

我国自由电子激光研究的最新进展

杜祥琬

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

谢家麟

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

刘盛纲

(中国电子科技大学, 成都 610054)

陈佳洱

(北京大学, 北京 100871)

惠钟锡

(中国工程物理研究院, 成都 610003)

综述了我国一些研究单位的自由电子激光实验和理论研究, 介绍并讨论了拉曼型自由电子激光、康普顿型自由电子激光以及电磁波泵浦自由电子激光和切连科夫自由电子激光等研究工作的最新结果。

关键词 自由电子激光, 中国, 最新进展, 出光成功

Abstract

An overview of experimental and theoretical free electron laser (FEL) research in several institutions of China is given. Recent experimental results of a Raman-type and Compton-type FEL as well as electromagnetic wave pumped and Cherenkov FEL are reported.

Key words free-electron laser, China, recent progress, successful lasing

自由电子激光 (FEL) 具有可设计、可调节的特点和效率高、高光束质量的潜力, 有着广阔的应用前景。70年代后期以来, 它开始在国际上受到重视。但自由电子激光对电子束品质要求高, 技术难度大, 至今只有少数几个发达国家取得了重要的实验结果。

我国科技工作者从80年代开始着手进行FEL的研究。国家863计划重点支持和组织了基本物理问题和关键技术的研究, 取得一系列进展^[1,2], 有力地推动了这项研究工作的开展。1993年春, 两台主要FEL装置(曙光一号和BFEL)出光实验成功, 标志着我国的FEL研究和加速器技术的进步迈上一个新的台阶。

1. 拉曼型 FEL 曙光一号

拉曼型 FEL 曙光一号是基于感应型加速器的 FEL 放大器装置, 中国工程物理研究院建造的这台装置于1991年观察到了自发辐射

表1 曙光一号自由电子激光放大器的参数

	设计	性能
电子束: I_e (A)	450	~600
E_e (MeV)	3.4	3.3 ± 0.15
$\theta(\pi \cdot \text{cm} \cdot \text{rad})$	0.47	0.43
$\Delta\tau/\tau(\%)$	2	1
摇摆器: B_w (kGs)	3.1	2.4—3.1
λ_w (cm)	11	11
L_w (cm)	385	400
微波源: P (kW)	20	~0.3 (摇摆器中)
$\Delta\tau$ (μ s)	0.35	0.4
f (GHz)	34.6	~34
自由电子激光: P (MW)	10; 100	~10
f (GHz)	34.6	~34
g (dB/m)		~20

放大信号,经改进后于1992年底测得近100kW的自发辐射放大(电流 $I_e = 600A$, 摇摆器磁场 $B_w = 2.6kGs$, 输出信号频率 $\sim 36GHz$)。在这一基础上,1993年4月成功地进行了受激辐射放大实验,输出的34GHz的脉冲激光功率达10MW,功率指数增益为20dB/m(见表1和图1,2)。实验结果显示了FEL放大器的正确的物理规律,与北京应用物理与计算数学研究所的理论预估和数值模拟符合较好。这是我国自由电子激光研究中的一项重大进展^[3]。

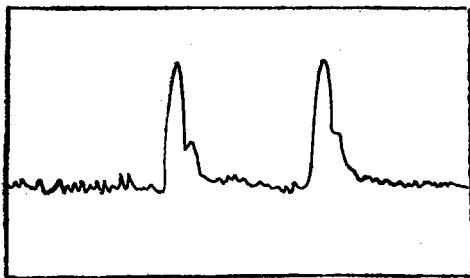


图1 曙光-1号出光实验中输出的典型放大微波信号

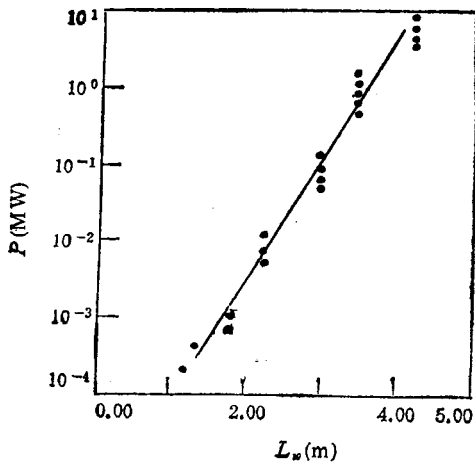


图2 曙光-1号受激辐射输出功率P随摇摆器轴向坐标 L_w 的增长 ($B_w = 2.6kGs$)

此外,在1985年和1986年,中国科学院上海光学精密机械研究所和西南应用电子研究所曾利用脉冲线加速器产生的电子束,分别获得了8mm波长的自由电子激光输出,后者经改进后,还实现了饱和增益^[4]。

2. 射频加速器型 FEL

北京自由电子激光 (BFEL) 装置是红外 FEL 振荡器装置,其电子束来自 30MeV 的射频型加速器。中国科学院高能物理研究所自由电子激光研究组经多年奋斗,于1992年9月观察到自发辐射,又经改进,于1993年5月成功地实现了受激辐射放大实验^[5]。这是亚洲第一次实现的红外波段的 FEL 出光(图3)。

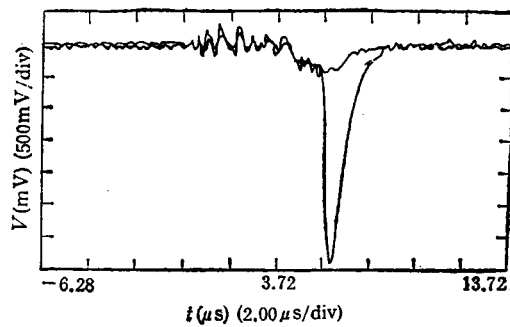


图3 BFEL 装置5月测出的受激辐射信号

BFEL 的主要设计参数见表2。该装置采用的微波电子枪, α 磁铁, 大功率宽脉冲调节器, 钕铁硼永磁扭摆磁体和光腔五维粗、细、微三级遥控调节系统等,均属国内首创,达到了国际先进水平。

表2 BFEL 的物理参数

1.微波枪		3.摇摆器	
峰值电流 (A)	10—20	周期 (cm)	3
宏脉冲平均电流 (mA)	110—220	周期数	50
能量 (MeV)	0.9±0.1	度越长度 (cm)	0.85—1.5
发射度 (mm·mrad)	<30	摇摆器参数	1.0—1.8
相宽	4°	4.光腔	
2.加速器		波长 (μm)	10.6 7—25
能量 (MeV)	10—30	瑞利长度 (cm)	(1/3—1/2) ×150
BBU 电流 (mA)	300	损失 (%)	<5
宏脉冲宽度 (μs)	3—5	腔长 (cm)	251.96
能散 (%)	0.5		

3. 电磁波泵浦 FEL

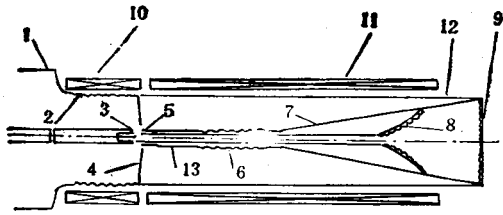


图4 中国电子科技大学 EM-FEL 装置示意图

- 1.脉冲直线加速器; 2.波导管; 3.阴极; 4.阳极;
5.波截断区; 6. BWO 的慢波结构; 7. 输出筒;
8. 相对论电子束; 9. 输出窗; 10. 阴极区磁场;
11. 主磁场; 12. 真空罩; 13. FEL 相互作用区

用一个电磁波作扭摆体与电子束相互作用,可以获得较短波长的 FEL。中国电子科技大学于 1991 年建成了 EM-FEL 装置并获得了毫米波段的激光功率输出^[6]。装置示意图见图 4。实验参数列于表 3。用到的 EM 泵浦源由相对论 BWO 产生。

表 3 中国电子科技大学研制的 EM-FEL 的实验结果

	设计值	测量值
电子束能量 (MV)	0.6	0.6
束流强度 (kA)	>0.2	3—5
泵浦波波长 (cm)	3.0	~3.0
波功率 (MW)	>50	~100
泵浦波模式	TM ₀₁	TM ₀₁
散射波长 (mm)	~3	3—8
辐射功率 (kW)	>10(3mm 波段)	>10

4. 切连科夫 (Cherenkov) FEL

由中国电子科技大学等单位合作,在实验上演示了多电子束切连科夫 FEL 的物理机理,将能量为 0.5MV、总电流为 280A 的电子束引入到多电介质腔中,激发了 1.7MW 的频率为 33.4GHz 的受激切连科夫辐射,相互作用效率达 1.2%^[7]。这种多电子束的切连科夫 FEL 装置有可能实现更高功率的毫米波和厘米波的受激辐射输出。

国防科技大学的研究组也成功地进行了 3cm 波长的受激辐射实验,输出功率达 1.1MW,他们使用的电子束的参数为 ~300keV, 2.0—2.5kA, 饱和长度为 70cm, 增益达 0.93dB/cm,

物理

主模为 TM₀₁ 模。实验中采用了介电常数为 2.25 的有机玻璃作介质衬套。

5. 电子束质量的研究

电子束品质的好坏对 FEL 具有重要意义,对短波长的 FEL 尤其是这样。

为了研究实现高亮度电子束的技术,中国原子能科学研究院设计和建造了一个 L 波段的高亮度电子枪,已经出束^[8],正在进行测试分析,可望给出电子束亮度的数据。

为探索获取更高亮度电子束的技术途径,开展了两项重要的单元技术研究,即光阴极技术和超导射频腔。中国工程物理研究院的研究组与北京大学合作研究光阴极技术并对几种不同阴极材料进行了初步的实验,得到了量子效率等数据。北京大学的研究组于 1988 年开始进行超导铌腔的研究。作为第一步,首先研究了 L 波段的单共振腔并得到了初步结果^[9]: 在 2.1K 的低温下获得了稳定的品质因子 $Q_0 = 2 \times 10^9$, 实现了 12.6MV/m 的加速场梯度(图 5)。这个结果达到了国际先进水平。

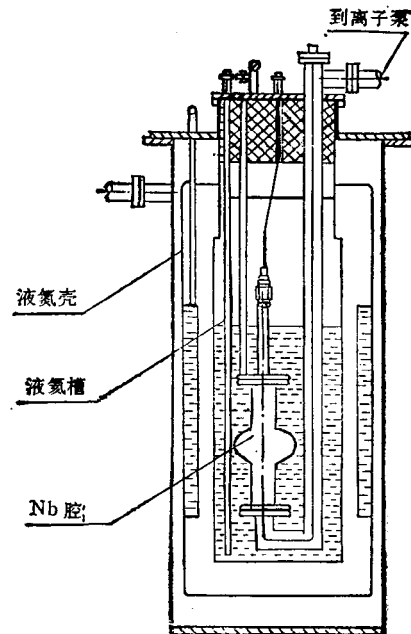


图 5 超导 Nb 腔示意图

6. FEL 的理论研究

我国有关单位对自由电子激光的线性和非

线性理论进行了广泛的研究,对诸如光导、边带不稳定性、混沌现象等非线性效应以及加速器中电子束流崩溃效应、尾场效应等取得了初步的研究结果。

开展了系统的 FEL 物理和束流物理的数值模拟工作。北京应用物理与计算数学研究所和中国原子能科学研究院等单位发展了一维、二维和三维的配套的数值模拟软件包,并紧密配合实验,进行了实验方案的设计、预估和实验结果的分析。于敏^[10]教授提出了分析 FEL 纵横的理论方法,刘盛纲^[11]教授发展了 FEL 的相对论空间电荷波理论。这些工作都独具特色,受到国际同行专家的好评。

近年来,我国科技工作者在自由电子激光的理论和实验研究方面取得了长足的进展,加深了对 FEL 物理的理解,初步掌握了相关的技术,积累了宝贵经验,培养了人才。几种不同类型的自由电子激光,包括拉曼型 FEL 曙光一号、射频加速器型 FEL、电磁波泵浦 FEL 和切连科夫 FEL 都建成了初步的实验装置并出了光,理论和实验相结合,对物理和技术问题作

了一定深度的分析。此外,我们还开展了一些自由电子激光单元技术的研究,特别是提高电子束品质的技术,取得了进展。我们将继续改进 FEL 的研究工作,并逐步使 FEL 走向实用化,使之在推动我国科学技术发展中作出应有的贡献。

- [1] Du Xiangwan et al., Nucl. Instrum. and Meth., A 272(1988), 29.
- [2] Liu Shenggang, Proceeding of 17th International Conference on Infrared and Millimeter Waves, (1992).
- [3] Hui Zhong Xi et al., Proceeding of First Asian Symposium on FEL, (1993), to be Published.
- [4] Hu Kesong, *ibid.*
- [5] Xie Jialin, *ibid.*
- [6] Liang Zheng et al., 2nd Int. Conf. MM and FIT, Aug. 17-21, 1992.
- [7] Qingyuan Wang et al., *Appl. Phys. Lett.*, 59 (1991), 2378.
- [8] Zhai Xinglin, Proceeding of First Asian Symposium, to be Published.
- [9] Zhao Kui, *ibid.*
- [10] Yu Min, *High Power Laser and Particle Beam*, 3-2 (1991), 127.
- [11] Liu Shenggang, *Int. J. Electronics*, 72-1(1992), 161.

固体薄膜中的分形生长¹⁾

柳百新

(清华大学材料科学与工程系,北京 100084)

简要报道了作者近年来用离子束方法研究固体薄膜中分形生长现象的部分结果。例如,首次用离子束辐照使非晶态向晶态转变,在临界点观察到析出的 Ni-Mo 晶体的多核心凝聚;离子束界面混合形成的类似于晶格动物的不连续分叉树形结构;磁相互作用对分形凝聚过程及其分形维数的影响;离子注入下与化合物形成相关的类 DLA 结构等。

关键词 分形生长,固体薄膜,离子辐照

Abstract

Ion beam methods have been used to study fractal growth phenomena in thin solid films. We report the first observation of multi-nucleation aggregation of the

1) 国家自然科学基金资助项目。