努力下, 进展很快. 迄今在 Y-Ba-Cu-O 体系中, 超导相的成分和结构已搞清楚, 对制作过程中的细节也有较深入的研究, 约瑟夫森效应也已观察到. 实验表明, 单晶样品有明显的各向异性, 氧和铜的同位素效应似不存在, 烧结样品行为与颗粒超导相近(超导玻璃). 本届会议讨论的内容集中在目

前还没有完全解决的一些问题上, 或各实验室结果不一致的方面, 如比热、热导、霍耳效应、热电势、喇曼散射、超声吸收、声速、正电子湮没、穆斯堡尔谱、机械性能等. 对如何进一步提高临界温度, 如何提高大块材料的临界电流密度, 如何制作更好的薄膜器件, 以及如何搞清楚超导机理等几个最重要的方面, 会议期间都进行了热烈的讨论. 会议还交流了其它方面近两年来国内的研究进展.

国家自然科学基金委员会在会议期间举行了座谈会, 听取了到会人员有关低温物理研究情况的介绍, 并回答了有关申请基金的问题.

与会代表还就成立中国物理学会低温物理专业组的问题交换了意见.

(冉启泽)