

edited by
W. B. COLSON
C. PELLEGRINI
A. RENIERI

LASER HANDBOOK

free electron lasers

譯者 胡克松 錢民權 施將君 許州
劉慶想 王平山 黃孫仁 張軍

激光手冊(6)

自由電子激光

封面设计:汤晓林

301

1

自由电子激光

W. B. Colson, C. Pellegrini, A. Renieri 主编

胡克松 钱民权 施将君 许州 翻译
刘庆想 王平山 黄孙仁 张军
赵维晋 刘锡三 审校

科学城 · 1993 年



数据加载失败，请稍后重试！

译者序

自由电子激光物理是一门综合性很强的新兴学科。

自由电子激光具有高功率、高效率和频率连续可调等特点，原则上讲，从毫米波，远红外、红外到紫外和软X射线的相干辐射都可以用自由电子激光方法产生，因此引起了各国科学家的极大重视，在近二十年中取得了显著的进展。《激光手册第6分册——自由电子激光》从基础理论、试验方法两个方面对自由电子激光物理作了全面、系统的描述。它适用于刚刚步入这一学科领域的大学生、研究生、科技工作者和工程技术人员了解自由电子激光的发展历史，掌握自由电子激光有关理论和分析方法，熟悉发展过程中取得的成就和进步。对多年从事自由电子激光研究的专家、学者来说，此书也有很好的阅读参考价值。译者出于对自由电子激光学科发展的追求，在紧张的工作之余，忙里抽闲翻译了这本书，其目的是为从事或将要从事自由电子激光研究的科技人员提供一点方便，共同促进自由电子激光学科的发展。由于我们的水平有限，缺点和错误难免，欢迎读者批评指正。

该书各章的译者、校者都在相应的章首给出，全书由赵维晋同志审校。

这本手册的译出，得到了《强激光与粒子束》编辑部的积极支持，在此表示感谢。

1993年10月

序

自由电子激光(FEL)经历了十多年的发展,对其基础物理概念已能较为清晰、准确的描述。FEL理论和分析能够成功地解释不同结构的FEL实验、再现不同范围内的实验结果。此外,FEL理论已经有把握地用于设计新的FEL装置和预言其性能。

我们还应注意到虽然FEL已发展到今天这样成熟的程度,但它的发展势头并未衰减。美国、欧洲、苏联、日本和中国都提出了新的FEL研究计划,目的是研究增加FEL的功率和效率,提高谱的分辨率和扩展频率可调范围,其次是努力减小FEL装置的体积和降低成本。FEL的进展是不同领域内的广大科学家共同努力的结果。

就书整体内容而言,FEL手册包含有最基本的FEL机制和许多新的物理思想。手册不仅适用于研究生和刚进入这一研究领域的科学家,而且对有丰富实践经验和专长的技术人员也是值得一读的。手册涉及的课题范围和深度适用于不同层次的FEL研究者。编写手册的目的是为了使FEL研究继续向前发展,充实FEL学科基础,这有益于将来对学科有贡献的人们;其次是鼓励FEL应用。

FEL物理基础涉及的领域非常广泛,有粒子束物理、等离子体物理、经典光学、量子光学和激光。FEL的进步有赖于相关学科的发展,反之也将大大地促进相关学科的发展。我们看来,这正是FEL吸引着如此众多的物理学家的原因。新的应用不断提出新的问题,这将不断扩充FEL基础物理研究内容。

感谢为此书付出辛劳与作出贡献的人们和出版者,感谢荷兰物理学家J. Kircz博士对我们的支持与鼓励。在完成FEL手册的同时,我们也非常感谢研究所和同事们的支持与帮助。

W. B. Colson

美国加利福尼亚州 蒙特雷

C. Pellegrini

美国加利福尼亚州 洛杉矶

A. Renieri

意大利 罗马

1990年6月

作者名单

- W. B. Colson*, Physics Department, Naval Postgraduate School, Monterey, CA93943, USA.
- G. Dattoli*, ENEA, Dip.-TIB, Divisione Fisica Applicata, Centro Ricerche Energia Frascati, C. P. 65, 00044 Frascati, Roma, Italy.
- D. A. G. Deacon*, Deacon Research, 2440 Embarcadero Way, Palo Alto, CA94403, USA.
- F. De Martini*, Dipartimento di Fisica, Università di Roma, 00185 Roma, Italy.
- P. Elleaume*, European Synchrotron Radiation Facility, B. P. 220, F - 38043 Grenoble Cedex, France and Laboratoire pour l'Utilisation du Rayonnement Electromagnétique, LP CNRS008, Bâtiment 209C, Université de Paris - Sud, 91405 Orsay Cedex, France.
- L. K. Grover*, Stanford University, 308 McCullough Building, Stanford, CA94305, USA.
- A J. B. Kortright*, Center for X-ray Optics, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley, CA 94720, USA.
- A J. M. J. Madey*, Physics Department, Duke University, Durham, NC 27706, USA.
- T. C. Marshall*, Columbia Plasma Laboratory, Department of Applied Physics and Nuclear Engineering, Columbia University in the City of New York, New York, NY 10027, USA.
- A J. B. Murphy*, National Synchrotron Light Source, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY 11973, USA.
- A J. M. Ortega*, LURE, Bâtiment 209D, Université de Paris-Sud, 91405 Orsay Cedex, France.
- R. H. Pantell*, Stanford University 308 McCullough Building, Stanford, CA94305, USA.
- C. Pellegrini*, Department of Physics, UCLA, 405 Hilgard Avenue, Los Angeles, CA 90024, USA.
- A. Renieri*, ENEA, Dip-TIB, Divisione Fisica Applicata, Centro Ricerche Energia Frascati, C. P. 65, 00044 Frascati, Roma, Italy.
- C. W. Roberson*, Beam Physics Branch, Plasma Physics Division, Naval Research Laboratory, Washington, DC 20375 - 5000, USA.
- E. T. Scharlemann*, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA 94550, USA.
- P. Sprangle*, Beam Physics Branch, Plasma Physics Division, Naval Research Laboratory, Washington, DC 20375 - 5000, USA.
- A. van Steenbergen*, National Synchrotron Light Source Department, Brookhaven National Laboratory, Upton, L. I., NY 11973, USA.
- C. M. Tang*, Beam Physics Branch, Plasma Physics Division, Naval Research Laboratory, Washington, DC 20375 - 5000, USA.
- A J. E. Walsh*, Department of Physics & Astronomy, Dartmouth College, Hanover, NH 03755, USA.

目 次

译者序	i
序	ii
目 次	iii
作者名单	iv
1. 自由电子激光引言	1
2. 自由电子激光物理导论	7
3. 自由电子激光中一些不同的概念	55
4. 自由电子激光波荡器, 电子轨迹和自发辐射	71
5. 自由电子激光经典理论	93
6. 自由电子激光相干谐波发生器	155
7. 自由电子激光的量子力学分析	175
8. 自由电子激光集体效应	211
9. 单程自由电子激光放大器	235
10. 存贮环自由电子激光	277
11. 喇曼型自由电子激光实验	311
12. 用于自由电子激光的加速器和存贮环	335
13. 用于自由电子激光的极紫外和软X-射线光学	371
14. 波导自由电子激光	389

1 自由电子激光引言

W. B. Colson

Physics Department, Naval Postgraduate School, Monterey,
CA 93943, USA.

C. Pellegrini

Department of Physics, UCLA, 405 Hilgard Avenue, Los
Angeles, CA 90024, USA.

A. Renieri

ENEA, Dip - TIB, Divisione Fisica Applicata, Centro Ricerche
Energia Frascati, C. P. 65, 00044 Frascati Roma Italy.

A J. M. J. Madey

Physics Department, Duke University, Durham, NC27706, USA

译者 胡克松

自由电子激光 (FEL) 利用相对论性电子束, 通过一个名为“波荡器”的、周期性变化的横向磁场来与电磁辐射场进行能量交换 (Madey 1971)。有效地换能需要电子同时在波荡器和辐射场的作用下产生谐振。当辐射波长 λ , 电子束能量 γmc^2 和波荡器周期 λ_u 近似满足 $\lambda \approx \lambda_u / 2\gamma^2$ 时, 可产生这样的谐振。这里的 γ 是洛伦兹因子, m 是电子质量, c 为光在真空中的速度。谐振关系表明通过改变电子能量可以连续改变 FEL 的波长。FEL 可以被设计成工作在很宽的频率范围, 如从厘米波到纳米波。

通常, FEL 是放大的辐射场, 即从电子束到辐射场有净的能量转移。当然 FEL 也可以工作于从辐射场到电子有净的能量传输, 即成为一种加速器, 或者称作反 FEL。因为辐射脉冲结构反映着电子束结构, 利用射频直线加速器和重复循环的静电加速器很容易产生从皮秒到几乎 CW 的脉冲长度。相对论性电子束有很高的功率密度, 所以 FEL 能产生很高的脉冲峰值功率, 如 GW 量级。FEL 与原子激光和微波管不同, 没有转移到辐射场的能量仍保留在相对论性粒子束中, 它可以随相对论性粒子束以接近光的速度从波荡器中引出或者进行回收, 以提高总的转换效率。FEL 能够逐渐替代其它辐射源, 如微波管和激光, 而且还能扩大这两者的工作范围。FEL 有很好的适用性, 所以我们发现 FEL 能够应用于很多领域, 如金属板印刷术、等离子体加热、粒子加速, 以及材料、生物、医学和固体等研究方面。

微波管是第一个利用自由电子束产生相干辐射的发生器, 在第二次世界大战期间, 由于雷达的需要, 给微波管带来了很大的发展。微波管利用的是慢波结构, 这限制了它必须工作在长的波长上。FEL 是在研究自由电子辐射源的基础上发展起来的, Motz (Motz 和 Nakamura 1959, Motz 1951, Motz 等 1953) 在 1951 年证明了一束电子通过一个波荡器磁场时能够被用来放大辐射信号。1960 年 Philips 发展了一种特殊的微波管, 称之为 Ubitron (Philips 1960), 它的设计与运行都与 FEL 十分相似。其它研究者 (Palmer 1972, Robinson 1985, Csonka 1978) 沿这个方向提出一些概念, 但这些概念却在实验上没得到结果。

1960 年后, 短波长源的研究一直被激光统治着, 它以原子或分子作为工作介质, 因而频率不可调。对激光的发明来说, 光谐振器是很关键的, 它能利用宏观尺寸贮存有利用价值的光功率。这些技术后来也被应用于 FEL 振荡器中。FEL 利用的是自由电子, 它不需要慢波结构, 可用于激光和微波管应用受到限制的区域。

FEL 发展中非常关键的时期是 1976 年 Madey 和他的同事们, 在斯坦福大学的 FEL 放大器结构中, 在 $10\mu\text{m}$ 波长上测得 7% 的增益 (Elias 等 1976)。这个实验和 1977 年这个同样的 FEL 装置又作为振荡器运行成功 (Deacon 等 1977), 激起了人们对 FEL 研究的极大兴趣。以后几年中, 世界上的很多研究小组都建立起了 FEL 装置, 其工作频率从微波到紫外线 (UV)。FEL 科学和技术包含有等离子体物理、激光物理和加速器物理, 这些都对 FEL 发展有着重要的作用。FEL 是一门综合性的科学和技术。

这以后, 人们对永磁和混合型波荡器非常重视。典型的波荡器长度为 $L_u \approx 5\text{m}$, 也可以从 1m 至 25m 多范围内变化。典型波荡器的周期大约为 $\lambda_u \approx 5\text{cm}$, 也可以在 1cm ~ 10cm 范围内变化。波荡器总的周期数 $N_u \approx 10^2$ 。每个周期的磁场峰值强度 $B_u \approx 2 - 5\text{kGs}$, 相对论

性电子通过波荡器时，这样的磁场足以引起电子轨迹产生轻微的偏转。如果波荡器场是沿轴向圆极化的，则电子轨迹是螺旋线型，FEL就放大圆极化辐射场。如果波荡器场是线极化的，则FEL辐射也是线极化的。波荡器场的几何结构可由通电线圈以及永磁材料构成。当应用所要求的波长确定后，为了减小加速器和波荡器的体积，发展方向是研制短周期波荡器。

确定FEL的最终潜力，加速器提供的电子束的性能是关键。对强流、高质量束流的需求，推动加速器研究人员尽力去设计、发展新的、好的电子源和加速器。束能量范围从1MeV到1GeV，典型的FEL使用的电子束能量 $\gamma mc^2 \approx 50\text{MeV}$ 。束流能够从1A到1kA范围内变化，可是多数FEL中的束流是在 $I=10\text{A}$ 至 100A 范围内。典型的电子束功率是5GW左右，所以即使低的效率也可以得到高的峰值功率。多数加速器运行的重复频率不高，这对FEL平均功率有限制。FEL相互作用区仅含有光、波荡器的磁场和电子束，所以它不存在着一般用气体、液体或者固体为介质的激光器所担心的非线性。在长波长上，FEL效率已实现35%的高效率，可是将来多数有高质量束流的FEL，只要效率能达到6%就认为是可行的。当 $\lambda_u \approx 5\text{cm}$ ， $\gamma \approx 10^2$ 时，FEL谐振波长 $\lambda \approx 3\mu\text{m}$ 。

电子束横向尺寸通常为0.1mm至5mm，这取决于加速器和束的输运系统。FEL的束流质量必须达到足以保持相干群聚团渡越特性增长区，它可能复盖很多个波荡器周期。电子束的能散度和角散度(发射度)必须足够地小，以维持其长度与辐射波长一样的每一个束段上的相干群聚团。

在FEL技术和概念的发展中，理论有着重要的作用。最初的FEL理论是在相对论性运动的电子坐标系中用量子分析方法建立的(Madey 1971)，后来又用量子电动力学方法，而现在是用复摆方程与自洽波动方程耦合来分析FEL电子在相空间的运动。有一些新的，且重要的效应，如高增益区的指数增长，短脉冲的形成，变参数波荡器的效率加强，光导效应，和已有研究的俘获粒子的边带不稳定性等。FEL理论和实验一般符合很好。拟议中的FEL设计通常用分析和数字计算方式进行。从厘米到0.1mm范围内有同样的理论公式，仅与FEL设计，电子质量 m ，电子电荷 e ，光速 c 和可能的Planck常数 \hbar 等有关。

低增益FEL振荡器的经典增益是由分析电子在辐射波长尺度内的相干群聚过程求得的。当电子通过波荡器时，它们左右加速，而在向前方向上辐射。前面几程中通过的一些辐射能被贮存在谐振器中，后面跟进的电子是在有横向辐射场存在的情况下，左右摆动的。束中的每一个 λ 波长段中一些电子失去能量给辐射场，而另一些电子从辐射场中得到能量。快的电子运动在具有平均速度的电子的前面，而慢的电子运动在具有平均速度的电子的后面，因而电子形成以辐射波长为波长的周期性群聚。群聚的束能够发出相干辐射和放大已存在的辐射。即使在最大增益时，每一程中辐射功率仅增加10%左右，可是经过数百程后，辐射即可达到饱和。

经典的高增益FEL放大器中，强流电子束的会聚与上面描述的过程相同，只是相干群聚的发展是在单程通过一个长波荡器中完成的。被放大的辐射波长是由外部控制振荡的激光提供的。超辐射FEL中没有初始光源，所以辐射必须首先从自发辐射开始增长。

对于高的或者低的增益，在相对论电子束上观察每一个迅速前进的波荡器周期时，产生洛伦兹收缩，变为 $\lambda'_u = \lambda_u / \gamma$ ，当观察通过的辐射场时，由于多普勒频移，其波长变为 $\lambda' = (1 + \beta_z) \cdot \gamma \lambda \approx 2\gamma \lambda$ 。在束坐标系中，波荡器和辐射场力之间发生谐振的条件是 $\lambda'_u \approx \lambda'$ ，这给出在实验室坐标系中的谐振条件为 $\lambda \approx \lambda_u / 2\gamma^2$ 。

上面给出的 FEL 谐振关系式显示了 FEL 的一个重要性能，即它的频率能连续可调。当从加速器来的电子束能量改变时，谐振波长也跟着改变。目前已实现一个量级 (10 因子) 的频率可调范围，这比任何其它种类的激光器的调谐范围都大。将来还有可能达到二个量级 (10^2 因子) 的频率可调范围。当 FEL 工作在这样大的调谐范围时，一些部件，如像谐振腔的反射镜必须改变，因为它们的工作频率范围是有限制的。

所有这些都表明，有可能将 FEL 扩展到更高的峰值功率和平均功率，其波长缩短到 X 射线波长范围。并为研究和工业开拓一些新的应用领域。比频率可调更重要的可能是 FEL 的“可设计性”：FEL 波长从 1cm 到 10nm 范围，它的基本原理没有任何改变。目前在许多波长范围内，除 FEL 外还没有发现其它高功率辐射源。使用低能加速器，如脉冲线加速器，回旋、感应直线和静电加速器等。FEL 为科学应用提供了一种新的波长在 1cm 到 $20\mu\text{m}$ 范围内的相干辐射源。另外波长 $\lambda = 100\text{nm}$ 到 10nm 范围内，FEL 可能立即为材料研究和生物组织研究提供 X 射线辐射源。适用于短波长 FEL 设备的加速器是射频直线加速器和电子存贮环。

用于 FEL 中的技术的可靠性可以与 SLAC 或者 CERN 在高能物理中应用的设备，或者由电子贮存环得到的同步环等设备的可靠性相比拟，为了给应用者的实验准备好粒子束或者光源，这些设备在整年中的大部分时间里都每天 24 小时运行。可以预料，FEL 也将会成为一咱很好的应用设备，目前，它已达到的性能，作为辐射源是令人满意的。但对于某一个 FEL 实验系统，它的体积还太大，耗费也太高。然而对于这一缺点也不必太悲观，因为同步环已成为一种很成功的物理工具，FEL 也可以成为一些同步环中的一部分，而且已有一些新的 FEL 装置，在科研中正以一种独特的新的光源提供给应用者。近期的研究也正企图减小 FEL 用作辐射源装置的体积和造价。

参考文献

- Csonka, P., 1978, Part. Accel. **8**, 225.
- Deacon, D. A. G., L. R. Elias, J. M. J. Madey, G. J. Ramian, H. A. Schwettman and T. I. Smith, 1977, Phys. Rev. Lett. **38**, 892.
- Elias, L. R., W. M. Fairbank, J. M. J. Madey, H. A. Schwettman and T. I. Smith, 1976, Phys. Rev. Lett. **36**, 717.
- Halbach, K., February 1983, Bendor Free Electron Laser Conference, J. Phys. (Paris) Colloq. **C 1**, Suppl, 2, 211.
- Madey, J. M. J., 1971, J. Appl. Phys. **42**, 1906.
- Motz, H., 1951, J. Appl. Phys. **22**, 527.
- Motz, H., and M. Nakamura, 1959, Ann. Phys (NY) **7**, 84.
- Motz, H. W. Thon and R. N. Whitehurst, 1953, J. Appl. Phys. **24**, 826.
- Palmer, R. V., 1972, J. Appl. Phys. **43**, 3014.
- Phillips, R. M., 1960, IRE Trans, Electron Devices **7**, 231.
- Robinson, K. W., 1985, Nucl. Instrum. & Methods A **239**, 111.
- Schawlow, A. L., and C. H. Townes, 1958, Phys. Rev. **112**, 1940.

2 自由电子激光物理学导论*

J. B. Murphy

National Synchrotron Light Source, Brookhaven National
Laboratory, Upton, NY 11973, USA.

C. Pellegrini

Department of Physics, UCLA, 405 Hilgard Avenue,
Los Angeles, CA 90024, USA.

译者 钱民权

校者 刘庆想

目次

1. 引言	9
2. FEL 运行的基本原理	10
3. 电子在波荡器中的轨迹	13
4. 自发发射	14
5. 电子在波荡器和辐射混合场中的运动方程	19
6. 单粒子小信号增益区	23
7. 参数沿轴向可变的摇摆器	29
8. 麦克斯韦方程	31
9. 含有定标变量和空间电荷的 FEL 方程	34
10. 集体不稳定性	36
11. 集体不稳定性的单粒子极限	40
12. 集体不稳定性和小信号增益区的讨论	40
13. 自洽方程的数值积分	41
14. 放大的自发发射	45
15. 暖束效应	45
16. 光导	49
17. 结论	51
参考资料	51

* 该工作在美国能源部赞助下完成。

摘 要:

本文讨论了自由电子激光的基本物理学原理。推导了波荡器中的电子轨迹，并用于计算自发发射。在小信号增益区和指数增益区研究了受激发射，并讨论了变参数波荡器提高 FEL 效率的优点。最后，论述了电子束的能散度，三维处理和光导对 FEL 性能的影响。

1. 引言

自由电子激光器 (FEL) 是一种将相对论性电子的动能转换成电磁 (EM) 辐射的装置。自由电子激光器由直线加速器、电子回旋加速器或贮存环产生的相对论性电子束和周期性磁场即所谓波荡器磁铁所组成。电子束和电磁波沿磁铁在同一直线上传输时做横向振动 (见图 2.1), 波荡器使电子产生沿电磁波横向电场方向的速度分量, 这就导致了电子和辐射场之间的能量交换。从电子束抽取的动能转换成电磁辐射, 辐射的波长决定于电子束的能量和波荡器磁铁的周期。

这样的系统可以作为一台可调谐的、相干的强电磁辐射源, 它可以运行在 1cm 到远紫外的波长范围, 并且也许可到软 X 射线区。电子束能量转换到辐射场的效率通常大约为 1%, 在专门设计的高功率系统中可以高达 50%。激光束的时间分布反映了电子束的时间分布。人们可以建造连续波运行的激光器或者产生非常短的纳秒或皮秒脉冲的激光器, 这取决于产生电子束的加速器类型。

对这样的辐射源的需求起因于通常微波管技术的固有限制, 它们不可能使波长短于 1mm, 也因为不同类型的量子激光器只能覆盖电磁波谱的一小部分。在第 2 节中, 我们将讨论 FEL 和微波管之间的颇为密切的联系, 这里, 我们将 FEL 和量子激光器作一比较。

自由电子激光和量子激光都有“受激辐射光放大”这个缩写词的意思, 的确, 两者都是由于受激发射而产生电磁辐射, 但其共同点仅此而已。在 FEL 中“自由”这个词描述了作为工作介质的电子状态: 在 FEL 中电子不像在原子或分子激光器中那样束缚在一个原子中。在 FEL 中, 相对论电子束的动能作为自由能源在波荡器磁场中转换成电磁辐射。

自由电子激光比起量子激光来具有一些优点。在原子或分子激光器中, 输出频率是由两个激发的原子或分子态之间的量子跃迁决定的, 由于工作物质的能态是固定的, 因此调谐能力是很小的。自由电子激光可以通过改变电子束的能量而使输出改变, 从而克服了上述原子或分子激光器的不利之处。此外, 在 FEL 中, 工作介质只是电子束, 它不会象气体或固体介质那样在高功率运行时有损坏的问题。这些卓越的特性在最近十年中引起了人们对 FEL 的极大兴趣。在斯坦福大学 (Elias 等 1976, Deacon 等 1977) 的一些先驱实验后, 已经建立了很多实验方案 (Barbini 等 1983, Colson 和 Sessler 1985, Bizzurri 等 1985), 同时做了很

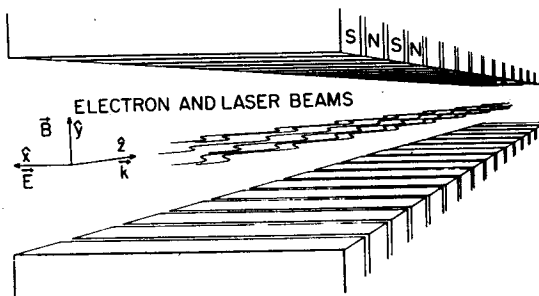


图 2.1 自由电子激光器原理图, 表明了波荡器磁铁和电子束沿着磁铁轴线运动的波动轨迹。