

第四代光源——相干光源

朱雄伟 张 闯 王书鸿 陈森玉

物理学是自然科学的基础，物理学的发展是许多新兴学科、交叉学科、新技术的基础和前导。光子科学是物理学的一个蓬勃发展的热门分支，它的应用已经远远超过了物理学本身，延伸到天文学、化学、生物学、医学、地质学等。

光子是电磁波的量子形式，它没有静止质量。人类已经开发的电磁波波长的跨度从宇宙宏观尺度到物质的微观尺度（从千米波到 X 射线，见图 1）。电磁波的开发极大地推动了人类物质文明与精神文明的进步。通讯、导航、雷达、视频、激光技术、IT 业，无不依赖电磁波的利用。波长大于微波波段（包括微波）的电磁波资源，早已为人类所开发。在第二次世界大战前后，普通微波管得到了迅速的发展。各种微波管（速调管、磁控管、行波管、返波管等）的发展，使得近代雷达、导航等技术得到发展和完善。20 世纪 50 年代以后，各种固体器件（半导体管、基于负电阻效应的耿式二极管、雪崩二极管、约瑟夫器件）迅速发展，在此波段做出了小功率器件。激光物理和激光技术（量子器件）在 20 世纪 60 年代后得到迅速发展，开拓了红外、可见光、紫外、X 射线等波段。

基于自由电子的辐射装置（光源）具有功率大，可调谐，波长覆盖宽的特点。目前全世界大约有 70 台在建造和运行的光源。波长覆盖了整个电磁波

波谱。

自由电子的辐射

运动的自由电子产生的辐射，早已被经典力学与量子力学仔细研究过。运动的带电粒子的辐射具有多样性。自由电子的自发辐射主要有以下几种机理：

放射辐射 运动的自由电子产生的电磁场由两部分组成：一部分与速度有关，另一部分与加速度有关。与速度有关的部分对辐射场无贡献。辐射场是由与加速度有关的部分产生的。同步辐射（synchrotron radiation）属于这一类。

契仑柯夫辐射 也叫“超光速”辐射。当匀速直线运动的电子速度超过介质光速时，就会产生这种辐射。

散射辐射 当电磁波入射到电子上时，由于电子在入射场中运动而产生的辐射。用量子力学的语言来说，是电子与光子散射过程。当入射波频率较低时称为汤姆逊散射。而当入射波波长小于电子的康普顿波长时，称为康普顿散射。

衍射辐射 当运动的电子遇到不均匀性时（如导体等）发生辐射，称为衍射辐射。

自由电子的自发辐射一般是连续谱，非相干的。人们希望得到的是相干电磁波。所谓相干（coherence）就是一致性，相干包括时间相干性和空间相干性。所谓时间相干性是指光场中同一空间电磁波谱

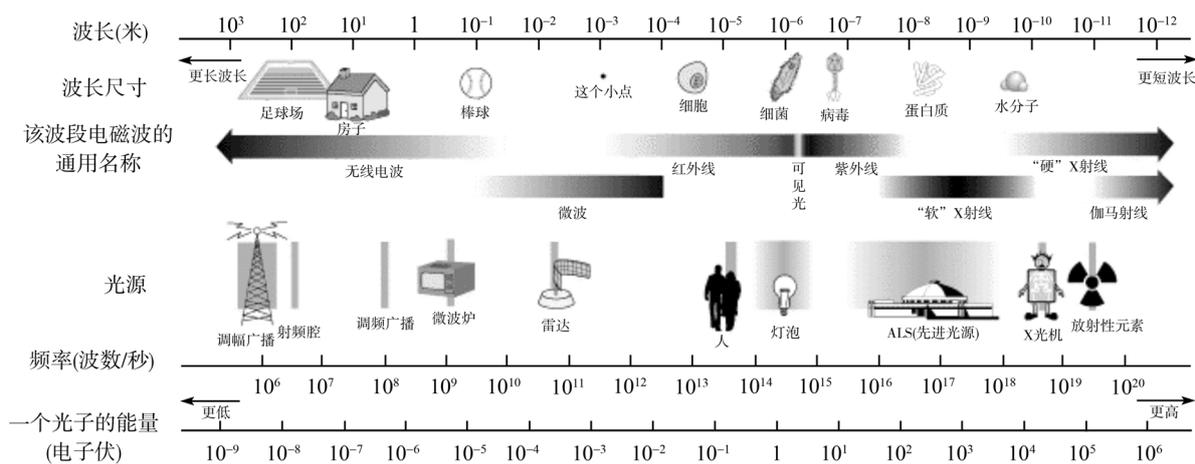


图 1 电磁波谱

点在不同时刻光场之间的相干性。空间相干性是指光场中不同的空间点在同一时刻光场的相干性。将非相干辐射化为相干辐射的主要方法，是将自发辐射变成受激辐射。所谓受激辐射就是电子在某种外加力的调制（受激）从无序运动变为有序一致运动时产生的辐射，它的辐射功率远远大于自发辐射。从目前研究情况来看，利用共振特性将自发辐射变成受激辐射是一种常用的有效途径。当电子与电磁场相互作用的时间远大于电磁场周期时，保持有效相互作用的首要条件是它们之间的同步（共振）。在等离子体物理中，充满了大量的波粒子与波相互作用，这已经超出了本文的范围。在电子物理与加速器物理中，这个共振条件一般可写为：

$$\omega - k_z v_z = n\Omega,$$

$$n=0 \text{ (慢波, 契仑柯夫)}$$

$$n \neq 0, \Omega = \begin{cases} k_w v_z & \text{(自由电子激光)} \\ \omega_c & \text{(回旋共振脉塞)} \end{cases}$$

其中， ω 为电磁波频率， n 为谐波数， Ω 为电子在外加静态场中的振荡频率， $k_z v_z$ 为由于电子平移的多普勒平移， ω_c 为回旋频率。由以上共振条件派生出契仑柯夫器件、回旋共振脉塞、自由电子激光(FEL)及其反过程的对应的加速装置。

本文主要介绍两种典型的光源装置：同步辐射与自由电子激光。同步辐射经历了一代、二代、三代，是非相干辐射光源。一代同步辐射光源是寄生在高能物理装置上兼用的同步辐射装置(20世纪70年代以来)，二代同步辐射光源是大量放置插入件的专用光源(20世纪80年代以来)，而三代光源是优化的、低发射度的专用的同步辐射光源(20世纪90年代以来)。ERL(能量回收型直线加速器)是准相干同步辐射光源(发射度更低，横向部分相干)，它具有能量回收的功能。而自由电子激光是完全相干辐射。FEL与ERL就是我们通常所说的第四代光源。

自由电子激光

从广义上来讲，凡利用自由电子与电磁波相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。在特定含义上是指自由电子通过一个横向周期磁场产生的光波受激放大与振荡，这就是我们现在常说的自由电子激光(FEL)。FEL的历史可以追溯到1951年。美国斯坦福大学的莫兹(Motz)等人使电子注通过一个横向周期磁场(wiggler)，观察到亚毫米波的发

辐射，这是自由电子激光的理论基础。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 $10.6 \mu\text{m}$ 的光放大。FEL从原理上显示出能够产生从微波到X射线的高功率相干辐射，它具有频率连续可调性，完全相干，高峰值功率，精确控制的脉冲结构。自由电子激光经历了从低增益(振荡器)到高增益(SASE, HGHG)两个阶段，从有种子激光到无种子激光。图2显示了自由电子激光三种典型的运行模式：低增益的振荡器、有种子激光的放大器、无种子激光的自放大受激辐射。HGHG(高增益高次谐波产生)介于有种子激光与无种子激光之间，其在调制段有种子激光，而在辐射段无种子激光。

自由电子激光的关键技术主要有：低发射度的电子枪、束团压缩技术、超长高精度波荡器、飞秒束团测量技术、高精度的相位控制系统等。

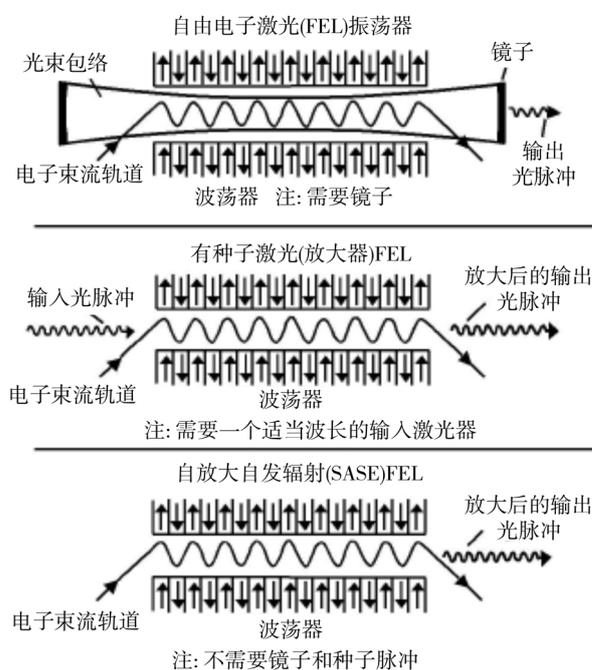


图2 FEL的三种运行模式

能量回收型直线加速器

能量回收型直线加速器(ERL)最初是由M.Tigner于1965年提出的。它是将电子直线加速器产生的高能电子束经过一个返回环(loop)，再进入到直线加速器中进行减速，提供微波能量从而达到回收能量的目的，同时返回环直线节安装插入件提供横向部分相干的同步辐射，当然直线节也可以与FEL相结合。由于ERL的返回环是单次通过电子束，

欢迎投稿, 欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会, 由中国科学院高能物理研究所主办, 是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

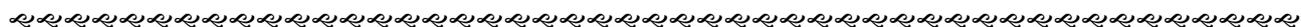
为进一步提高《现代物理知识》刊物的学术水平, 欢迎物理学界的各位专家、学者、教授以及研究生为本刊撰写更多优秀的科普文章。投稿时请将稿件的 Word 文档发送至本刊电子信箱 mp@mail.ihep.ac.cn。投稿请将联系人姓名、详细地址、邮政编码, 以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯等栏目, 并于 2009 年增加了彩色中心插页。2010 年《现代物理知识》, 每期定价 8 元, 全年 6 期 48 元, 欢迎新老读者订阅。

邮局订阅 邮发代号: 2-824。

汇款到编辑部 地址: 北京市玉泉路 19 号乙高能物理所《现代物理知识》编辑部; 邮编: 100049。

需要过去杂志的读者, 请按下列价格汇款到编辑部。1992 年合订本, 18 元; 1993 年合订本, 18 元; 1994 年合订本, 22 元; 1994 年增刊, 8 元; 1995 年合订本, 22 元; 1996 年合订本, 26 元; 1996 年增刊, 15 元; 1997 年合订本, 30 元; 2000 年附加增刊合订本, 38 元; 2000 年增刊, 10 元; 2001 年合订本, 48 元; 2002 年合订本, 48 元; 2003 年合订本, 48 元; 2004 年合订本, 48 元; 2006 年仅剩 4、5、6 期, 每期 7 元; 2007 年每期 8 元, 2007 年合订本, 50 元, 2008 年每期 8 元, 2008 年合订本 50 元。以上所列, 均含邮资或免邮资。



其要提供与三代光源相当的平均电流, 就必须工作在高重复频率(连续状态), 所以主加速器必须采用超导技术以克服常温技术下产生的热效应。

ERL 的主要技术有: 高平均电流的电子枪、超导加速技术、束团交汇技术、多束共存的 lattice 技术。

太赫兹与 X 射线

太赫兹电磁波段位于红外与微波之间。太赫兹辐射的命名来源于它的振荡频率在 THz (10^{12} Hz) 左右。在电子学领域, 太赫兹被称作毫米波与亚毫米波。而在光谱学(量子器件)领域, 被称为远红外射线。尽管自然界充斥着大量的太赫兹辐射, 但在 20 世纪 80 年代以前, 由于缺乏有效的发射源与探测器, 对这一波段缺乏深入的研究。太赫兹成为不为人们所熟悉的“空白”, 即所谓的“THz Gap”。究其原因, 一方面, 对于常规的电子学器件, 由于辐射波长与器件特征尺寸相当, 在这一波段难以制造, 且量子效应(粒子的波动性)开始起作用, 器件难以工作。另一方面, 量子器件适合于太赫兹波段的工作物质难以寻找(能级差小)。太赫兹引起科学界的兴趣更重要的原因在于它的许多独特性质: 透视性、安全性、独特的光谱分辨本领。

X 射线(伦琴射线或 X 光)是一种波长范围在

0.1nm 到 10nm 之间的电磁辐射形式。X 射线波长略大于 0.5 nm 的被称作软 X 射线, 波长在 0.1 nm 左右的叫硬 X 射线。X 射线最初用于医学成像诊断和 X 射线结晶学。

机遇与挑战

光子科学是当今物理学界的热门话题。国际上四代光源正处在预研、建造、调试的阶段。正是国内迎头赶上的好时机, 对于我们是机遇, 而另一方面也是挑战。四代光源将加速器物理与技术推向了极端, 它将是一系列高新技术产生的摇篮, 从而推动生产力的发展, 这是当今中国经济发展的主题。高能所大约从 2003 年开始了 X 射线四代光源的研究。在 2008 年初期提出了硬 X 射线光源 ERL 与 XFEL 相结合的一机两用的新概念, 并展开了一系列的研究, 提出了用于太赫兹辐射的 ERL-FEL 试验装置。当然国内其他单位(上海应物所、合肥光源、北京大学、清华大学等)为了这一共同目标也开展大量细致广泛的工作。

致谢: 感谢北方光源课题组的其他成员(秦庆、徐刚、王九庆、胡天斗、姜晓明)的有益讨论。

(中国科学院高能物理所 100049)