

北京自由电子激光实验装置 首次出光

谢家麟

(学部委员,中科院高能物理研究所研究员)

北京自由电子激光(后简称 BFEL)实验装置于 1993 年 5 月 26 日首次出光,在 $10.65\mu\text{m}$ 波长,给出了较自发辐射功率高出 10^3 倍的信号,成为亚洲地区研制的近十台红外谱区的 FEL 振荡器中,第一个产生了激光的装置,也是继美国之后,成功地使用热阴极微波电子枪产生了红外自由电子激光的装置。它是我国高技术领域的一个重大的突破。

下面将对 FEL 的发展概况, BFEL 的总体布局,采取的技术路线,关键技术达到的水平,以及调试的过程,作一简单的综述。

(一) FEL 发展概况

相干电磁辐射,如无线电、电视、雷达、激光等对人类生活和科技进步的重要性是人所共知的,把相干电磁辐射推向更短的波长,特别是填补红外和 X 光两个缺少合适的光源的空白谱区,是科学家几十年来努力的目标。1977 年 Madey 等人研制成功 FEL 振荡器,利用受激康普顿散射原理而摆脱一般激光的能级跃迁的概念,就使产生相干电磁辐射这个问题有了一个根本性的突破。当然, Madey 的工作是在一系列前人的研究的基础上发展起来的。在 30 年代前后, Schrödinger, Kapitza 和 Dirac 就提出了受激康普顿散射的概念;1968 年 Pantell 提出利用微波进行这方面的试验。在另一方面,1951 年 Motz 发明了扭摆磁铁;1960 年 Phillips 把扭摆磁铁用于一种微波器件产生了 6mm 波长的电磁辐射。这些前期的工作都给 Madey 以启发和提供了技术基础,使他终于能在实验上实现了 FEL。

FEL 的出现,在当时引起了科技界很大的重视。这是因为它具有波长连续可调,功率潜力巨大,光束的质量可达衍射极限,可产生超短光脉冲等优点,而具有广阔的应用前景,包括:凝聚态物理、材料科学、分子气相谱学、生物学、光化学、生物医学、等离子体物理、能源、军事、通讯、微电子学、微加工、高能加速器;同步辐射等等领域。在 X 光谱区,生物活体的 X 射线全息更是科学界十分感兴趣的问题。目前 FEL 发展的前沿是紫外波段, X 光 FEL ($0.1\text{nm}-10\text{nm}$) 尚在进行可行性研究,估计下世纪初当可实现。

由于上述 FEL 的重要意义,一位著名诺贝尔奖金获得者曾把它誉为科技界的一个“新金矿”,这是很恰当的比喻。因而,世界上科研先进国家,纷纷投入力量研制它,都希望从中挖掘出有用的成果。

由于历史原因,各国实验室曾使用几种不同类型的加速器提供电子束来进行 FEL 研究,但并不是所有实验都获得成功。Brau 在他所著的 Free Electron Lasers 一书中曾提到在光波波段研制的 FEL,只有半数可以出光工作。这是因为 FEL 的研制需要—个高品质的电子束(高流强、高稳定性、低发射度、低能散度等等),此要求远远超过一般使用的加速器的性能指标。因此对加速器物理与技术提出了严重的挑战。

进行 FEL 研究使用的加速器计有高压产生器、感应直线加速器、静电加速器、射频直线加速器(常温及超导),电子回旋加速器及储存环等。据不完全统计,迄今各国共建 FEL 约 40 台以上,其中射频直线加速器 19 台,感应直线加速器 11 台,储存环 7 台,静电加速器 2 台,电子回旋加速器 2 台。其中美国、欧洲各约有 14 台。正在建造中的约有 40 台,计划待批的约 10 台。

在以上这些研究设置中,有些装置因技术路线失当,始终不能工作。建成装置中计有 15 台出光。经过十几年的实验考验,现在已经明确,射频直线加速器是产生光波 FEL 的较好选择。世界上已经作为用户装置投入使用的 FEL 计有美国三台,荷兰一台,法国一台。它们都是在红外谱区工作,其中 4 台使用了 S 波段射频直线加速器。

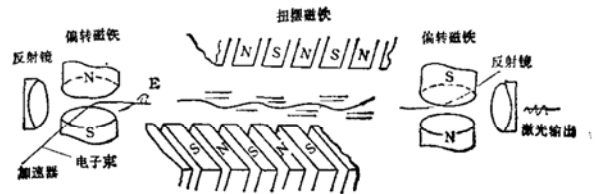


图 1 FEL 工作原理示意图

(二) BFEL 简介

附图 1-2 给出 FEL 的工作原理和 BFEL 的总体安排。它由热阴极微波电子枪、 α 磁铁、四极聚焦磁

铁等组成注入系统,产生最大能量为 1.2MeV,峰值电流大于 10A,发射度约为 $20\pi\text{mm}\text{mrad}$,宏脉宽为 $4\mu\text{s}$,微脉冲约为 4ps 的电子束团。将它注入到一个长度为 3.05m 长的等梯度直线加速器中,加速后电子能量大于 30MeV,发射度有所增长。然后经消色散和近等时性的输运系统,送到扭摆磁铁入口。电子能量及能散度由输运系统中的一块 90° 分析磁铁测定。扭摆磁铁由 400 块 NdFeB 永磁体组成,包括 50 个磁场周期。根据实测场分布的计算机模拟,电子运动轨迹偏离小于 $50\mu\text{m}$ 。扭摆磁铁中真空室两端,放置 5 维、三级遥调节光腔镜座,镜片使用反射率分别为 99% 及 99.5% 的多层介质膜 ZnSe 片,光腔长度为 2.52m。电子束团宽度在进入扭摆磁铁前后可进行测量,电子在光腔中做扭摆运动产生的红外激光,被引送到光学测量室进行强度及光谱测量。作用后电子束团通过 180° 等时性、消色散输运系统,到达时间分辨谱仪,以研究电子与辐射作用后能谱的变化,从而指导改进提高的方向。

下面,我们将着重介绍 BFEL 总体中的几个关键环节,用以说明采取的技术路线和达到的性能水平。

(1) 热阴极微波电子枪

在射频 FEL 研制中,注入系统方案的选择是一个最为关键的环节。目前国际上 FEL 注入系统有三种方案。第一种是常规电子直线加速器注入系统的改进。它包括栅控强流高压电子枪,次谐波聚束器、聚束器等。这个方案很早就用在有些电子直线加速器中使用,但对 FEL 而言,性能指标还要进一步提高。它的优点是在常规的基础上提高,比较成熟,但有些部件,依赖进口,设备比较复杂,对发射度增长和脉冲晃

动都需要进行研究。第二种是 80 年代末期出现的光阴极微波电子枪,它利用皮秒级短脉冲强激光照射位于谐振腔中的光阴极产生电子,并由腔中的强微波场加速,既可提供高能强流低发射度束团,又省去聚束过程,是最有发展前景的一种注入系统。不过,它的工作条件十分苛刻,半导体光阴极量子效率高但寿命短;纯金属阴极量子效率低,需要大功率激光而大功率激光的稳定度一般不合要求,而且整个设备非常复杂昂贵,这是当今仍在发展研究中的课题。第三种是热阴极微波电子枪(参阅图 3),它用 LAB。热阴极产生电子并在谐振腔中加速,它始见于 1986 年文献报道,已成功地应用于红外自由电子激光装置。它的优点是设备简单,发射度可与光阴极媲美,缺点是电流受阴极发射限制并有反轰问题。经过慎重考虑,我们认为可在我国第一台红外自由电子激光装置中使用。它的性能完全能满足产生受激辐射的要求,没有需要进口的部件,造价较低,且有多方面其他应用。故决定采用它。迄今它已工作

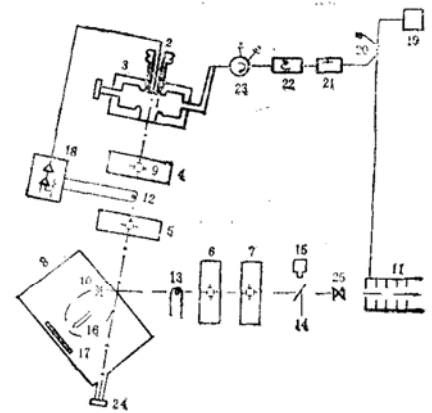


图 3 热阴极微波电子枪注入系统示意图 (图中 1 为 LAB, 阴极; 2. 支架; 3. 谐振腔; 4--7. 四极聚焦磁铁; 8. α -磁铁; 11. 直线加速器加速管)

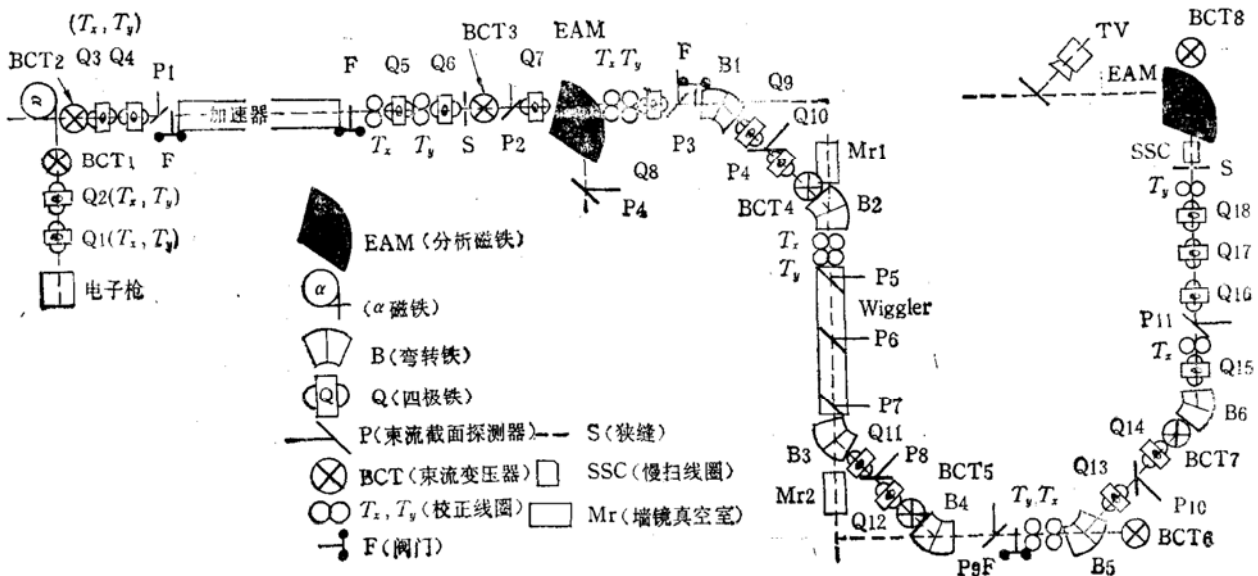


图 2 北京自由电子激光示意图

两年,性能稳定,指标先进,为 BFEL 出光奠定了基础。事实证明,这是一个正确的技术路线。

(2) 宽脉冲、大功率调制器及微波源

为了保证 BFEL 起振,饱和并有较大的平均功率,宽脉冲、大功率调制器及微波源是必需解决的问题。国外虽有产品,但过去一直受禁运限制,而且售价十分昂贵。一旦使用以后将长期依赖进口。国内北京正负电子对撞机使用的国产速调管及调制器,已批量生产,质量可靠,但工作在 $3\mu\text{s}$ 左右,该管在美国 SLAC 也只在短期试验到 $5\mu\text{s}$ 左右,而 BFEL 设计希望有 $8\mu\text{s}$ 脉宽。要检验这个指标能否达到,首先要研制一套宽脉冲大功率低纹波的调制器。这个工作本身就是一个尖端的技术。现在研制成功的调制器其脉冲半高全宽为 $8.8\mu\text{s}$,功率为 70MW ,平顶纹波优于 $\pm 0.35\%$,平顶部份宽 $6\mu\text{s}$,工作稳定可靠,系国内首创(参阅图 4)。它为大功率速调管宽脉冲工作提供了条件,而性能良好的宽脉冲大功率微波源又是 BFEL 工作的基本保证。

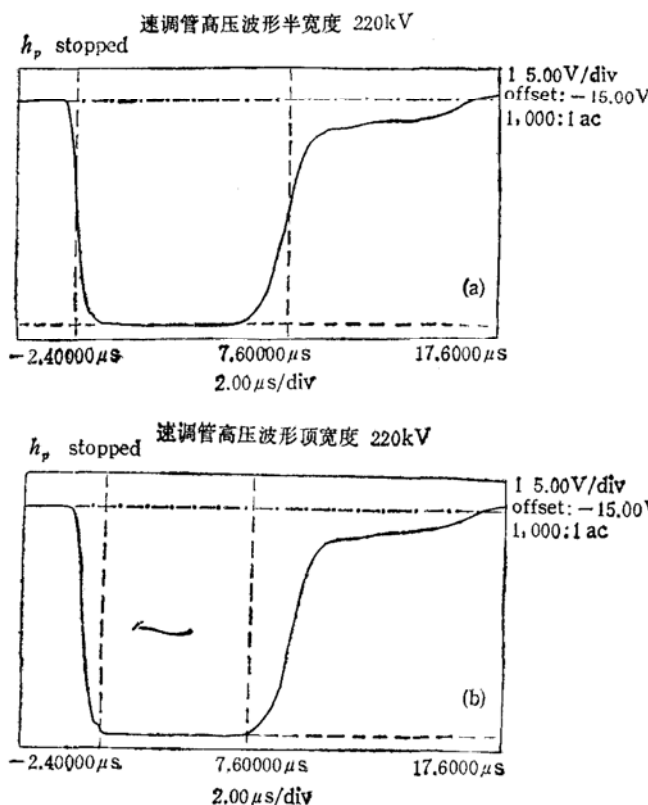


图 4 调制器高压脉冲波形

(3) 扭摆磁铁

FEL 装置中的扭摆磁体是电子束与辐射相互作用的关键部件。一般使用永磁材料产生高场强的周期变化的磁场。永磁材料多使用钕钴。自 80 年代开始较多使用钕铁硼。BFEL 研制之初,我们就认识到钕

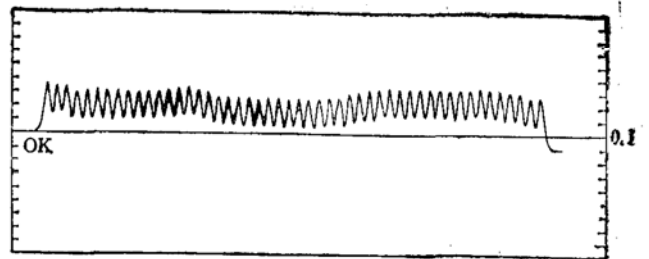


图 5 扭摆磁铁调试后电子轨迹

铁硼相对于钕钴的优越性,如容易加工,剩余磁感应强度高,价格便宜等等。虽然它的温度系数较差,但 BFEL 并非在高温下使用,它的抗辐射性能当时缺少资料,我们通过将国产磁体放在强辐射环境中试验后,认为它有足够的抗辐射寿命,决定采用。在研制过程中,首先建造了磁块及磁体的测量装置,掌握并改进了测量方法。通过实践,解决了在磁场巨大作用力下的精密安装和计算机模拟指导下的磁块渗合与微调。终于达到了场强相对变化小于 0.5% ,电子轨迹偏移小于 $50\mu\text{m}$ 的国际水平。(参阅图 5)

上面简单地介绍了 BFEL 研制中的几项关键工作,其他如加速管恒温水冷系统达到 $\pm 0.03^\circ\text{C}$,完成了光腔在真空室内的五维、三级精密遥控调节系统等,也都系国内首创,性能指标达到了国际水平。

(三) 调整出光过程

硬件研制成功,安装准直之后,BFEL 开始进入调整出光阶段。它共经历了三个发展历程。首先于 1992 年夏观测到自发辐射,自发辐射谱线宽度与电子束发射度、能散度、扭摆磁铁均匀度、系统准直等都有关系,因此通过自发辐射谱的测量可以提供很多束流和系统的状态信息。其后于 1993 年春得到多层介质膜镜片,装在真空系统中工作的光学谐振腔。此时;由于光腔的储能作用,当电子束通过时,观测到约 20 倍的功率增加,这仍属于自发辐射,但它又提供了光腔质量和准直情况的信息。最后,于 1993 年 5 月 26 日,经过调整优化,在束流品质满足设计要求,扭摆磁铁、光腔及电子束三者通过使用氦氟激光、二氧化碳激光及平行光管保证同轴后,电子束团与光脉冲在时间、空间上重叠,终于产生了红外谱区的自由电子激光。(见封面)

初步测量结果是:受激辐射与自发辐射功率比约 10^3 ;光谱宽度 $\sim 1\%$,而自发辐射光谱宽度则约为 4% ;失谐曲线半高全宽约为 $20\mu\text{m}$,实验时波长在 $10.6\mu\text{m}$ 附近,在出现受激辐射时观察到波长峰值向长波移动。以上一些现象,都是自由电子激光信号的特征。

(四) BFEL 出光的意义及发展前景

BFEL 产生了受激辐射,说明束流参数及系统状态基本满足要求,因而提供了一个最灵敏地反映整体

硅锗量子阱埋沟场效应晶体管

胡际璜 王迅

(复旦大学应用表面物理国家重点实验室,上海 200433)

现代科学技术的发展、自动化程度的提高、计算机应用的普及,需要越来越多的高速大规模、超大规模集成电路。金属/氧化物/半导体场效应晶体管(MOSFET)由于其工艺简单、产额高、功耗低、抗干扰能力强、输入阻抗高、易于大规模集成,在大规模集成电路领域内很受人们青睐。尤其是互补型金属/氧化物/半导体场效应晶体管(CMOS)电路,可在单电流下工作,且工作电压范围广、噪声容限大、集成度高,几乎有取代双极型晶体管集成电路的趋势。然而,CMOS电路的速度因受 p 沟MOS中空穴迁移率的限制,不如双极型器件的快,使它的应用受到一定的限制。如能提高它的工作速度,则可使MOS电路具有更强的生命力。

提高MOS电路的工作速度,可从二方面着手:一是从器件结构出发,减小寄生电容;另一是从材料性能出发,增大载流子迁移率,尤其是增大空穴迁移率。应变的硅锗材料及 $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 量子阱埋沟 p 增强型MOS结构(如图1所示)可获得很高的空穴迁移率。因此,研究 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ MOSFET的理论及实验工作正在悄然兴起。 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ MOSFET除了具有 Si MOSFET所不具备的高空穴迁移率的优点外,它还具有 SiMO -SFET所具备的一切优点。在制造工艺上除了增加一道分子束外延(MBE)或超高真空化学汽相淀积(UHV/CVD) $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 层外,其余工艺均与 Si 器件所用的工艺相容,因此,它可以方便地与 Si 器件集成。

性能的监测手段,可用以指导进一步的改进、提高。因此,它是具有重大意义的关键性的突破。当然,我们也应该看到,像FEL这样尖端的发展中的科研工作,它既有许多本身的科学问题有待研究,又有许多实际的应用有待开发,出光只是这些工作的开始,就BFEL而言,在加速器物理、FEL物理、红外谱区的应用等方面都有大量的开拓性的课题。例如:束流亮度的提高和能散度的减少都是加速器物理的前沿;束团电荷的时、空分布对转换效率、谐波分量的影响是FEL物理感兴趣的问题;考虑到在应用时希望有较大的谱区覆盖,BFEL向短波可利用康普顿散射产生准单能X-光,向长波可利用切仑科夫辐射产生亚毫米波,它的波带覆盖是可以很宽的。总之,瞻望以后的发展,BFEL在加速器物理和FEL应用两个方面,都是有广阔的天地和灿烂的前景的。

$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ MOSFET之所以具有高空穴迁移率,是因为它独有的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 成分、应变特性及量子阱能带与埋沟结构,下面逐一进行阐述。

1. $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 材料中Ge的存在使材料具有较高的空穴迁移率。

半导体中载流子的迁移率由载流子的有效质量 m^* 和平均散射时间 τ 所确定,Ge中空穴的有效质量比Si中的小,迁移率比Si中的大。弛豫的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的能带结构随Ge的成分 x 而变,当 $x < 0.85$ 时,其能带是类Si的,而当 $x > 0.85$ 时,是类Ge的,即使是类Si的能带,其载流子的有效质量和迁移率与体Si的也不同。合金的能带结构使空穴有较小的 m^* ,因而空穴迁移率增大。从平均散射时间来看,合金中的空穴除了受单晶中普遍存在的声学声子散射(又称晶格散射)、电离杂质散射及能谷内或能谷间的散射外,还受硅锗合金特有的硅原子与锗原子无规则排列造成的原子势场起伏而引起的合金散射。即使计入合金散射的影响,在相同掺杂程度下, $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金中的空穴迁移率仍比体Si中的大。

2. $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 层中的应力使空穴迁移率增大。

在 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金层中往往存在双轴应力的作用,使得 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金层的能带结构与无应变时的大不相同。双轴应力一般可分解成一个单轴应力加上一个流体静应力,后者的作用是使所有的价带都发生相同的能带位移,因而不影响空穴的有效质量。而单轴应力对价带结构的影响较大,一方面,它使得轻空穴带和重空穴带在布里渊区中心的简并取消,使自旋-轨道分裂带与轻、重空穴带的能量间隔增大,因而使空穴的带间散射减弱;另一方面,应力使价带的态密度减小相当于使空穴的有效质量减小,这两方面总的效应使应变的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 层中的空穴迁移率增大。

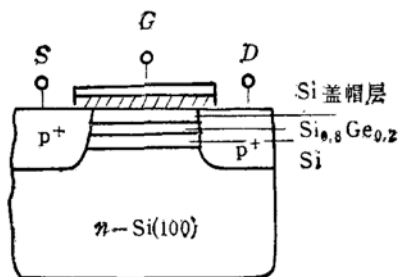


图1 $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{SiP}$ MOS结构

有效质量。而单轴应力对价带结构的影响较大,一方面,它使得轻空穴带和重空穴带在布里渊区中心的简并取消,使自旋-轨道分裂带与轻、重空穴带的能量间隔增大,因而使空穴的带间散射减弱;另一方面,应力使价带的态密度减小相当于使空穴的有效质量减小,这两方面总的效应使应变的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 层中的空穴迁移率增大。

3. $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 量子阱埋沟MOS结构减小载流子遭受的散射,保持高迁移率不降低。