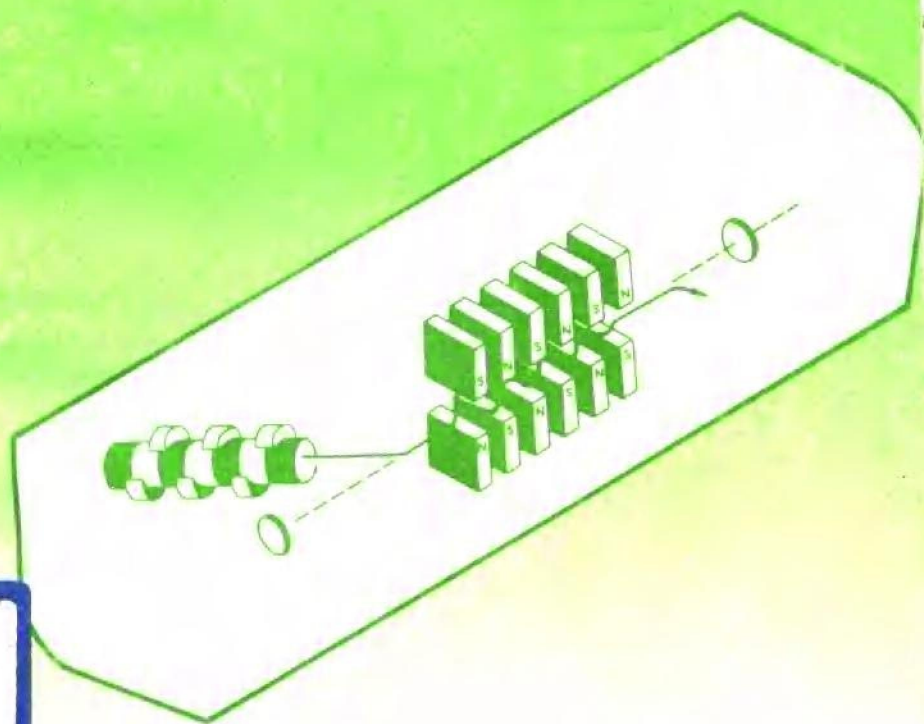


自由电子激光 在生物医学与材料科学 中的应用

杨中海 卢 波 彭良福

刘盛纲 主审



电子科技大学出版社

自由电子激光在 生物医学与材料科学中的应用

杨中海 卢波 彭良福

刘盛纲 主审

*

电子科技大学出版社出版发行

(中国成都市建设北路二段四号)

成都军区军医校激光照排

成都东方彩印厂胶印

*

开本 850×1168 1/32 印张 10.4375 版权字数 269 千字

版次 1991 年 12 月第一版 印次 1991 年 12 月第一次印刷

印数 1—1000 册

中国标准书号 ISBN 7-81016-341-8/TN·103

[川]016 (15452·155) 定价:5.40 元

内 容 提 要

本书旨在跟踪研究国外自由电子激光在生物医学和材料科学中的应用和应用前景。全书由三部分组成。第一部分是一篇较详细的综述:自由电子激光器的发展历史;基本工作原理;最新进展;应用领域对自由电子激光器的要求;在生物医学、材料科学中的应用和潜在应用。第二部分是20篇具有典型意义的译文:介绍了美国加州大学、斯坦福大学和范德比尔特大学的自由电子激光器及其在生物医学、材料科学中的应用;其中有实验研究论文,综述文章,可能的、有重要应用前景的研究方案。第三部分是88篇有关的文献摘要。

本书适用从事自由电子激光研究的科学工作者、大专院校有关专业师生和对自由电子激光应用感兴趣的读者。

本工作由国家高技术计划激光技术领域资助

序

自由电子激光的研究已有约三十年的历史。在最近十几年里，它的发展极为迅速，并成为现代物理学中最引人瞩目的研究方向。

在世界各国学者们的共同努力下，自由电子激光研究在理论上及实验上，都取得了重要成果，也已发表不少综述性文章。目前，自由电子激光发展的主要方向是：

1. 小型化，可靠性，适用性；
2. 进一步缩短波长，特别是探索更有效的短波长（真空紫外及 X 射线）自由电子激光的机理；
3. 自由电子激光的应用，特别是其他激光所不能取代的应用。

任何一门学科，它的生命力在于它是否能推动其他科学技术的发展，在于它是否有应用前景。对于自由电子激光也是一样。从这个观点来看，上述三个方面的发展方向，都是在于使自由电子激光能保持进一步发展的活力。

虽然在各种会议上已发表不少关于自由电子激光应用的文章，但至今尚未有专门的书籍问世。几年前，我本人与电子科技大学一些同志们申请到“自由电子激光应用”的预研性课题，但由于我杂事缠身，力不从心，未能更好地开展工作。

值得高兴的是，电子科技大学杨中海教授等人经过一年多的细致工作，收集并整理了大量自由电子激光应用领域的资料，并在此基础上，翻译了一些重要文献，形成了本书。本书不仅较全面地反映了自由电子激光在材料科学和生物学中的应用和潜在应用，还对适合于这些应用的自由电子激光器类型作了较系统的介绍，并且还简要清楚地阐述了自由电子激光的机理和特性。本

书适宜于自由电子激光研究领域的科研人员、材料科学与生物医学领域的研究者，以及希望初步了解自由电子激光及其应用的学生、研究生、教师和科技工作者阅读参考。我希望本书能对致力于自由电子激光应用研究的科技工作者有所帮助。

刘盛纲

一九九一年十月五日

• I •

前 言

自由电子激光及其在国民经济和国防上的应用,是当前十分活跃的高技术研究领域之一。自由电子激光具有的频率连续可调性、辐射功率高、皮秒量级脉冲输出、工作频率范围宽(从毫米波到X射线)等许多宝贵优点,是其他激光器所不及的。科学工作者已预见到它将在多方面有重要的潜在应用价值。因而已经引起世界各国的重视。

本书旨在跟踪研究国外自由电子激光在生物医学和材料科学中的应用和应用前景。并为对自由电子激光,特别是对自由电子激光应用感兴趣的科学工作者、教师、研究生和其他读者,提供一份较详细的关于自由电子激光在生物医学、材料科学中应用的参考资料。希望它能起到抛砖引玉的作用,推动我国自由电子激光的应用研究工作。

全书分三部分。第一部分是一篇较详细的综述“自由电子激光及其在生物医学和材料科学中的应用”。内容包括自由电子激光器的基本工作原理;简要的发展历史;自由电子激光研究的最新进展;不同应用领域对自由电子激光器提出的要求;自由电子激光在生物医学、材料科学中的应用和潜在应用。

第二部分为20篇译文。介绍了已用于应用研究的美国加州大学桑塔巴布拉分校(UCSB)静电加速器驱动的自由电子激光器,美国斯坦福大学的Mark III射频加速器驱动的远红外自由电子激光器和超导射频加速器驱动的自由电子激光器(SCA/FEL);介绍了美国范德比尔特大学生物医学和材料科学研究自由电子激光中心等。自由电子激光在生物医学、材料科学应用方面的十多篇译文都是有典型意义的文章。其中包括了我们收集到的有关应用的实验研究论文;重要的综述文章;可能的、有重要应用前景的研

究方案。

第三部分收集了 88 篇文献摘要,内容包括自由电子激光在生物学、材料科学中的应用,以及对自由电子激光应用会有影响的新型自由电子激光,以便感兴趣的科学工作者和读者进一步查找资料,深入研究。

本书的主要工作由杨中海、卢波和彭良福完成。赵颖威高级工程师校了部分译文。硕士研究生刘濮鲲、唐昌建、朱雄伟和吴中平各译了一篇文稿。

学部委员刘盛纲教授一直关注本书的出版,在百忙中主审了本书,还特地为本书作序,并在序言中指出了目前自由电子激光的主要发展方向。我们在此对刘教授表示衷心的感谢。

在本书的写作过程中,作者还得到了杜祥琬研究员、惠钟锡研究员、华欣生研究员、梁正教授、赵玉钧主任、王守志主任以及许多同行、同事的关心和支持。惠钟锡研究员细致地审校了本书的第一部分,并提出了许多宝贵意见。在此一并表示诚挚的谢意。

本书能够迅速出版的原因在于电子科技大学出版社的大力支持,编辑和其他同志的辛勤劳动。作者对他们的帮助和支持深表感谢。

由于本书涉及的学科领域宽,限于作者的学识水平,书中的错误和不当之处一定不少,还望读者谅解和指正。

作 者

1991 年 5 月 15 日

目 录

第一部分 综 述

自由电子激光及其在生物医学和材料科学中的应用	(1)
I . 引言	(1)
II . 生物医学和材料科学研究用自由电子激光	(8)
III . 自由电子激光在医学和生物学中的潜在应用	(23)
IV . 自由电子激光在材料科学中的应用和潜在应用	(42)
V . 结束语	(58)

第二部分 译 文

UCSB 静电加速器自由电子激光的首次工作	(62)
斯坦福 Mark III 远红外自由电子激光器	(70)
生物医学与材料科学实验用 SCA/FEL 的研制	(79)
气体加载自由电子激光	(93)
范德比尔特大学生物医学和材料研究自由电子激光中心	(99)
加州大学 Santa Barbara 分校自由电子激光器的科学 研究工作	(105)
自由电子激光及其在生物医学中的应用	(113)
远红外自由电子激光器在凝聚态物理中的应用	(142)
远红外自由电子激光在材料科学中的应用	(156)
真空紫外线和软 X 射线自由电子激光在半导体物理中的 应用	(178)

自由电子激光对 $\text{FeF}_2 : \text{Mn}$ 的远红外研究	(181)
自由电子激光器在 n 型 GaAs 非线性磁光电导研究中 的应用.....	(188)
非晶态半导体薄膜的自由电子激光激励光谱分析.....	(196)
GaAs : Si 的远红外霍耳光电实验	(207)
远红外自由电子激光激励肌蛋白以增强配位键.....	(219)
利用皮秒自由电子激光对乙酰苯胺中的 Davydov 型孤立子 进行动态测试.....	(238)
自由电子激光在生物医学中的潜在应用.....	(248)
自由电子激光在紫外光生物学中的可能应用.....	(257)
Los Alamos 自由电子激光的潜在应用:高温超导体	(267)
自由电子激光在化学和分子研究中的潜在应用.....	(277)

第三部分 文 摘

自由电子激光及其应用文摘.....	(284)
-------------------	-------

第一部分 综 述

自由电子激光及其在生物医学 和材料科学中的应用

I. 引 言

自由电子激光 (Free Electron Laser, 简称 FEL) 作为高科技的产物, 在国防和国民经济中都有重要的应用前景。自由电子激光器本身, 以及它的各种应用和潜在的应用已引起世人的重视。

自由电子激光是以自由电子作为工作媒质的光受激辐射器。在特定含义上是指自由电子通过一横向周期磁场产生的光波受激放大与振荡。不过近年来, 自由电子激光的内涵已被大大地扩展。凡利用自由电子与电磁波互作用产生的从微波到 X 射线的受激辐射, 均被称为自由电子激光, 它可以源于各种物理机制。

对于特定含义上的自由电子激光, 其历史可以追逆到 1951 年。Motz 使电子注通过摇摆磁铁, 观察到亚毫米波的自发辐射^[1]。他描述的辐射过程正是自由电子激光物理机制的理论基础。1960 年 R. M. Phillips 在美国通用电气公司进行了基于这种物理机制的实验, 称为荡注管 (Ubitron)^[2]。在 S 波段得到了大于 100kW 的输出功率, 证实了 FEL 作为微波辐射源的能力。1975 年 John Madey 等人在斯坦福大学实现了远红外自由电子激光, 观察到波长为 10.6 μm 的光放大^[3,4]。自由电子激光的工作频率和辐射功率直接依赖于电子注的能量和摇摆磁铁的周期及幅值。FEL 从原理上显

示出能够产生从微波到 X 射线的高功率辐射。与其他激光器相比, FEL 具有频率连续调谐性, 更高的峰值功率和平均功率, 输出功率可调, ps 量级脉冲输出, 以及易于精确控制脉冲结构等优点 (如图 1 所示)。这些优点的结合使它在军事和国民经济方面都有重要的应用前景。因此, 引起了人们对 FEL 的兴趣和关注。

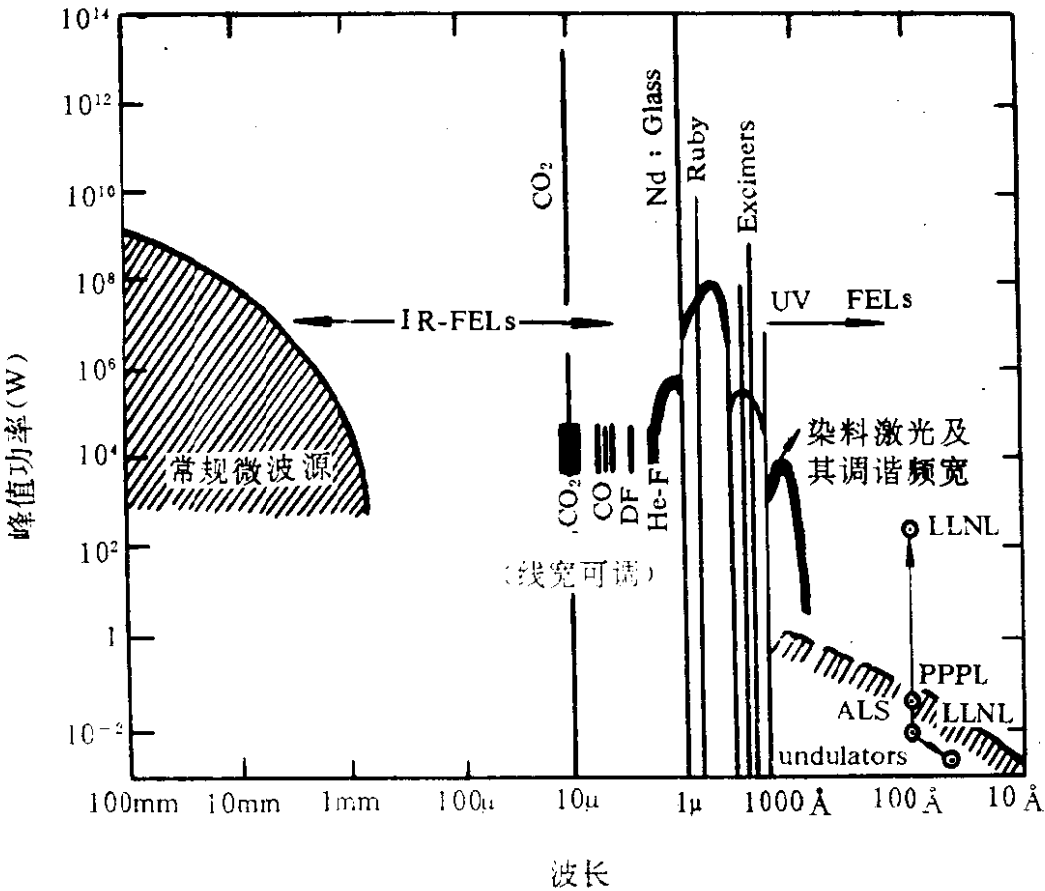


图 1 FEL 能在毫米波到 X 射线波长范围内提供可调谐的相干辐射

80 年代, 各国科学工作者利用多种电子加速器进行 FEL 的原理论证实验和应用实验。特别是美国于 1983 年 3 月提出“星球大战”计划 (SDI——战略防御计划) 以后, 自由电子激光作为地基定向能武器的辐射源——SDI 的研究重点之一, 受到各国的特别重视。美国 1988 年用于 FEL 的研究经费达 1.72 亿美元, 1989 年

达 2.02 亿美元。1990 年 9 月在法国巴黎召开的第十二届国际自由电子激光会议上，发表论文有 200 多篇。中国、美国、法国、日本、苏联、德国、意大利、荷兰、以色列、瑞典、英国以及南朝鲜、印度等十多个国家数十个单位在开展理论研究工作和实验研究工作。图 2 给出了部分自由电子激光振荡器的工作波长和峰值功率。

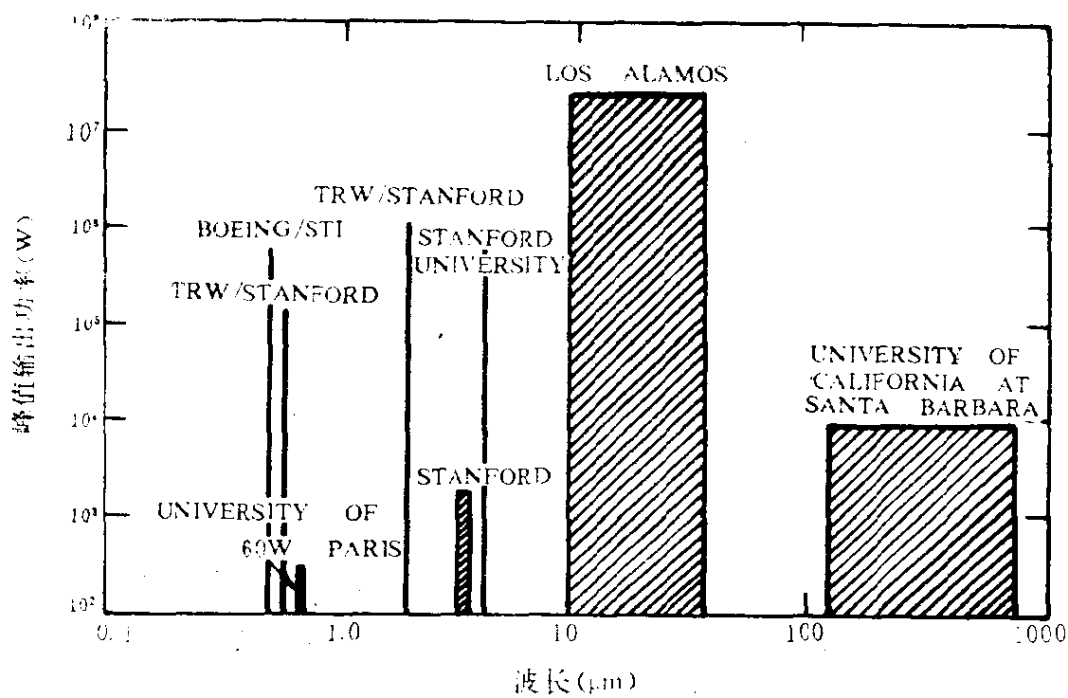


图 2 自由电子激光振荡器目前水平

自由电子激光不仅在国防上有重要价值，在国民经济中亦有重要的应用前景。美国在进行以军事为目的 FEL 研究的同时，早已注意开拓 FEL 在国民经济中的潜在用途的研究。在历史上，美国曾通过研制原子弹的“曼哈顿计划”和开发空间技术的“NASA”计划推动了科学技术的发展，用技术转让的方式促进了美国经济的繁荣。1986 年，美国战略防御计划局（SDIO）建立了技术应用办公室，负责制订和执行技术应用计划，促进新技术转让的机会，加快 SDI 开发技术在国民经济中得到应用。使这些新技术有可能在近期内产生高效益成果。

根据美国国会关于发展和加强自由电子激光技术和评定 FEL 在医学、生物物理和材料科学方面潜在应用的指示, SDIO 专门制定并已开始执行医用自由电子激光器 (MFEL) 计划。分地区在田纳西州田纳西维尔市范德比尔特大学、加州斯坦福大学、加州大学桑达巴布拉分校 (UCSB)、纽约州乌普顿市布洛克海温国家研究所和马里兰州盖特斯堡国立标准和技术研究所建立了 MFEL 中心。MFEL 计划还利用了 21 所大学、两个国家研究所、两个商业研究所和一所支持这项计划的医学院的资源 and 经验。作为 1985 财年国防部授权法修正案的结果, 从 SDI 预算中拨出了 1000 万美元, 用来创建多学科的地区中心, 研究 FEL 技术的潜在应用。在以后的四年中, SDI 预算分配的资金又增加了 800 万美元, 用来购买建立 MFEL 地区中心和开发研究所需硬件。

MFEL 计划主要由四个部分构成: FEL 的技术开发、生物医学研究、生物物理学和材料科学研究。因为 FEL 能够获得比一般激光更高和更便于控制的功率, 并且能够在宽阔的波长范围内运行。对功率输出和脉冲结构的精确控制与其调谐性相结合, 使得 FEL 有希望成为医学、生物物理学和材料研究的工具。

MFEL 主要开展以下一些工作:

1. 改进 FEL 的可靠性, 简化操作, 缩小外形尺寸和提高性能, 使其能够应用于临床。
2. 临床前医学研究, 外科手术应用和疾病诊断。寻求 FEL 的未来医学/临床应用。
3. 研究受激光辐照的生物医学材料可能发生的热变化和光化学变化。研究预测光与人体组织相互作用的结果, 特别是研究物质对调谐范围宽的高功率短脉冲激光的反映。
4. 由于 FEL 适用于极高峰值功率量级, 所以存在严重的光学腔镜面破坏问题。当辐射的波长改变时, 这个问题就变得更加困难, 因为各种不同波长要求不同的反射材料和折射材料。因此, 除对镜面破坏机制的研究外, 光束传输系统会变得非常重要。

5. FEL 与材料互作用的研究和 FEL 对材料工艺过程的效应的研究。例如,应用可调谐的高功率脉冲激光能量可能对研制新的半导体材料具有重大意义。通过研究,指出精确地选择改变材料和材料加工过程所需参数的途径,这项工作也就能够提高表面相互作用的基础知识状况。

参加上述工作的组织除五个区域性 MFEL 中心外,还有波士顿麻省总医院、犹他大学、西北大学、贝勒研究团体、加州大学欧文分校、马里兰贝瑟斯达保健科学统一勤务大学、芝加哥大学安阿伯分校、印地安纳州拉菲埃特珀迪大学、普林斯顿大学、安多佛物理科学研究所、普罗维登斯布朗大学和布法罗州州立纽约大学等。

尽管 FEL 有着十分诱人的应用前景。但是,由于 FEL 的技术复杂,自由电子激光器还处于发展阶段,成功运行的 FEL 数量不多。从查到的文献中,有关 FEL 应用的报告主要在材料科学方面有几例,已列于表 1 中。有关应用的实验研究工作主要是在加州大学桑达巴布拉分校的静电加速器 FEL 和斯坦福大学的 Mark III 及 SCA/FEL 上进行的。实验不多,确很宝贵。至今发表的有关应用研究的论文大多数是研究方案和设想,这也是可以理解的。

另一方面,利用现有各种类型的常规激光器,模拟自由电子激光开展应用研究工作,也取得了数项突破。这些研究课题的工作也列于美国 MFEL 计划以内。例如,在范德比尔特大学就专门为此设置有 CO₂ 激光器和 Nd:YAG 激光器等。在 MFEL 计划的资助下,这方面进行的工作有:

1. 鉴定了 35 种以上光敏材料,在加强用激光光动力学治疗癌症方面业已取得重大进展。正在研究这种治疗方法是否可推广到心脏病治疗和中风预防。

2. 生产医学诊断用放射性同位素。这些示踪同位素可用来研究和诊断大脑和心脏疾病。因为用这种新技术已经生产的放射性同位素源,比其他方法安全,生产的放射性同位素源既小,又轻、

表 1 美国研究中心 FEL 应用实验

项 目	自由电子 激光器	加速器 类型	波长 μm	宏脉冲 宽度	微脉冲 宽度	平均功率 密度	实验目的	实验结果
Mn 掺杂 FeF_2 的 远红外研究	UCSB	静电 加速器	167— 205	/	/	0.096— 20kW/cm ² (峰值)	研究 Mn 掺杂 FeF_2 的远红外线性和非平衡光谱学	得到不同波长、磁场强度下以及不同掺杂浓度的光谱图
n 型砷化镓磁 光电导的研究	UCSB	静电 加速器	164	1 μs	15ps	30W/cm ²	研究砷化镓浅施主能级电子跃迁动力学	得到郎道能级电子复合寿命和 $2p^+$ 激励电子寿命, 电子跃迁动力学可以用这些数据推导出
硅掺杂砷化镓 光霍尔实验	UCSB	静电 加速器	200— 295	1 μs	/	16—100 W/cm ²	研究砷化镓从施主能级共振跃迁以增强光电导的途径	在高 FEL 脉冲和弱磁条件下, 砷化镓背景光电导是最初激发电子与跃迁电子的共同结果
远红外光激励以增 强肌蛋白的配位键	UCSB	静电 加速器	198	/	/	600 W/cm ²	研究 CO 与肌蛋白的配位键重组类型	FEL 脉冲照射后, 蛋白与 CO 键对信号在 100 μs 内低通, 在 500 μs 后高通。
非晶半导体薄膜的 激励光谱分析	Stanford Mark II	射频 加速器	2.0— 5.0	/	1ps	12—120 W/cm ²	研究非晶半导体薄膜对低于电子跃迁能量的光吸收机理	得到能量小于 1.15eV 的光子的吸收光谱
皮秒自由电子 激光对乙酰苯胺中 的 Davydov 型孤立 子进行动力学测试	Stanford Mark II	射频 加速器	6— 6.1	1.3 μs	3.5ps	1.6— 2.3 kW/cm ²	研究蛋白质中能量传输途径	实验结果引起人们对能量在多肽物质中传播的孤立子模型的怀疑

简单而且能量效率高。

3. 实现了干净地切割骨骼而不把它烧黑。这种方法大有希望简化和缩短为老年患者更换髋关节和治疗急性关节炎这种复杂的关节外科手术的时间。

4. 利用光敏染料被恶性组织吸收并受到可见激光辐照，使癌细胞遭破坏而无损于健康细胞的方法，促进了白血病骨髓治疗和淋巴瘤的治疗。

5. 为了改进激光修补血管过程的效率和工作时间内的安全性，开发了激光修整血管和气球修整血管相结合的方法。血管修整术是一种排除血管血小板障碍的外科手术。

6. 发展了一种利用病人自己的血作粘合剂的用激光接合薄血管的方法。这种方法叫做微管吻合术。

7. 据发现，包括疱疹、麻疹和人类 I、II、III、IV 和 V 类免疫缺乏症在内的多种病毒在使用吸收激光的血卟啉衍生物的情况下均能够接受激光引起的光动力学过程。采取同样的方法，对乙型肝炎也有作用。

8. 白细胞和淋巴细胞接受同样类型光动力学过程，使得这种方法成了采用透析办法直接治疗淋巴瘤白血病的候选方案。

我国在 70 年代末已开始自由电子激光的研究。中国工程物理研究院、中科院北京高能物理所、中国原子能研究院、中科院上海光机所、电子科技大学、国防科技大学、中国科技大学、北京大学等单位都已开展理论研究和实验研究工作。并已取得一定进展和一些成果。自由电子激光在生物医学和材料科学中的应用和潜在应用也已引起大家的兴趣和关注。北京自由电子激光 (BFEL) 正常运行后，也将开展应用研究。

自由电子激光的未来，在很大程度上也取决于这些已经预见到的和还没有预见到的大量的潜在应用。可以相信，随着自由电子激光的发展和各种应用对自由电子激光提出的新的要求的实现，自由电子激光和自由电子激光的应用将相互推动而发展更快。

利用 FEL 和常规激光模拟自由电子激光的应用研究正在不断取得进展,研究领域也在不断扩大。自由电子激光除在生物医学、材料科学方面将获得重要应用外,在受控热核聚变反应的等离子体加热、工业加热、超导研究、微电子学以及基础科学的研究领域中,也是十分具有吸引力的。这些中间应用将不在本文中叙述。

II. 生物医学和材料科学研究用自由电子激光

2.1 自由电子激光的物理机制^[5,6]

自由电子激光器主要由产生相对论性电子注的加速器、摇摆器 (wiggler)、光学谐振腔和光学系统组成。

为了简单说明自由电子激光的原理,我们假定由加速器产生的电子注初始速度在轴向,即 $\vec{v}_i = v_{i0} \vec{e}_z$, 式中 v_{i0} 为电子的初始速度。摇摆磁场在 y 方向呈线极化,表为: $\vec{B}_w = B_w \sin(k_w z) \vec{e}_y$ 。式中 B_w 为 wiggler 磁场幅值, $k_w = 2\pi/\lambda_w$, λ_w 为 wiggler 周期。设光腔中激光辐射场为线极化的准平面波: $\vec{E} + \vec{B} = E_0 \cos(kz - \omega t) \vec{e}_x + B_0 \cos(kz - \omega t) \vec{e}_y$ 。式中 $k = \omega/c$ 为辐射场的波数; E_0 和 B_0 分别为电场和磁场的幅值。该辐射场在 FEL 作为振荡器时理解为噪声频谱的一部分或种子源,作为放大器时则理解为注入信号。光学系统保证辐射光波的正常耦合与传输。

电子进入 wiggler 区后,由于 $\vec{B}_w$ 产生的洛伦兹力 $\vec{v}_i \times \vec{B}_w$ 的作用,电子得到一垂直于 $\vec{v}_i$ 和 $\vec{B}_w$ 的偏转速度: $\vec{v}_w = v_{w0} \cos(k_w z) \vec{e}_x$, 在磁场中产生摇摆,如图 3 所示。

已具有横向速度 $\vec{v}_w$ 的电子在辐射场作用下,受到一 z 方向的洛伦兹力

$$F_z = -(|e|/c)(\vec{v}_w \times \vec{B})_z \tag{2.1}$$

该力称为有质动力,正比于 $\sin[(k+k_w)z - \omega t]$ 。wiggler 场通过电子运动与辐射场耦合,这在自由电子激光的理论中起很重要的