

相干谐波储存环自由电子激光*

刘金英

(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230026)

贾启卡 何多慧

(中国科学技术大学同步辐射实验室 合肥 230029)

摘要 相干谐波自由电子激光不用光学谐振腔及反射镜,可望工作在紫外和真空紫外光波段,是第四代同步辐射光源的可能途径之一.由于对束流品质要求很高,相干谐波自由电子激光首先是以储存环作为驱动器而发展起来的.由于光阴极微波电子枪的发展和直线加速器技术的进步,目前,已开始有直线加速器驱动的高增益相干谐波自由电子激光的建议.文章介绍了相干谐波储存环自由电子激光的原理、现状及展望.

关键词 相干谐波储存环自由电子激光,光学速调管,种子激光,相干谐波辐射

HARMONIC GENERATION STORAGE RING FREE ELECTRON LASER

Liu Jinying

(Modern Physics Department, University of Science & Technology of China, Hefei 230026)

Jia Qika He Duohui

(Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science & Technology of China, Hefei 230029)

Abstract A coherent harmonic generation free electron laser (FEL) does not use an optical cavity or mirrors, and hence it is able to work in the UV and VUV spectral range. It may be a possible approach for fourth generation synchrotron radiation sources. Because it requires a high quality electron beam, it was first demonstrated and developed on electron storage rings. As a result of the development of the photocathode microwave electron gun and the progress of linear accelerator technologies, of linear accelerator driven coherent harmonic generation FELs have been proposed. This paper describes their principle, present status and prospects.

Key words coherent harmonic generation storage ring free electron laser, optical klystron, seed laser, coherent harmonic radiation

1 引言

光包括可见光和不可见光,是人类观察和研究自然界所不可缺少的工具.光源的发展对于科学技术的发展具有十分重要的推动作用,X射线、激光和同步辐射的发现都对科学技术事业产生了革命性的影响.同步辐射具有优异特性,已被广泛应用于许多科学技术领域,在用

户需求的推动下,同步辐射光源本身也已经历了从第一代到第三代的发展,目前正在进行第四代光源的探索研究.自由电子激光作为短波长、可调谐、短脉冲、高亮度的相干光源,是最有希望的第四代同步辐射光源.电子储存环束流

* 国家 863 计划资助项目;高等学校博士学科点专项科研基金资助项目

1998 - 12 - 09 收到初稿,1999 - 04 - 13 修回

品质好、平均流强高,在第三代同步辐射光源储存环长直线节中建造储存环自由电子激光,在紫外和真空紫外光波段的平均亮度可高达 10^{26} 光子/($s \cdot m^2 \cdot mrad^2 \cdot mA \cdot 0.1$ 带宽)^[1].相干谐波储存环自由电子激光不用光学谐振腔,避开了振荡器型自由电子激光在向短波长推进时所遇到的谐振腔镜面损伤和反射率低的难题,可以把自由电子激光的工作波长推向短于 200nm 波段^[2,3].

2 光学速调管

自由电子激光是电子束通过波荡器或光学

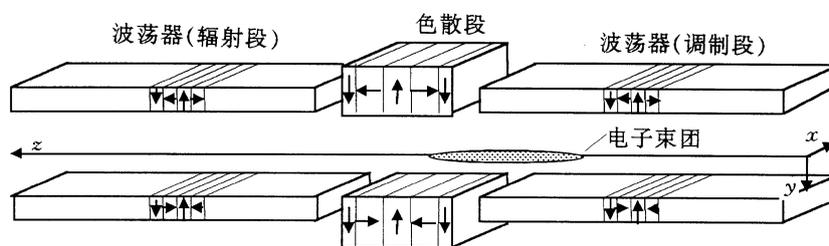


图1 光学速调管结构示意图

速调管时和光场相互作用并把能量转换为光能的装置。波荡器或光学速调管是自由电子激光的主要组成部分。光学速调管比波荡器更适用于储存环自由电子激光,这是因为:一方面,储存环长直线节长度有限,而光学速调管可以在较短的长度上得到较高的总增益;另一方面,光学速调管对电子束流品质要求很高,而储存环可以满足要求。光学速调管由两个波荡器(分别称为调制段和辐射段)中间插入一个色散段组成。波荡器是沿一轴线排列,磁场垂直于轴线,强度在空间上周期变化的一系列二极磁铁,而色散段是一个单周期的强磁场波荡器。图1是光学速调管结构示意图。

当没有光场作用时,电子束通过波荡器或光学速调管所发出的辐射称为自发辐射,由于束团中电子均匀分布,各个电子的自发辐射是不相干的,轴上自发辐射谱由一系列孤立的峰组成,峰的中心波长 λ_n 满足关系式^[4]:

$$\lambda_n = \frac{\lambda_u}{2n^2} \left| 1 + \frac{K^2}{2} \right|, \quad (1)$$

式中 n 为谐波数,平面型波荡器和光学速调管只有基波和奇次谐波, $n = 1, 3, 5, \dots$;波荡器参数 $K = eB_u \lambda_u / 2\pi mc$, λ_u 和 B_u 分别是波荡器的磁周期长度和磁感应强度; e , m 和 r 分别为电子的电荷量、质量和能量因子, c 为光速。

光学速调管自发辐射谱与波荡器自发辐射谱有很大区别,图2表示在一个峰里,的光学速调管自发辐射谱和波荡器自发辐射谱,仅有一个单峰的曲线为波荡器的自发辐射谱。由于两波荡器辐射干涉的结果,在每一个峰里光学速调管自发辐射谱受到了调制,即强度随波长激烈起伏,第 n 次谐波中心波长处极大值与相邻的极小值之差与和的比值定义为该次谐波自发

辐射谱的调制率 f_n 。由于自由电子激光的增益正比于自发辐射谱的微分^[5],这种调制大大提高了增益。在相干谐波自由电子激光中,用相干增强因子来表示增益效果。下面将会看到,相干增强因子正比于自发辐射谱调制率 f_n 的平方,自发辐射谱调制越深,相干谐波辐射越强。

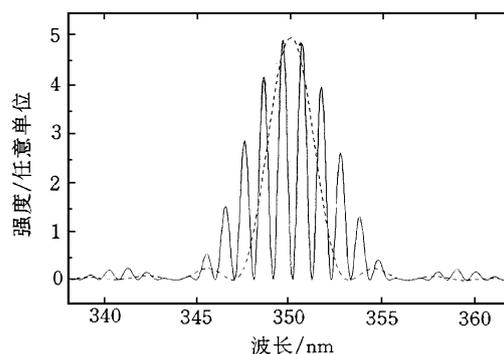


图2 光学速调管和波荡器的自发辐射谱

3 相干谐波辐射的产生

当种子激光和电子束一同通过光学速调

管,且种子激光、电子能量和光学速调管参数满足(1)式条件(即自由电子激光共振条件)时,便会产生相干谐波辐射.图3表示这一过程,它可以分为能量调制、密度调制和相干谐波产生三步,分别发生于光学速调管的三段中.第一步,在调制段里的能量调制:波长等于(1)式中基波波长的种子激光聚焦在调制段的中央,当种子激光和电子束团很好地准直和同步时,原来能量相同的电子便受到能量调制,每个电子能量改变的大小,依赖于它相对于光波的初始相位.

第二步,在色散段里的密度调制:在色散段里,慢电子走的路程长,快电子走的路程短,经过色散段后,能量调制转变为空间密度调制,即电子以种子激光波长为间隔群聚成一系列微束团.第三步,在辐射段里的相干辐射:群聚后的电子由于具有相同或相差 2π 的整数倍相位,在通过第二个波荡器时发出相干辐射.相干辐射同样包含(1)式的基波和谐波,于是就得到辐射段波长的相干谐波辐射.这就是相干谐波储存环自由电子激光的工作原理.

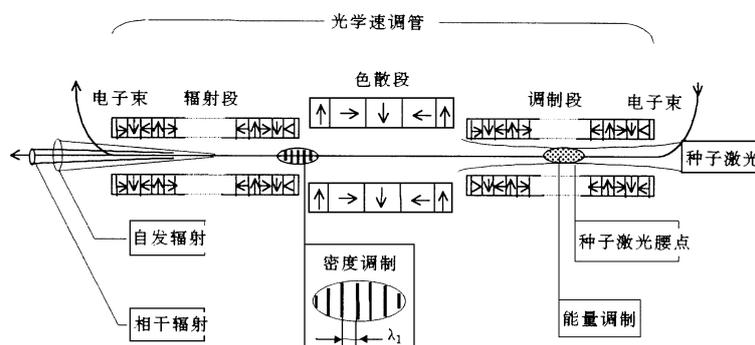


图3 相干谐波产生示意图

相干辐射的强度远远高于自发辐射的强度,用相干增强因子来表示这种相干增强效果,一个束团一次通过光学速调管时,在轴上无限小立体角内,第 n 次谐波中心波长处无限窄带宽内,辐射的相干辐射(有种子激光时)光子数 I_{coh} 与自发辐射(无种子激光时)光子数 I_{incoh} 之比定义为该次谐波的光谱相干增强因子 R_n^{spe} ,即 $R_n^{\text{spe}} = I_{\text{coh}}/I_{\text{incoh}}$.

假设储存环电子束团能量为高斯分布,可以得到^[6,7]

$$R_n^{\text{spe}} = (1/3) N_e f_n^2 J_n^2 [4 \pi \eta (N_u + N_d) \Delta v / v], \quad (2)$$

式中 N_e 是束团中的电子数目, f_n 是第 n 次谐波自发辐射谱的调制因子, J_n 是第 n 阶贝塞尔函数(描述群聚后束团中的谐波成分), N_d 为色散段参数, $\Delta v/v$ 是种子激光引起的电子能量改变率.

由(2)式可见,相干增强因子正比于束团中电子数目 N_e ,而电子数目很大(约 10^{10} 量级),所以,相干增强因子很大,相干辐射强度远远高

于自发辐射强度.(2)式还表明,相干增强因子正比于光学速调管自发辐射谱调制率 f_n ($0 \leq f_n \leq 1$)的平方,自发辐射谱调制越深,相干辐射越强.调制率与电子束能散、发射度、光学速调管磁场精度、电子束与光学速调管轴线的准直等因素有关.提高光学速调管自发辐射谱的调制率对于提高相干增强因子具有十分重要的作用.(2)式中贝塞尔函数 J_n 的参量与色散段参数 N_d 和种子激光引起的电子相对能量改变 $\Delta v/v$ 有关.实验中, N_d 仅随色散段磁场强度改变, $\Delta v/v$ 正比于种子激光场强.色散段磁场强度的大小决定快、慢电子通过色散段的路程差,种子激光场强的大小决定电子能量调制的大小,两者都影响电子的群聚.调节种子激光功率或光学速调管色散段磁极间隙,可以优化所希望的某次相干谐波输出.除强度高外,相干谐波辐射的另一特点是谱峰窄.以中国科学技术大学相干谐波储存环自由电子激光装置为例,数字模拟得到,其三次谐波相干增强因子可达 10^5 ,三次相干谐波辐射谱峰的半高宽为

0.01 nm.

4 现状及展望

1984年,法国 LURE 实验室在 ACO 储存环上进行了第一个相干谐波储存环自由电子激光实验,观察到了 Nd-YAG 激光的 3 次相干谐波辐射.1987 年和 1991 年,他们又先后在 ACO 和 Super-ACO 储存环上观察到了 Nd-YAG 二倍频激光的 3 次和 5 次相干谐波辐射.之后,瑞典 MAX 实验室也在 MAX-1 储存环上成功地得到了 Nd-YAG 激光的 3 次相干谐波辐射.目前,日本 ETL 实验室正在 NIJI-4 储存环上进行相干谐波储存环自由电子激光实验,希望得到 Nd-YAG 激光的 3 次、5 次和 7 次相干谐波辐射.在中国科学技术大学的 800 MeV 储存环上,也正在进行相干谐波储存环自由电子激光实验,希望得到 Nd-YAG 激光的 3 次相干谐波辐射.目前,中国科学技术大学的自发辐射谱调制率已经达到 0.80,即将开始进行相干谐波辐射实验.

实验已经证明相干谐波产生原理的正确性,使科学界受到很大鼓舞.但相干谐波储存环自由电子激光还面临着一些困难,相干辐射强度还没有达到用户所要求的那么高.主要困难是:束流不稳定性,种子激光与电子束的准直和同步以及种子激光的调谐问题尚未解决.各个储存环的束流不稳定性有所不同,需要进行具体的研究,加以解决,而同步和调谐问题有可能通过使用同一个储存环上的振荡器自由电子激光作为种子激光而得到解决,因为它既是可调谐的又是自动和电子束准直和同步的.

相干谐波自由电子激光首先是以储存环作为驱动器而发展起来的,即储存环自由电子激

光.但随着光阴极微波电子枪的发展和直线加速器技术水平的提高,目前,世界上已开始研究直线加速器驱动的高增益相干谐波自由电子激光.美国布鲁克海文国家实验室计划建造 1 台高增益相干谐波自由电子激光装置,以 1 台 300 MeV 电子直线加速器作为驱动器,光学速调管的第二个波荡器(辐射段)设计成与 3 次谐波共振,且后半部分磁场锥化,以提高增益.其设计指标是:波长 75—300 nm 可调,脉冲长度 150 fs - 6 ps 可调,最高重复频率 360 Hz,单个脉冲能量大于 1 mJ.国内一些科学家也希望利用即将建造的上海第三代同步辐射光源的 300 MeV 预注入器直线加速器作为驱动器,建造 1 台深紫外波段的高增益相干谐波自由电子激光装置.

短波长、可调谐、短脉冲、高亮度的相干光源对化学动力学、生命科学以及其他许多科学和技术的巨大吸引力,将推动相干谐波自由电子激光研究不断向前发展.

参 考 文 献

- [1] Lacalar J L. ESRF News Letter, 1996(25):6—7
- [2] Sessler A M. Proc. of CERN Accelerator School on Synchrotron Radiation and Free Electron Lasers, Geneva: Cern, 1990, 373—389
- [3] Ortega J M. Proc. of CERN Accelerator School on Synchrotron Radiation and Free Electron Lasers, Geneva: Cern, 1990, 287—303
- [4] Krinsky S. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1983, NS-30:3078—3082
- [5] Madey J M. Nuovo Cimento, 1979, 50B:64—88
- [6] Prazeres R, Ortega J M, Bazin C *et al.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1988, A272: 68—72
- [7] Prazeres R, Guyot-Sionnest P, Ortega J M *et al.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1991, A304:72—76