

束团序列发射的相干同步辐射 强度数值计算*

朱俊彪 张国庆 李永贵 谢家麟

(中国科学院高能物理研究所 北京 100080)

摘要 提出一个新颖的射频电子束团序列在偏转或者摇摆磁场中发射的相干同步辐射相干迭加导致辐射增强的理论模型,并基此分析和计算了利用 BFEL 装置的 30MeV 射频直线加速器产生的电子束团序列发射的相干辐射增强效应. 由讨论可知,不同的束团产生的相干同步辐射之间存在相干性源于束团间的相干性;这种束团间的相干性引起的辐射增强迭加在单个束团产生的相干辐射功率谱上;随着波长的增长,这种辐射增强呈现规则的高速振荡效应;束团间相干性引起的强度增强近似约为宏脉冲内所含束团数的平方. 最后提出利用所设计的毫米波 Michelson 干涉仪检测 BFEL 装置的电子束团序列的相干性的实验设想.

关键词 电子束团序列 相干同步辐射 束团内干涉 束团间干涉 毫米波 Michelson 干涉仪

1 引言

相干同步辐射(CSR)的研究对研制新相干光源如宽带的(通过弯铁磁场)和窄带的(通过摇摆磁场)强相干远红外-毫米波光源意义重大. 相对论性电子束团序列通过偏转磁场或摇摆磁场,发射的 CSR 特性与其束团形状、长度、电子数有关. 当辐射波长长于束团长度或与之可比时,束团发射相干同步辐射(CSR);CSR 功率与束流强度的平方成正比,近似为非相干辐射的束团电子数倍. Nakazato 与其同事们 1989 年首次观测到射频直线加速器电子束团通过偏转磁场发射强远红外-毫米波 CSR,使用光栅光谱仪测得束团序列中单束团产生的 CSR 谱.

电子束团序列产生的 CSR 还与束团间的关联程度有关. Wingham 曾在理论上讨论过远红外区电子同步辐射装置束团序列中相继束团产生的 CSR 之间存在干涉现象^[1]. Shibata 和 Ciocci 分别使用偏振干涉仪和法布里-珀罗干涉仪测量偏转磁场和摇摆磁场中产生的毫米波 CSR 谱证实了束团间存在相关性^[2,3]. Young UK·Jeong 实验表明,超短束团

2000-04-21 收稿

* 国家自然科学基金(19875066),高能所所长基金,国家高技术-激光技术领域资助

之间的相干性使波导 FEL 谐振腔中产生传输的 CSR 谐波得以极大地增强^[4]. 丁武^[5]与 Doria^[6]的理论研究都阐明了电子束团间的相关性对相干辐射增强的重要影响. 不仅如此, CSR 的研究对研制未来直线对撞机和自放大自发辐射 X 射线自由电子激光 (SASE-XFEL) 也具有重要意义. 研制后两种装置需要更强更短束团, 而这种束团的获得和传输必须使用束团压缩和偏转装置. 解析计算和数值模拟都表明, CSR 效应在这种系统中导致能散和发射度严重增长^[7,8]. Wiedemann 等利用其 SUNSHINE 装置的热阴极微波电子枪和磁束团压缩系统产生了 100fs 超短电子束团, 并利用研制的远红外 Michelson 干涉仪, 通过测量相干渡越辐射的干涉图成功地测量该电子束团的长度.

北京自由电子激光 (BFEL) 装置^[9,10]由热阴极微波枪、磁束团压缩系统、30MeV RF-linac、波荡器和光腔构成, 其束团电子束是潜在的远红外-毫米波相干电磁辐射源^[11]. 该束团序列呈双脉冲时间结构, 脉宽约 4 μ s, 周期约 333ms 的宏脉冲由一系列脉宽 4ps, 周期约 350ps 的微脉冲构成. 本文首先简要讨论单束团内束团电子之间的相关性引起的 CSR 增强, 然后首次提出一个束团序列中相继束团之间的相关性引起的 CSR 增强的新颖而简单的模型, 基于数值计算了 BFEL 装置射频直线加速器提供的微束团序列产生的 CSR 强度谱, 分析比较了束团序列和单束团 CSR 强度谱特性. 最后提出观测该束团序列在偏转磁场中产生的 CSR 强度谱的实验设计.

2 单束团 CSR 强度

本节讨论单束团内电子相关引起的辐射增强. 当束团内任何电子与束团中心至观测点的光程差小于等于半波长时, 或束团尺寸与束团至观测点的距离相比可忽略时, 偏转磁场中沿圆形轨道运动的束团长度为 σ_L 的相对论性电子束团沿其轨道切向发射的波长为 λ 的 CSR 强度是:

$$P_{\text{CSR}}(\lambda, \sigma_L) \approx P_{\text{ISR}}(\lambda)[1 + (N_e - 1)f(\lambda, \sigma_L)], \quad (1)$$

$$f(\lambda, \sigma_L) = \left| \int dz S(z) \exp(i2\pi z/\lambda) \right|^2, \quad (2)$$

归一化束团形状因子 $f(\lambda, \sigma_L)$ 是束团电子密度分布函数 $S(z)$ 的付氏变换. $P_{\text{ISR}}(\lambda)$ ($= N_e P_e(\lambda)$) 是单束团内 N_e 个电子发射的非相干 SR (ISR) 强度, $P_e(\lambda)$ 是单电子发射的 SR 强度. 由(1)和(2)式可见: 1. 当辐射波长近似或者长于束团长度时, CSR 强度与束流强度的平方 (N_e^2) 成正比, 而 ISR 强度与束流强度 (N_e) 成正比; 2. 测量归一化的 CSR 强度和 ISR 强度比与辐射波长或者频率的关系即得束团形状因子 $f(\lambda, \sigma_L)$, 继而借助 Fourier 变换即可推得微束团电子分布. 设所测高斯型束团形状因子 $f(\lambda, \sigma_L) = \exp[-(2\pi\sigma_L/\lambda)^2]$, 可求得等效束团长度为 $\sqrt{2\pi}\sigma_L$ 的纵向电子密度分布 $S(z)$ 为高斯型分布:

$$S(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_L} \exp[-(z^2/2\sigma_L^2)], \quad (3)$$

而其对矩形束团的形状因子 $f(\lambda, \sigma_L)$ 形如: $f(\lambda, \sigma_L) = [\sin(2\pi\sigma_L/\lambda)/(2\pi\sigma_L/\lambda)]$, 求得等效束团长度是 $2\sigma_L$ 的纵向电子密度分布 $S(z)$ 为矩形分布:

$$S(z) = \begin{cases} 1/2\sigma, & \text{for } |z| \leq \sigma_L, \\ 0, & \text{for others,} \end{cases} \quad (4)$$

ISR 强度 P_{ISR} 由 Schwinger 方程给出

$$P_{\text{ISR}}(\lambda) = \frac{3^{5/2} ec\gamma^7}{160\pi^2 \rho^2} Iy^3 \left[\int_y^\infty K_{5/3}(\eta) d\eta \right],$$

式中, $y = \lambda_c/\lambda$, $K_{5/3}(\eta)$ 是分数阶变型 Bessel 函数, $P_{\text{ISR}}(\lambda)$ 单位是 $\text{W}/\text{mm} \cdot \text{mrad}\theta$. 方括号中的项称为普适函数. 设 ν 为 Bessel 函数的分数阶次, 利用无穷级数展开如下:

$$\int_y^\infty K_\nu(\eta) d\eta = h \left\{ \frac{e^{-y}}{2} + \sum_{m=1}^\infty e^{-y \cosh(mh)} \frac{\cosh(\nu mh)}{\cosh(mh)} \right\}, \quad (6)$$

利用上式公式和 BFEL 束参数, 数值计算高斯、矩形束团产生的 CSR 功率与辐射波长和束团长度的关系如图 1 所示. 由图可见: 1) $\lambda \geq \sqrt{2\pi}\sigma_L$, CSR 功率急剧增长为最大值; $\lambda \leq \sqrt{2\pi}\sigma_L$, 增强效应消失; 2) CSR 功率近似 ISR 功率的束团电子数倍; 3) 短束团比长束团 CSR 强度增长更剧烈; 4) 功率最大值随束团长度减小向短波端突伸入远红外区, 即压缩束团长度有利于增强远红外 CSR 功率; 5) 对比文献[9]压缩束团比增强束流更有利于增强远红外 CSR; 由于 sinc 函数的振荡特性, 矩形束团在辐射波长短于束团长度时强度起伏很大, 数值计算范围从临界波长 $3.1\mu\text{m}$ 至 20mm .

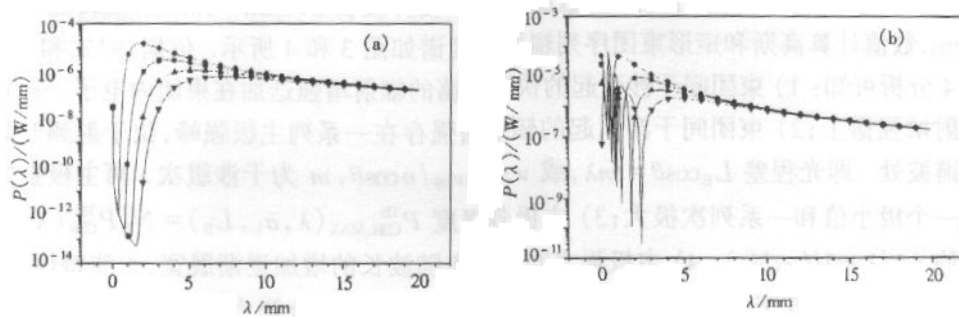


图 1 皮秒电子束团产生的 CSR 功率与辐射波长和束团长度的关系
 (a) 中曲线自上而下分别对应束流 $3.1\mu\text{A}$ 束团长度 $1, 2, 3, 4\text{ps}$ 的高斯束团;
 (b) 中曲线自上而下分别对应束流 $3.1\mu\text{A}$ 束团长度 $1, 2, 3, 4\text{ps}$ 的矩形束团.

3 束团序列 CSR 强度

讨论在偏转磁场中束团序列中相继束团干涉引起的 CSR 增强模型如图 2 所示. 长度为 σ_L 、束团间距为 L_B 的 N_B 个电子束团相继被注入弯铁或者摇摆磁铁. 束团电子在磁场作用下沿运动轨道切线发射同步辐射. 类比一个正向外发射辐射的多缝阵列, 每相邻两缝(两束团)发射的辐射具有固定的光程差. BFEL RF-Linac 电子束团的重复率 2856MHz , 束团周期为 350ps . 设在整个宏脉冲期间, 电子束团的重复频率在其发射的 CSR 的最短辐射的半波长内稳定时, 则整个宏脉冲内所有的束团间导至其发射的光脉冲

间)存在固定的相位关系,从而束团序列在观测点 P 产生的总辐射强度为单束团和束团间的干涉对辐射场的贡献的乘积. 观测点总场强为

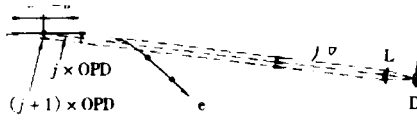


图 2 射频电子束团序列中束团间相干辐射增强模型示意图

$$E_{\text{CSR}}^{\text{TB}}(\lambda) = \left[\sum_{n=1}^{N_B} \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} x_{jn}\right) \right] \frac{1 - e^{-iN_B \zeta}}{1 - e^{-i\zeta}}, \quad (7)$$

式中 N_B 为束团序列中束团数, ζ 为束团序列中第 j 个束团和第 $j + 1$ 个束团相对于观测点的相

位差

$$\zeta(\lambda, L_B, \theta) = \frac{2\pi}{\lambda} n L_B \cos\theta = 2\pi \frac{\nu}{\nu_{\text{RF}}} n \cos\theta, \quad (8)$$

式中 ν_{RF} 为射频基频, ν 为辐射频率. 所以束团序列产生的总 CSR 功率为

$$P_{\text{CSR}}^{\text{TB}}(\lambda, \sigma_L, L_B) \approx P_{\text{CSR}}^{\text{IS}}(\lambda, \sigma_L, L_B) \left[\frac{\sin(n \cos\theta N_B \pi L_B / \lambda)}{\sin(n \cos\theta \pi L_B / \lambda)} \right]^2, \quad (9)$$

式中 $P_{\text{CSR}}^{\text{IS}}(\lambda, \sigma_L, L_B)$ 是单束团发射的 CSR 功率. 由(9)式可见,束团序列的总 CSR 强度等于单束团强度因子和束团间干涉因子的乘积,换言之,束团序列发射的辐射强度分布是束团间干涉的强度分布受单束团辐射强度分布调制的结果. 干涉因子呈快速振荡特性. 依据 BFEL 装置微束团及偏转磁铁参数,典型地取束能 30MeV,压缩的束团宽度 1ps,平均束流强度 $3.1\mu\text{A}$,接收角 100mrd,数据范围取临界波长 $3.1\mu\text{m} - 10\text{mm}$,偏转磁铁半径 150mm,数值计算高斯和矩形束团序列辐射强度谱如图 3 和 4 所示. 依据(9)式和从图 3 和图 4 分析可知: 1) 束团间干涉引起的快速振荡的辐射增强迭加在束团内电子干涉导致的辐射增强谱上; 2) 束团间干涉引起的辐射增强存在一系列主极强峰,位于射频基频的高次谐波处. 即光程差 $L_B \cos\theta = m\lambda$, 或 $\nu = m\nu_{\text{RF}}/n \cos\theta$, m 为干涉级次. 两主极强之间存在一个极小值和一系列次极大; 3) 主极强强度 $P_{\text{CSR,MAX}}^{\text{TB}}(\lambda, \sigma_L, L_B) = N_B^2 P_{\text{CSR}}^{\text{IS}}(\lambda, \sigma_L)$. 脉宽约 $\Delta\lambda/\lambda \approx 1/(mN_B)$. 4) 主极强之间的距离随波长的增加逐渐展宽,干涉特性增强. 5) 轴上辐射频率低于偏轴辐射频率. 6) 仅当测量仪器的分辨力高于射频基频 ν_{RF} ($= 2856\text{MHz}$),束团间干涉效应可测,反之,干涉效应消失. 图 3 和 4 中下面两条曲线是用于对照的 ISR 功率曲线.

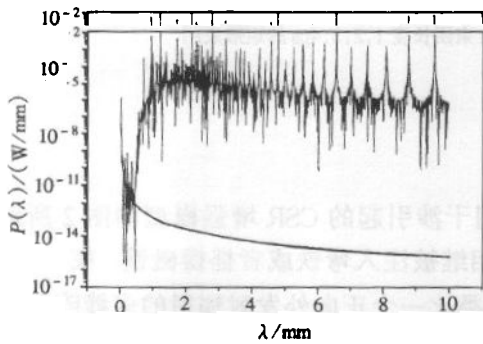


图 3 高斯束团序列产生的 CSR 强度与辐射波长的关系

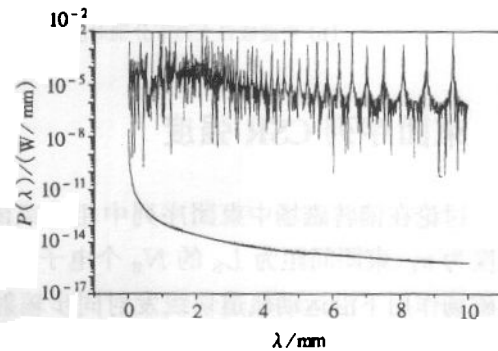


图 4 矩形束团序列产生的 CSR 强度与辐射波长的关系

必须说明的是,束团序列发射的 CSR 功率正比于参与相干的束团数 N_B 的平方. 可以预期,在偏转磁场中,依赖于偏转磁铁的大小和接收倾角,束团序列中参与相干的束团数有限,因而束团序列发射的 CSR 功率约有一个数量级的增强;而在摇摆器磁场中,由于束团序列的共线辐射和腔反馈,参与相干的束团数急剧增长,因而 CSR 功率可望有 3、4 个数量级的增长.

4 相继束团之间相干性测量设计

设计用以测量 BFEL 装置射频电子束团序列中束团间相干性的实验示意图如图 5 所示. 30MeV RF-Linac 产生的相对论性电子束团序列注入 45° 偏转磁铁产生 CSR,弯铁内真空室隙距 19mm,电子束规道半径 150mm. 相干同步辐射沿规道切线射出,特征波长 $\lambda_c \approx 3.104 \times 10^{-6}$ m. 在距发射点约 400mm 处,使用一偏轴抛物面镜收集约 100mrad 内产生的辐射. 辐射经抛物面镜变成平行辐射又经低传输损耗的紫铜波导管引至实验室进行测量. 束团间的相干性测量使用设计的亚毫米波-毫米波偏振型 Michelson 干涉仪. 实验分两步进行:1 单束团产生的 CSR 辐射谱测量;2 束团序列产生的 CSR 辐射谱测量.

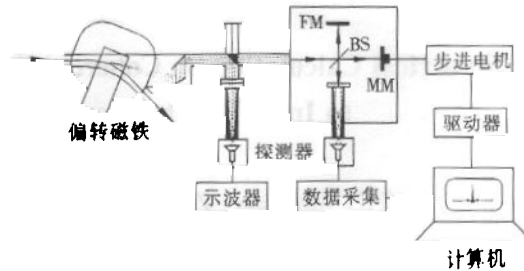


图5 利用毫米波迈克尔逊干涉仪测量束团序列中束团间相干性实验示意图

5 结论

首次提出一个计算射频电子束团序列在偏转或者摇摆磁场中发射 CSR 由于束团间的相关性导致辐射增强的理论模型. 基此分析和计算了利用 BFEL 装置的 30MeV 射频直线加速器提供的皮秒电子束团序列中单束团电子相干性引起的辐射增强和相继束团间的相干性引起的辐射增强对总 CSR 辐射场的贡献. 给出利用研制的毫米波偏振迈克尔逊干涉仪测量束团序列中束团间相干特性的实验设计.

参考文献 (References)

- 1 Wingham D J. Phys. Rev. ,1987, **D35**(8):2584—2594
- 2 Shibata Y, Takahashi T, Ishi K et al. Phys. Rev. ,1991, **A44**(6):R3445—R3448; Giovenale MINA, 1995, **F358**: 78—81
- 3 Ciccio F, Bartolini R, Doria A et al. Phys. Rev. Lett. ,1993, **70**(7):928—931
- 4 Yong Uk Jeong, Kawamura Y, Toyoda K et al. Phys. Rev. Lett. ,1992, **68**(8):1140—1143
- 5 DING Wu. High Power Laser and Particle Beams, 1994, **8**(2):193(in Chinese)
(丁武. 强激光与粒子束, 1996, **8**(2):193)
- 6 Doria A, Gallerano G P, Giovenale E. Phys. Rev. Lett. ,1998, **80**(13):2841—2844

- 7 Saldin E, Schneidmiller E, Yurkov M. DESY Report No. TELS-FEL 96—14
- 8 Braun H, Chautard F, Corsini R. Phys. Rev. Lett., 2000, **84**(4):658—661
- 9 XIE Jia-Lin, ZHUANG Jie-Jia, HUANG Yong-Zhang. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1994, **18**(6):572 (in Chinese)
(谢家麟, 庄杰佳, 黄永章等. 高能物理与核物理, 1994, **18**(6):572)
- 10 XIE Jia-Lin, ZHUANG Jie-Jia, HUANG Yong-Zhang. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1994, **18**(8):763 (in Chinese)
(谢家麟, 庄杰佳, 黄永章等. 高能物理与核物理, 1994, **18**(8):763)
- 11 ZHU Jun-Biao, LI Yong-Gui, XIE Jia-Lin. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2000, **24**(2):172 (in Chinese)
(朱俊彪, 李永贵, 谢家麟. 高能物理与核物理, 2000, **24**(2):172)

Numerical Calculation on Coherent Synchrotron Radiation Intensity Due to Inter-Bunch Interference in the Bunch Train *

ZHU Jun-Biao ZHANG Guo-Qing LI Yong-Gui XIE Jia-Lin
(*Institute of High Energy Physics, CAS Beijing 100080 China*)

Abstract A novel model for the inter-bunch interference in a bunch train is presented where a train of electron bunches passing through a bending or undulator magnetic field is considered as a moving multi-slit diffraction array from which multi beams of coherent radiation emitted with definite phase difference. Based on this model, interference among multi-beams of coherent synchrotron radiation emitted from consecutive bunches accelerated by a 30 McV RF-Linac at BFEL is analyzed and numerically calculated. From the discussions it is shown that: 1. Rapidly oscillating radiation enhancement due to inter-bunch interference is overlapped on the single bunch power spectrum; 2. Such radiation enhancement consists of series of spectrum lines corresponding to harmonics of the fundamental of RF-Linac; 3. Main maximum positions are determined by the “diffraction condition”; 4. Intensity enhancement is about as high as the number of bunches in a macropulse; 5. The axially measured radiation frequency is lower than the offaxis one. Experimental design to measure interference from separate bunches at the BFEL Linac with the developed mm-wave Michelson interferometer is presented.

Key words bunch train coherent synchrotron radiation, intra-bunch interference, inter-bunch interference, sub- to mm-wave Michelson interferometer

Received 21 April 2000

* Supported by National Nature Science Foundation of China(19875066), Director Foundation of Institute of High Energy Physics, and Nation High Technology-Laser Technology Field Program