

自由电子辐射与北京自由电子激光*

谢家麟

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

摘要 首先讨论了一些典型带电粒子的辐射机制及其应用, 引入多个电子产生相干辐射的条件, 说明了它的重要意义. 在扭摆磁体辐射的基础上发展的自由电子激光, 是物理与技术多年相互促进的结果. 它具有波带覆盖广阔、波长连续可调、有高峰值功率和高平均功率的潜力, 束流品质优异, 并可产生大功率、短脉冲, 因而具有一系列重要的应用的可能性. 最后, 介绍了我国的发展情况, 并在亚洲首先出光的、使用射频直线加速器、在红外谱区工作的北京自由电子激光的研制为例, 阐述了自由电子激光的物理和技术的内涵.

关键词 自由电子, 辐射, 相干性, 激光

Abstract Various particle-photon or beam-wave interactions are first discussed. To be of use as intense radiation sources, it is necessary that these interactions produce coherent radiation. The free electron laser (FEL), developed on the basis of undulator radiation, is the result of many years of interaction between physics and technology. It has many features, such as continuous tunability over a wide wavelength range, excellent optical quality, high power and short pulse capability, and thus has many potential applications. FEL development in China and abroad will be briefly mentioned and the Beijing FEL presented to illustrate the physics and technology involved in an FEL project.

Key words free electron, radiation, coherence, laser

带电粒子(包括电子、正电子、质子、介子等)在不同条件下产生辐射是从本世纪初就一直被研究的古老的经典电动力学的课题. 由于它与其他科学技术及应用的密切关系, 因此有关的研究工作经久不衰, 至今仍在推陈出新, 不断有新的发现和发展. 本文首先综述一些使用相对论性电子产生相干辐射的途径和方法, 并以这个领域近年的重要发展——自由电子激光的情况作为背景材料; 然后以我们自己的研制工作: 北京自由电子激光装置为例, 说明了有关的科学与技术的内涵.

1 自由电子辐射机制简介

图 1 给出了某些自由电子辐射机制的示意

图, 下面分别加以介绍.

1.1 切伦科夫辐射

远在世纪之初特殊相对论出现之前, Heaviside 和 Sommerfield 就从理论上研究超光速电子的辐射效应, 虽然电子速度并不能超过光速, 但只要把光速看作介质中的光速, 他们的分析还是正确的. 在实验上, 1910 年居里夫人就观察到含镭溶液瓶中发出的蓝光. 1926 年, Mallet 也发现在放射源附近的透明物质会发出光谱连续的可见光. 但直到 1934 年, 切伦科夫才从实验上对此现象进行了系统地观测^[1], 后来 Frank 和 Tamm 进行了理论的分析^[2], 为此, 他们共同获得了 1958 年诺贝尔奖.

* 1995 年 8 月 7 日收到初稿, 1995 年 8 月 29 日收到修改稿.

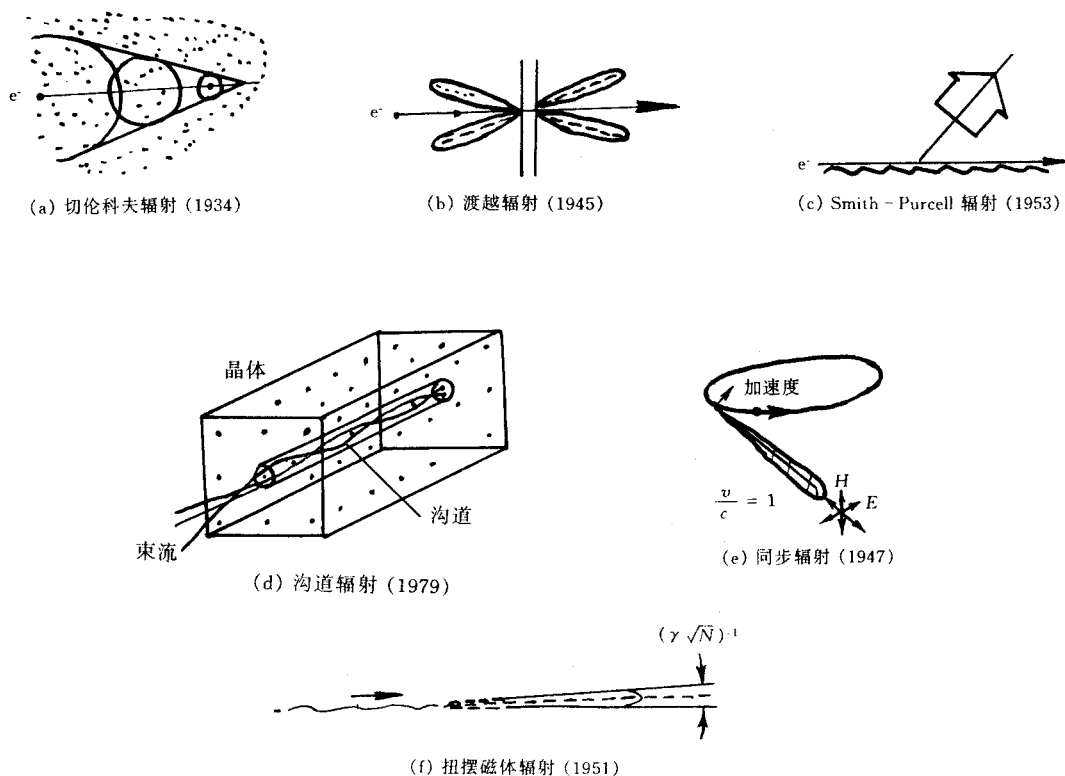


图1 自由电子辐射机制的示意图

(a)切伦科夫辐射(1934); (b)渡越辐射(1945); (c)Smith - Purcell 辐射(1953);
(d)沟道辐射(1979); (e)同步辐射(1947); (f)扭摆磁体辐射(1951)

切伦科夫辐射在高能物理、核物理、宇宙线探测器上得到了应用,用来探测单个带电粒子的速度、阈值、电荷等.直到如今在高能物理探测器上仍占有重要的位置.另一个重要的研究方向,是使切伦科夫辐射成为有用的光源为目的.使用相对论性的电子束在真空紫外已能产生亮度较高的非相干辐射^[3].在长波波段,实现了 mm 波的 MW 级的相干辐射^[4,5].迄今为止,切伦科夫辐射作为相干辐射源,仍只限于长波波段,但在原理上,并无向较短波长发展的限制^[6,7].这方面研究工作是大量的,1962 年,论文即达 400 余篇.

1.2 渡越辐射

一般讨论切伦科夫辐射,都是考虑介质是无限的.但实际情况介质总有边界,而且在边界

内、外的场是不同的.因此,电子通过边界必然会产生另外的辐射场,即渡越辐射,以满足边界条件^[8].由于渡越辐射强度一般较低(约 100 个相对论性电子,可产生 1 个渡越辐射光子),同时还因为有其他辐射的干扰(如韧致辐射、切伦科夫辐射、荧光等),观测较难.渡越辐射也与切伦科夫辐射一样,既可用于核物理和高能物理作为探测器,又可向辐射源方向发展.由于渡越辐射发射角与入射粒子的方向呈 γ^{-1} 关系(γ 为归一化能量),故特别适用于高能粒子能量的检测.近年人们对用它的可见光部分(OTR)于加速器束流性能测量(截面、能量、能散度、发射度等)感到很大的兴趣^[9].就辐射源应用而言,很早就有人提出^[10],至今仍有人在进行研究:例如采用电子束通过周期安排的介质层产生共

振作为自发或受激辐射源^[11];使用短电子束团产生的相干渡越辐射^[12],但作为实用的辐射源,则仍有待于继续研究.

1.3 Smith - Purcell 辐射

当电子束掠过金属光栅表面时,感应电荷将沿着光栅表面振荡而产生辐射^[13].虽然有些物理模型被提出来解释观察到的现象,但是验证细节的实验仍在进行之中.使用低能电子已经制成一种名为 Orotron 的器件^[14,15].

1.4 沟道辐射

当电子束流以很小角度通过晶体而沿一个晶轴或晶面(沟道)运动时,电子与很多晶格原子发生集体作用,受到晶体内原子间巨大宏观电场的作用而作螺旋运动产生辐射^[16,17].这个电场高达 10^{13} V/m 或相当于 30000T 的磁场,可用于偏转高能粒子.沟道辐射的应用也是沿着两个方向的,既用于粒子探测,也有人倡议作为辐射源之用.

1.5 同步辐射

高能电子沿曲线运动时,由于有向心加速度的存在,会辐射出广谱、高亮度的同步辐射光^[18](实际上,当电子被加速经过经典半径的距离获得的能量与静止能量相当时,即使作直线运动,也会产生辐射).同步辐射已经成为基础研究和应用研究的十分重要的手段.它产生的辐射是偏振的,有时间结构,并且部分相干.自从发现之后,它已经历了三代的发展.第一代是使用与高能物理实验兼用的同步加速器;第二代是专用的储存环;第三代则是以低发射度的电子束和多个插入元件(如扭摆磁铁等)为特征的专用储存环.目前我国已有三台,第四台正在筹建中.

1.6 扭摆磁体辐射

电子通过磁场周期变化的区域,会发生扭摆运动,因而产生扭摆磁体辐射^[19].它与在均匀磁场中偏转产生的同步辐射不同,不是沿圆周轨道的切线方向发射;而是集中于范围很小的正前方.同时,由于干涉效应而形成分立的谱线,平均光谱亮度较偏转磁场产生的高出 2—3

个数量级.

以上给出的是一些常见的自由电子辐射的机制.在实际中,有些辐射常常是同时出现的.例如:电子通过有界面的介质会产生渡越辐射,但同时会伴生有在介质中产生的切伦科夫辐射;电子通过扭摆磁体会产生扭摆磁体辐射,但同时也会由于电子进入或射出扭摆磁体时,轴向速度发生突变而产生另外的与轴线成 γ^{-1} 的角度的发射,名为渡越扭摆磁体发射^[20].

以上几种机制,切伦科夫辐射、渡越辐射和 Smith - Purcell 辐射,可以归纳为慢电磁波辐射效应;沟道辐射、同步辐射和扭摆磁体辐射,可以归纳为运动状态改变导致的辐射效应.

2 辐射的相干化

在任一种机制下,多个电子辐射的强度可表示为^[21]

$$I_{\text{total}}(\lambda) \approx I(\lambda)[N + N^2 f(\lambda)], \quad (1)$$

式中 $I(\lambda)$ 为单个电子的辐射强度, N 为电子数目, $f(\lambda)$ 为电子纵向分布函数.当电子为高斯分布时,

$$f(\lambda) = \exp[-2\pi^2(\sigma_z/\lambda)^2]; \quad (2)$$

当为矩形分布时,

$$f(\lambda) = [\sin(2\pi\sigma_z/\lambda)/(2\pi\sigma_z/\lambda)], \quad (3)$$

式中 σ_z 为电子束团长度, λ 为电磁辐射的波长.由(2),(3)式可见,当 $\sigma_z \gg \lambda$ 时, $f(\lambda) \approx 0$, 相当于电子连续分布,辐射是非相干的.此时辐射强度与电子数 N 成比例.当 $\sigma_z \ll \lambda$ 时, $f(\lambda) \approx 1$, 相当于电子群聚于单一的位相,产生的是相干辐射.此时若 $N \gg 1$, 则辐射强度将与 N^2 成比例,即相干辐射强度为非干辐射强度的 N 倍.在实际情况中, N 一般为 10^8 左右,因此,辐射由非相干转为相干,其强度可望有极大的增长,同时还可用以进行全息成像、倍频或混频,这些是有十分重要的实际意义的.

原则上说,利用所有自由电子辐射机理,都可以做成相干辐射源.但如何产生相干辐射,这需要创新的物理思想和技术手段.简单地说可

以有两种方式:首先可用加速器产生 $\sigma_z \ll \lambda$ 的束团.这是当前很感兴趣的研究方向,现在技术上已能产生 40fs 的束团^[22].使用短束团脉冲通过自由电子辐射的各种机制,即可产生相干辐射,例如最近已经提出提高储存环的高频系统的频率,将其电子束团长度压缩,以便在波长较长的频谱部分,产生相干的同步辐射光^[23].

另外一种方法是将连续的束团通过产生辐射的机制,经过反馈而自动进行压缩,最后达到产生相干光的目的.行波管就是最简单的例子.但是由于基本原理的限制,它是不能产生光波波段的辐射的.自由电子激光(FEL)是近年相干光源研究的一大突破,原理上它可以产生从 mm 波到软 X 射线的高强度的相干辐射,而且光束质量极好,可达衍射极限.因而开拓了一个重要的研究领域.它虽名为‘激光’,但与常规激

光在工作原理上,有根本性的差异.常规激光是基于工作物质的原子、分子能级的跃迁,从而产生特定谱线的受激发射,FEL 则是由被加速的高能电子直接产生的自由电子辐射.光的波长可以调变,而且不受工作物质击穿、发热的限制.名为激光,更多是因为它产生的是相干光的缘故,它实际上是加速器物理和技术发展的产物^[24].图 2 表示了 FEL 在填补电磁波谱的空白的重要作用.产生 FEL 的关键问题,是要有质量良好的电子束流.有几种加速器可供使用,如直线加速器、储存环、静电加速器等,也可采用不同的电子-辐射机制,但从近年研究的结果看来,最有发展前途的是使用扭摆磁体辐射的机制和使用直线加速器的电子束来产生 FEL,本文以下讨论就集中在这个方面.由于篇幅所限,讨论也只限于光波波段.

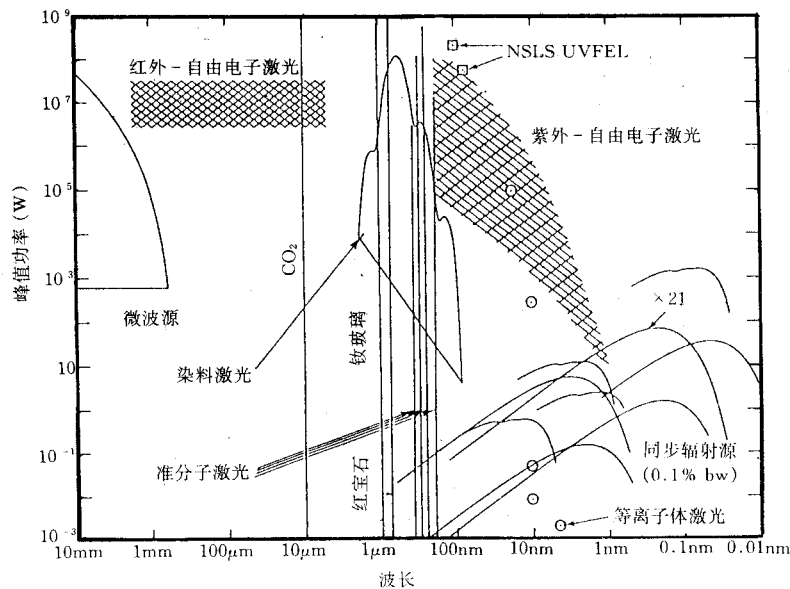


图 2 各种辐射的电磁波谱分布图

3 FEL 工作原理、特点与发展情况

图 3 是自由电子激光工作原理的示意图.由图 3 可见,当电子通过扭摆磁铁时,受静磁场作用而产生横向扭摆运动.这样,就可能和与它

们同向前进的光的电场发生能量交换,使横向速度发生变化.横向速度变化又通过与光的磁场作用而产生纵向力,使原来纵向均匀分布的电子群聚成团,并将动能转为场能,产生相干辐射的增长.这个过程主要可用经典电动力学描述^[25].也可从量子物理受激康普顿散射来理解,

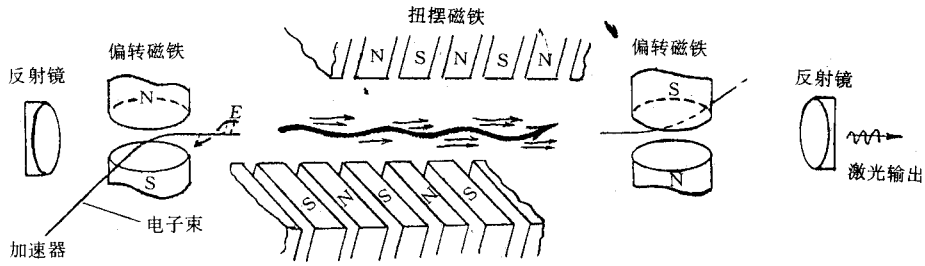


图3 FEL工作原理示意图

即电子对扭摆磁体形成的虚光子进行散射, 经过静磁场周期的洛伦兹收缩, 散射光频率又经多普勒频移, 最后产生的在轴线上的光波波长为

$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} (1 + K^2), \quad (4)$$

式中 λ_u 为扭摆磁体周期, γ 为归一化能量, $K = 0.93B(T)\lambda(m)$.

在光束与电子束完全重合的情况, 单程辐射强度的增长可以表示为

$$G = G_0(I, N, B, \gamma, \lambda_u \dots) f_c \cdot f_e \cdot f_E, \quad (5)$$

$$f_c(N\lambda/\sigma_E) \leq 1,$$

$$f_e(N, K, \lambda_u, \epsilon) \leq 1,$$

$$f_E(N, \sigma_E) \leq 1,$$

式中 G_0 为无限长的理想冷束(发射度, 能散度为零)的增益, f_c 为有限束长的修正系数, f_e 为发射度的修正系数, f_E 为能散度的修正系数. 这三个修正系数一般都小于 1. 由此可见, 为了保持足够的单程增益, 对电子束的性质有严格的要求. 即束流发射度、能散度必须很小, 而流强则要很大. 这是对加速器技术的严重的挑战.

FEL 具有一系列的特点, 其中主要的是:

(1) 可以工作在广阔的波带, 从 mm 波到 X 射线, 而且在一个波带中波长可以通过改变扭摆磁体场强或加速器能量而连续调变.

(2) 可以产生高脉冲功率或平均功率的高品质的激光. FEL 没有一般高功率激光的工作物质的温升和击穿的限制, 同时作用后的电子

束能量可以回收, 因此, 原则上可以产生极高的功率, 也由于没有工作物质的畸变, 光束质量非常优异, 可达衍射极限.

(3) 可以产生极短的光脉冲. FEL 的光脉冲与电子束团长度相当, 而电子束团现在已可做到几十 fs, 因此, FEL 可以进行高时间分辨的应用.

(4) 可以产生各种偏振光. 依照使用平面或圆偏振扭摆磁体的不同, FEL 可产生不同的偏振模式.

由于 FEL 上述的一些特征, 它适用于光谱学、非线性光学、时间分辨实验、生物医学、工业处理等方面的应用. 因此, 1977 年美国斯坦福大学 J. Madey 教授的小组首先实现了基于扭摆磁铁辐射的自由电子激光振荡^[26], 是这个领域的一个重大的突破. 世界各主要实验室纷纷开展研制. 至今建成的或正在建造的装置约在 40 台以上^[27]. 投入了大量的人力与物力. 荷兰的 FELIX, 法国的 CLIO, 美国的 Stanford 大学、Vanderbilt 大学、Duke 大学等都在向用户装置发展.

第四代同步辐射装置, 要求辐射有好的相干性、更高的亮度和更短的脉冲, 这些都是 FEL 的特征. 因此, 同步辐射的发展(第四代), 显然会走 FEL 的道路. 另外, 应该指出的是: FEL 与高能加速器的发展存在密切的关系, 因为在对束流的高强度、低发射度、可靠性等方面, 两个科研领域都有同样的要求. 因此, 各国高能物理实验室: 如中国的高能物理研究所, 美

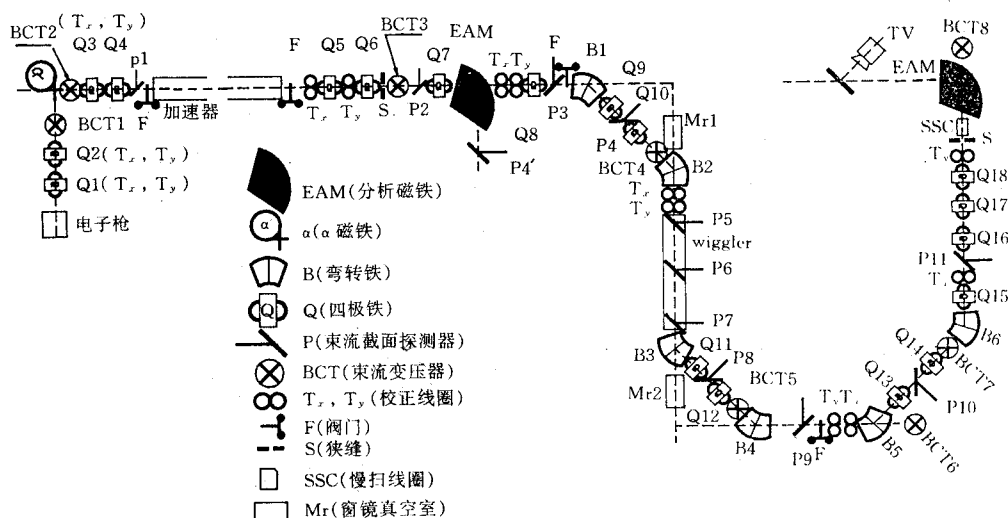


图4 BFEL 的总体示意图

国的 SLAC, BNL, CEBAF, 日本的 KEK, 德国的 DESY, 法国的 ORSAY, 俄国的 INP, JINR 等, 都正在进行 FEL 的研究.

4 北京自由电子激光(BFEL)

在 80 年代中期, 我国一些单位开始了 FEL 的研究. 这里将介绍在亚洲首先出光并达到饱和的、在红外谱区工作的、使用射频直线加速器的北京自由电子激光(BFEL)^[28], 用以说明研制 FEL 的科学和技术内涵. BFEL 的总体情况如图 4 所示.

由图 4 可见, 大功率速调管产生的强微波场, 经由波导管分别送到微波电子枪的谐振腔和电子直线加速器的加速管中. 热阴极微波电子枪产生脉冲电子束流, 在低能传输系统中, 经 α 磁铁进行能量选择和相区压缩后, 注入到加速管中, 将电子加速到 30MeV 左右, 然后通过一消色散和准等时性的高能束流传输系统, 注入到扭摆磁铁中, 发生电子-辐射相互作用, 产生的激光通过光束传输系统, 送到光学实验室进行测量、诊断. 产生激光后的电子束, 再经束流传输系统, 送到时间分辨谱仪, 研究相互作用

后电子束团能量随时间的变化关系.

在 BFEL 的研制中, 主要的科技问题包括以下几个方面:

4.1 FEL 理论计算和计算机模拟

在 BFEL 具体情况下, 电子-辐射相互作用的一系列问题, 特别是实现受激辐射, 并达到饱和的物理参数的要求^[29].

4.2 高功率微波的产生

用于电子的产生和加速的微波功率高达 20MW 左右, 需要使用国内现有的速调管, 而该管设计的脉冲宽度为 $3\mu\text{s}$, BFEL 工作需要接近 $10\mu\text{s}$ 的宽脉冲, 并且要求在脉冲内微波场振幅和相位的变化分别达到 $< 1\%$ 和约 1° 的范围. 为此研制了大功率宽脉冲调制器, 找到速调管满足特殊使用要求的工作条件^[30].

4.3 微波电子枪

BFEL 最为关键的技术问题, 是选择什么样的注入方式, 才能产生皮秒级的、有很低的发射度的束团, 以满足 FEL 的低发射度、低能散度电子束流的要求. BFEL 采用了使用 LAB₆ 阴极的微波电子枪, 解决了带有阴极的谐振腔的尺寸计算和反轰电子所引起的、在脉冲内电流增大、能量降低而引起的问题^[31].

4.4 扭摆磁铁

扭摆磁铁是电子-光子相互作用的关键部件. 为了加工容易, 价格较低, 我们选择了 LAB_6 材料, 编制了选择单块磁铁、每个周期及整个磁体的测量程序, 最后研制成功磁场均匀度为0.5%、电子轨道偏移小于 $50\mu\text{m}$ 的扭摆磁体^[32].

4.5 光学腔

为了使电子束产生激光的过程能多次进行, 以便达到饱和, 扭摆磁体外必须有反射率很高的镜片反射光束, 使其多次与电子束团相互作用. 由上、下游镜片及 x, y, z, θ, φ 的调节机构组成光腔, 以便在其中实现共振, 并将一部分激光引出腔外. 上游镜片要求反射率很高, 以减低损失, 下游镜片则需要透过一部分激光. 镜片支架需能在真空进行粗、细、精三个层次的调整, 以便保证电子束轴、光腔轴与扭摆磁铁轴的

三轴的重合^[33].

部件研制成功之后, 进行了BFEL的总体调试, 经历了四个主要阶段: 即自发辐射、储存辐射、受激辐射、饱和振荡. 自发辐射的谱宽给出了扭摆磁铁及束流性能的信息, 证明有可能产生受激辐射. 储存辐射较自发辐射放大了20倍, 说明光腔的状态与设计相符. 受激辐射给出了 10^5 的增益, 说明系统已达到工作状态, 后来经过进一步优化调整, BFEL系统终于在亚洲首先获得波长为 $9-11\mu\text{m}$ 范围、增益为 10^8 的饱和振荡. 检验了在光学波段的FEL的技术要求, 达到了跟踪研究的目的. 图5给出了BFEL的输出激光与在扭摆磁铁末端的束流曲线, 显示了经过大约 $1\mu\text{s}$ 时间, FEL达到饱和. 由测量结果可知, 此时光腔内功率可达20MW. 图6给出光束的空间分布, 根据光腰和散角估计, 可知BFEL光束质量优良, 接近衍射极限象^[34, 35].

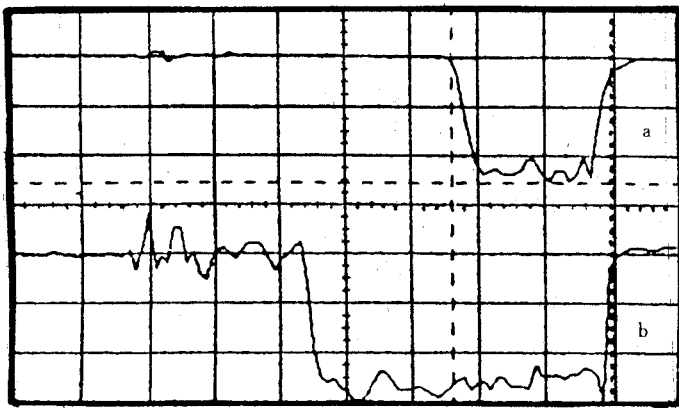


图5 饱和激光脉冲(a)和电子束脉冲(b)

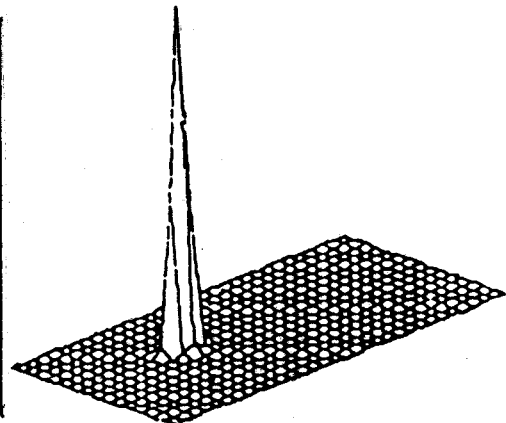


图6 激光空间分布图

利用自由电子产生的相干电磁辐射作为强光源使用是有重要意义的科研领域, 建筑在扭摆磁体辐射基础上的FEL是近年的重要发展. 它的有关理论和设计程序已经基本完备, 经过了实验的检验. 达到工作状态的实验装置也逐渐增多, 目前正在向用户装置发展. 在科研应用方面, 上面已经提到了一些方向; 在生产应用方面, 美国CEBAF研究所与俄国新西伯利亚原子核研究所都正在研制激光平均功率可达

100kW的FEL装置, 分别作化纤和光化学处理使用.

最后需要指出的是FEL的研究仍在高速发展之中. 国际上每年都举行FEL国际会议和地区性会议, 并在多种有关学术会议中进行专题讨论. 不过要使FEL能更广泛地应用于科学研究, 成为一般实验室设备或者特定的工业生产装置, 小型化、减低造价(目前一台红外FEL的研制费用在美国约为1000万美元)和使之易

于使用,是重要的发展的方向.当然,使用高能电子直线加速器的庞大的FEL装置,可产生X射线水窗波段的高功率、亚皮秒脉冲,为生物样品瞬间成像提供手段,对生命科学的发展有巨大的推动作用.因此,美国几个研究所也正在联合进行名为直线加速器相干光源(LCLS)的研制.

参 考 文 献

- [1] P. A. Cerenkov, *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, **2**(1934), 451.
- [2] I. M. Frank and Ig. Tamm, *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, **14**(1937), 109.
- [3] M. A. Piestrup et al., *Appl. Phys. Lett.*, **28**(1976), 92.
- [4] H. Lashinsky, *J. Appl. Phys.*, **27**(1956), 631.
- [5] P. Coleman et al., *J. Appl. Phys.*, **31**(1960), 1695.
- [6] J. E. Walsh, *Phys. Fluids*, **20**(1977), 709.
- [7] M. K. Zhevago and V. I. Glebov, *Phys. Rev. Lett. A*, **16**(1991), 564.
- [8] 屈卫星、徐至展, *物理学进展*, **9**(1989), 188.
- [9] E. Nishimura et al., Intern. FEL Conference, (1994), to be published.
- [10] G. A. Askarian, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, **30**(1956), 584.
- [11] S. Datta and A. E. Kaplan, *Phys. Rev. A*, **31**(1985), 790.
- [12] U. Happek et al., *Phys. Rev. Lett.*, **67**(1991), 2962.
- [13] S. I. Smith and E. M. Purcell, *Phys. Rev.*, **92**(1953), 1069.
- [14] R. P. Leavitt et al., *J. Quant. Elect.*, **17**(1981), 1333.
- [15] G. Doucas et al., *Phys. Rev. Lett.*, **691**(1992), 1761.
- [16] M. A. Kumakhov, *Phys. Lett.*, **57**(1976), 17.
- [17] R. W. Terhune and R. H. Pantell, *Appl. Phys. Lett.*, **30**(1977), 265.
- [18] H. Winick ed., *Synchrotron Radiation Sources*, World Scientific, (1994).
- [19] P. Luchini and H. Motz, *Undulators and Free Electron Lasers*, Clarendon Press, (1990).
- [20] K. J. Kim, LBL Report, # 36615, Note 132, Center of Beam Physics, (1994).
- [21] J. S. Nodvick and D. S. Saxon, *Phys. Rev.*, **96**(1954), 180.
- [22] H. Wiedemann et al., *Nucl. Instr. and Meth.*, **A319**(1992).
- [23] J. B. Murphy and S. Krinsky, *Nucl. Instr. and Meth.*, **A346**(1994), 571.
- [24] R. B. Palmer, *J. Appl. Phys.*, **43**(1972), 3014.
- [25] G. Dattoli and A. Torre, *Free Electron Laser Theory*, Lectures given at CERN, (1989).
- [26] D. A. G. Deacon et al., *Phys. Rev. Lett.*, **38**(1977), 89.
- [27] R. DEI-CAS, *Directory of FEL Experiments*, Service de Physique et Techniques Nucleaires, France, (1991).
- [28] J. Xie et al., *Nucl. Instr. and Meth.*, **A272**(1988), 40; **A296**(1990), 244; **A341**(1993), 204; **A341**(1994), 34; **A358**(1995), 256.
- [29] 谢家麟、庄杰佳等, *高能物理与核物理*, **18**(1994), 764.
- [30] 赵小风、益关祺等, *强激光与粒子束*, **4**(1992), 40.
- [31] 应润杰, *强激光与粒子束*, **6**(1994), 235.
- [32] J. Xie et al., *Record IEEE Particle Accelerator Conference*, (1991), A2020.
- [33] 赵春农、李永贵等, *强激光与粒子束*, **6**(1994), 131.
- [34] 苏憬、庄杰佳等, *强激光与粒子束*, **7**(1995), 10.
- [35] 傅恩生、王之江等, *科学通报*, 待发表.
- [36] 曹忠、刘慰仁等, *强激光与粒子束*, **4**(1992), 501.