

文章编号: 0258-7025(2009)09-2300-05

基于超腔技术的高亮度激光同步辐射分析

孟现柱 任忠民 王明红

(聊城大学物理科学与信息工程学院, 山东 聊城 252059)

摘要 提出了一种超腔的新技术方案,利用康普顿散射理论计算了基于超腔技术的激光同步辐射(LSS)波长以及单个电子的光子产额和辐射功率,讨论了电子束品质和激光功率损耗对激光同步辐射的总光子产额和总辐射功率的影响。结果发现,利用 3.5 GeV 电子束和远红外激光进行康普顿垂直散射可以获得能量 10.975 MeV 的 γ 射线,单个电子产生的光子产额与激光功率和入射波长成正比,与光束的截面积成反比。单个电子的辐射功率与激光功率和 Lorentz 因子的平方成正比,与光束的截面积成反比。

关键词 激光技术; 激光同步辐射; 康普顿散射; 光子产额; 辐射功率

中图分类号 O571.41⁺8 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093609.2300

Analysis of High Brightness Laser Synchrotron Source Based on Super Cavity Technique

Meng Xianzhu Ren Zhongmin Wang Minghong

(School of Physics Science & Information Technology, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252059, China)

Abstract The novel technical scheme of super cavity is proposed. Using Compton scattering theory, the high brightness laser synchrotron source (LSS) based on the technique of super cavity, including radiation wavelengths, photon yield and radiant power, are calculated and discussed. The effects of the electron beam quality and the laser power loss on the photon yield and radiant power of laser synchrotron source are discussed. The results show that the γ -ray with energy up to 10.975 MeV are expected to be produced by Compton vertical scattering of far-field infrared laser photons on the 3.5 GeV electrons bunches, the photon yield of a single electron are direct proportion to the power and wavelength of laser, and inverse proportion to the sectional area of laser beam. The radiant power of a single electron is direct proportion to the power of laser and square of Lorentz factor, and inverse proportion to the sectional area of laser beam.

Key words laser technique; laser synchrotron source; Compton scattering; photon yield; radiant power

1 引言

利用强激光与相对论电子束的逆康普顿散射,产生准单色、能量可调的高亮度光脉冲的新型光源叫激光同步辐射源(LSS)。1963年, Milburn 首次提出了利用激光与电子束发生逆康普顿散射产生高能光子的设想^[1,2]。同年 Fiocco 等利用 800 μs 长脉冲红宝石激光与低能电子束碰撞,在实验中首次观察到相对 693.4 nm 激光有 25.9 nm 频率上移的散射光子,但光子产额极低。1965年, Milburn 等合

作,利用 30 ns 和 0.2 J/pulse 的调 Q 红宝石激光与能量 6 GeV,流强 2 mA 的电子束碰撞,测得了 425 MeV 的 γ 光子,产额为 8 photons/pulse。到 20 世纪 90 年代,产生超快 X 射线脉冲的激光同步辐射源实验装置得以实现^[3],同时逐步建立了一系列较完善的 LSS 理论^[4~7]。由于 LSS 需要的电子能量比同步辐射装置低两个数量级以上,因此在材料科学、生物、医学以及工业应用等许多领域有广阔的应用前景。

收稿日期: 2008-10-27; 收到修改稿日期: 2009-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(60871047)和聊城大学科研基金(X061019)资助课题。

作者简介: 孟现柱(1968—),男,副教授,硕士,主要从事自由电子激光和激光同步辐射方面的研究。

E-mail: mengxz12@yahoo.com.cn

本文对基于超腔技术的高亮度激光同步辐射进行了研究,提出了一种超腔的新技术方案,利用康普顿散射理论计算了基于超腔技术的激光同步辐射的波长以及单个电子的光子产额和辐射功率,讨论了电子束品质和激光功率损耗对激光同步辐射的总光子产额和总辐射功率的影响。

2 实 验

目前,虽然 LSS 可以产生很高的峰值通量,但其平均通量普遍很低,为了解决这一问题,Fujita 等^[8]提出了利用 CW 激光和超腔技术来提高 LSS 亮度的方案。所谓超腔,实际上是一种高精度的 Fabry-Perot(F-P)干涉仪,由于它装有反射率可达 99.99%的腔镜,因此可以将注入 F-P 干涉仪的 CW 激光存储于腔内。基于超腔技术的 LSS 实验设计方案如图 1 所示。从射频直线加速器注入的电子束存储于储存环内,CW 激光存储于超腔内,这样就能实现强流电子束与存储于超腔内的高功率激光多次碰撞,从而获得很高平均通量的 LSS 辐射。理论计算表明,如果电子束平均流强为 1 A,则在 10 W 激光注入超腔的情况下,LSS 可以输出平均通量 10^{13} photons/s 的高能光子射线^[9]。

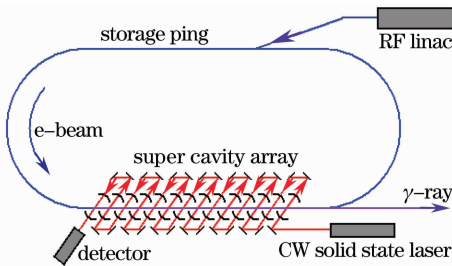


图 1 基于超腔技术的高亮度 LSS 的原理

Fig. 1 Principle of high brightness LSS based on the technique of super cavity

需要指出的是 Fujita 提出的超腔阵虽然能够提高 LSS 辐射的平均通量,但是结构复杂,调节困难。例如,要将 LSS 辐射的平均通量提高 3 个数量级,必须实现高功率激光与超腔内的强流电子束至少碰撞 10^3 次以上,这样图 1 中腔镜就会多达 2×10^3 个以上,从而造成腔镜的调节非常困难。同时由于多次反射损失,最后一次反射的光强也只有入射光强的 81.87%,这样,高功率激光与超腔内的强流电子束的碰撞要远多于 2×10^3 次。为了解决这个问题,对基于超腔技术的 LSS 实验设计方案按图 2 所示进行了改造设计。改造的超腔只有两面相互平行的高反射率平面镜构成,CW 激光以很小的入射角入

射平面镜,如果平面镜反射率足够高(例如,反射率为 99.99%),经过计算,如果将 LSS 辐射的平均通量提高 3 个数量级,高功率激光与超腔内的强流电子束碰撞只有 10^3 次,则最后一次反射的光强可以达到入射光强的 90.48%,远高于 81.87%。

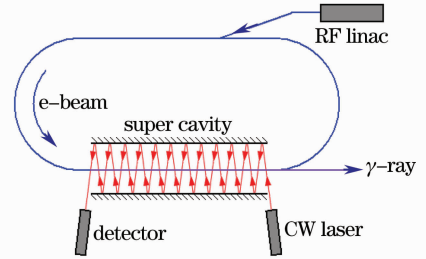


图 2 基于新型超腔技术的高亮度 LSS 实验的示意图
Fig. 2 Schematic diagram of high brightness LSS based on the novel technical scheme of super cavity

无论 Fujita 提出的超腔阵,还是改进的超腔,要实现高亮度的 LSS 辐射,都必须保证在各个碰撞点产生的 LSS 辐射相干叠加。这就要满足两个条件:1)在相邻碰撞点产生的 LSS 辐射相位差是 2π 的整数倍;2)相邻碰撞点的光程差是 λ_2 的整数倍。对于改进的超腔,设平面镜间距为 l ,激光束对平面镜的入射角为 $(\delta/2)$,要满足条件 1),则

$$l \sec(\delta/2) = n_1 \lambda_1, \quad (1)$$

要满足条件 2),则

$$l \tan(\delta/2) = n_2 \lambda_2, \quad (2)$$

由(1),(2)式得激光束对平面镜的入射角

$$\sin \frac{\delta}{2} = \frac{n_2}{n_1} \frac{1}{2\gamma^2}. \quad (3)$$

由(3)式可见,由于 γ 的限制,激光束对平面镜的入射角非常小,近似为 0,所以在超腔中激光与电子束近似是以 90° 角碰撞的。

3 辐射波长

在 LSS 中,当波长为 λ_1 的入射激光与速度为 v 的电子散射时,精确的辐射波长^[10~12]

$$\lambda_2 = \lambda_1 \frac{1 - \beta \cos \theta_2}{1 - \beta \cos \theta_1} + \lambda_e \frac{1}{\gamma(1 - \beta \cos \theta_1)} \times (1 - \cos \varphi), \quad (4)$$

其中 $\beta = v/c$ 为相对速度, $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$ 为 Lorentz 因子, θ_1 为入射激光的动量 P_{λ_1} 与 v 的夹角, θ_2 为 LSS 辐射的动量 P_{λ_2} 与 v 的夹角, φ 为 P_{λ_1} 与 P_{λ_2} 的夹角, $\lambda_e = h/m_0c = 2.4263 \times 10^{-12}$ m 为电子的康普顿波长, h 为 Planck 常数。考虑 $\lambda_1 \gg \lambda_e$,忽略 λ_e 项,对于高能粒子,考虑 $\theta_2 \approx 1/\gamma \approx 0$,则(4)式可改

写为

$$\lambda_2 = \lambda_1 \frac{1 - \beta}{1 - \beta \cos \theta_1}. \quad (5)$$

在 LSS 中,激光与电子束的碰撞方式通常有对撞 ($\theta_1 = \pi$) 和 90° 角碰撞 ($\theta_1 = \pi/2$) 两种方式。在超腔中激光与电子束以 90° 角碰撞, $\theta_1 = \pi/2$, 考虑 $\beta \rightarrow 1$, $1 - \beta \approx 1/2\gamma^2$, 由(5)式得激光与电子束在 90° 角碰撞时辐射的波长

$$\lambda_2 \approx \frac{\lambda_1}{2\gamma^2}. \quad (6)$$

2009 年计划建成的上海激光电子 γ 源 (SLEGS) 是利用上海同步辐射装置 (SSRF) 储存环中 3.5 GeV 电子束和远红外激光进行康普顿散射获得准单色、高强度和高极化度的 γ 源^[13]。根据 SSRF 的主要设计参数和 CO₂ 激光器的参数为例计算激光与电子束在 90° 角碰撞时的 SLEGS 辐射波长和能量。表 1 给出了激光与电子束在 90° 角碰撞时的 SLEGS 辐射波长和能量。

表 1 SLEGS 的辐射波长和能量

Table 1 Radiation wavelengths and radiation energy of SLEGS

Laser type	Laser (average power output is 100~1000 W)		Main parameters of γ -ray
	$\lambda_1/\mu\text{m}$	$\lambda_2/10^{-7}\mu\text{m}$	
CO ₂ laser			Energy / MeV
	10.6	1.129	10.975
	65.1	6.938	1.787
	100	10.658	1.163
	220	23.448	0.528

可见,利用 SSRF 储存环中 3.5 GeV 电子束和远红外激光进行 90° 角康普顿散射可以获得能量范围在 0.528~10.975 MeV 的 γ 射线束。并且散射到 $\theta_2 = 0$ 的特定方向上的 γ 射线是单色的。考虑实际实验装置,光学系统和探测器都有一定的接收角,根据(4)式,探测到的 LSS 光子应有一定的能量分布,但由于相对论效应, γ 射线的方向被强烈地集中在 $\theta_2 \approx 1/\gamma$ 的发散角内^[14],这种接收角引起的带宽很小,可以认为 LSS 辐射是准单色的。

4 光子产额和辐射功率

4.1 光子数密度与激光功率的关系

设每个激光束内的光子数密度为 n_L ,光束的截面积为 S 。则 dt 时间内通过垂直于激光传播方向的截面上的光子个数为 $n_L S c dt$,如果激光的波长为 λ_1 ,则 dt 时间内通过垂直于激光传播方向截面上的

激光束能量为 $n_L (hc/\lambda_1) S c dt$,激光束的功率 $P_L = n_L (hc/\lambda_1) S c dt/dt = n_L (hc/\lambda_1) S c$,所以

$$n_L = \frac{P_L \lambda_1}{hc^2 S}. \quad (7)$$

4.2 单个电子的光子产额

设电子的散射截面为 σ ,图 3 给出了激光束中的光子和单个电子在 θ_1 角碰撞时的散射示意图, t 时刻,电子处于位置 A 处,该时刻与电子碰撞的光子是紧贴电子表面的光子; $t + dt$ 时刻,电子运动到位置 B 处,该时刻与电子碰撞的光子是原来处于位置 C 处的光子,因此 dt 时间内,与电子发生散射的光子一定处于由位置 A 和位置 C 构成的斜柱体内,该斜柱体的体积为 $\sigma[v - c(\cos \theta_1)]dt = \sigma(\beta - \cos \theta_1)cdt$,考虑激光的光子数密度为 n_L ,则该斜柱体内光子数为 $dN = n_L \sigma(\beta - \cos \theta_1)cdt$,因此单位时间内单个电子产生的光子产额

$$dN_2/dt = n_L \sigma(\beta - \cos \theta_1)c, \quad (8)$$

超腔中激光与电子束以 90° 角碰撞, $\theta_1 = \pi/2$,则单个电子产生的光子产额

$$dN_2/dt = n_L \sigma v, \quad (9)$$

由(7)式,(9)式消去 n_L ,得

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{P_L \lambda_1}{hc^2 S} \sigma v, \quad (10)$$

其中 $\frac{\sigma}{hc^2}v \approx \frac{\sigma}{hc}$,数量级约为 10^{-4} ,根据(10)式,当激光束半径在毫米数量级, $\lambda_1 = 10.6 \mu\text{m}$, $P_L = 100 \text{ W}$ 时,单个电子的光子产额数量级为 10^{-1} ; $\lambda_1 = 220 \mu\text{m}$, $P_L = 1000 \text{ W}$ 时,单个电子的光子产额数量级为 10。可见,单个电子的光子产额与激光功率、入射波长成正比,与激光束的截面积成反比。

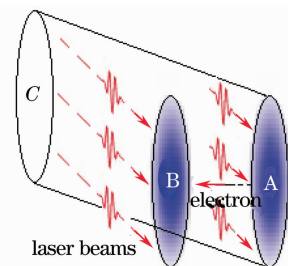


图 3 光子和电子在以 θ_1 角碰撞时的散射示意图
Fig. 3 Schematic diagram of photon-electron scattering with the collision angle of θ_1

4.3 单个电子的辐射功率

激光束和单个电子以 θ_1 角碰撞时的辐射波长为 λ_2 ,因此 dt 时间内,散射光子的总能量

$$dE_2 = \frac{hc}{\lambda_2} n_L \sigma (\beta - \cos \theta_1) c dt, \quad (11)$$

由(11)式对时间求导,得激光与电子束以 θ_1 角碰撞方式散射时的辐射功率

$$P_2 = \frac{hc^2}{\lambda_2} n_L \sigma (\beta - \cos \theta_1), \quad (12)$$

由(5)式,(12)式消去 λ_2 ,得和 θ_1 对应的单个电子的辐射功率

$$P_2 = \frac{hc^2(1 - \beta \cos \theta_1)}{\lambda_1(1 - \beta)} n_L \sigma (\beta - \cos \theta_1), \quad (13)$$

超腔中激光与电子束以 90° 角碰撞, $\theta_1 = \pi/2$,考虑 $\beta \rightarrow 1$, $\frac{1}{1 - \beta} \approx 2\gamma^2$,则单个电子的辐射功率

$$P_2 = \frac{2\gamma^2 hc^2 n_L \sigma}{\lambda_1}, \quad (14)$$

由(7)式,(14)式消去 n_L ,得

$$P_2 = \frac{2\gamma^2 P_L \sigma}{S}, \quad (15)$$

σ 数量级约为 10^{-29} ,根据(15)式,当激光束半径在毫米量级,电子束能量为3.5 MeV, $P_L=100$ W时,单个电子的辐射功率数量级为 10^{-13} W; $P_L=1000$ W时,单个电子的辐射功率数量级为 10^{-12} W。可见,单个电子的辐射功率与激光功率、电子能量(Lorentz 因子)的平方成正比,与激光束的截面积成反比,与入射激光的波长无关。

4.4 LSS 的光子产额和辐射功率

前面推导了单个电子的光子产额 dN_2/dt 和辐射功率 P_2 ,在实际康普顿散射光源中,参与碰撞的都是电子束团,一个电子束团内的电子数一般达到 $10^8 \sim 10^9$ 个,显然,这些电子并不全部同时参与碰撞。如果单位时间内一个电子束团内有 N 个电子参与碰撞,由(10),(15)式可以求出一个理想电子束团产生的总光子产额和总辐射功率。如果电子束团的尺度小于或等于LSS辐射的波长,则这些辐射是相干的,从而可以实现高亮度的相干LSS辐射。但实际的电子束团是非理想的,束团内部电子运动速度并不相同,有一定的能散 $\Delta\gamma/\gamma$ 。电子束的能散主要由3部分组成:一部分是电子束的固有能散 $(\Delta\gamma/\gamma)_i$,它是由一些不可避免的因素(如电压的波动)引起的;第二部分是由电子束的发散引起的能散 $(\Delta\gamma/\gamma)_e$;第三,在不同碰撞点激光与电子束作用的过程中,参与碰撞的电子会将能量传递给光子,引起这些电子的能量减小,也会使电子束品质发生变化而引起能散 $(\Delta\gamma/\gamma)_R$ 。此外,激光带宽也能引起能散,由于激光的单色性比较好,因此激光带宽引起的

能散可以忽略。

电子束的能散会引起频谱展宽,也会引起光子产额和辐射功率的变化。在超腔中,由于激光与电子束多次散射和镜面多次反射,因此在各个碰撞点激光束的功率和光子数密度并不相同,设第 i 个碰撞点处的激光束功率为 P_{Li} ,而电子束品质变化也会引起各个碰撞点电子能量分布不同,设第 i 个碰撞点处电子束团中单位时间内参与碰撞的总电子数为 $\frac{dN_i}{dt}$,其中单位时间内速度为 v_j 的电子数为 $\frac{dN_{ij}}{dt}$ 。结合(6)式得第 i 个碰撞点处非理想电子束团辐射的平均波长

$$\bar{\lambda}_{2i} = \sum_j \frac{dN_{ij}}{dt} \frac{\lambda_1}{2\gamma_j} / \left(\frac{dN_i}{dt} \right), \quad (16)$$

结合(10)式得第 i 个碰撞点处非理想电子束团的总光子产额

$$\left(\frac{dN_2}{dt} \right)_i = \sum_j \frac{dN_{ij}}{dt} \frac{P_{Li} \lambda_1}{hc^2 S} \sigma v_j, \quad (17)$$

结合(15)式得第 i 个碰撞点处非理想电子束团的总辐射功率

$$P_{2i} = \sum_j \frac{dN_{ij}}{dt} \frac{2\gamma_j^2 P_{Li} \sigma}{S}, \quad (18)$$

根据(16)~(18)式,电子束团能量分布和碰撞点激光功率的大小都对光子产额、辐射功率等辐射特性有影响。此外,束团群聚长度、具有不同电流密度分布的电子束团等其他因素也会对辐射特性产生影响^[15,16]。

超腔中,高功率激光会与超腔内的强流电子束团发生多次碰撞,根据碰撞点的多少,可以求出基于超腔技术的LSS总光子产额为 $\sum_i \left(\frac{dN_2}{dt} \right)_i$,总辐射功率为 $\sum_i P_{2i}$ 。结合(17)式和(18)式知,碰撞点的多少、电子束品质和碰撞点激光功率都会影响LSS总光子产额和总辐射功率。

5 结 论

对基于超腔技术的高亮度激光同步辐射进行了研究,提出了一种超腔的新技术方案,利用康普顿散射理论计算了基于超腔技术的激光同步辐射的波长以及单个电子的光子产额 dN_2/dt 和辐射功率 P_2 ,讨论了电子束品质和激光功率损耗对激光同步辐射的总光子产额和总辐射功率的影响。结果发现,利用3.5 GeV电子束和远红外激光进行 90° 角康普顿散射可以获得能量10.975 MeV的 γ 射线,单个电子产生的光子产额与激光功率和入射波长成正比,与光束的截面积成反比。单个电子的辐射功率与激

光功率和 Lorentz 因子的平方成正比,与光束的截面积成反比。

参 考 文 献

- 1 W. Guo, W. Xu, J. G. Chen *et al.*. A high intensity beam line of γ -rays up to 22 MeV energy based on Compton backscattering [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2007, **578**: 457~462
- 2 Ding Yuantao, Zhao Kui, Quan Shengwen *et al.*. Design of a compact laser synchrotron source and its applications[J]. *High Power Laser and Particle Beams* 2004, **16**(5): 667~671
丁原涛,赵夔,全胜文等. 一种紧凑型激光同步辐射光源的初步设计及应用前景[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(5): 667~671
- 3 R. W. Schoenlein, W. P. Leemans, A. H. Chin *et al.*. Femtosecond X-ray pulses at 0.4 Å generated by 90° Thomson scattering: A tool for probing the structural dynamics of materials[J]. *Science*, 1996, **274**: 236~238
- 4 P. Sprangle, A. Ting, E. Esarey *et al.*. Tunable, short pulse hard X-rays from a compact laser synchrotron source [J]. *J. Appl. Phys.*, 1992, **72**(11): 5032~5038
- 5 S. K. Ride, E. Esarey, M. Baine. Thomson scattering of intense lasers from electron beams at arbitrary interaction angles [J]. *Phys. Rev. E*, 1995, **52**(5): 5425~5442
- 6 F. V. Hartemann, H. A. Baldis, A. K. Kerman *et al.*. Three-dimensional theory of emittance in Compton scattering and X-ray protein crystallography[J]. *Phys. Rev. E*, 2001, **64**(1): 016501
- 7 M. Fujiwara. Hadron and nuclear physics with inverse Compton gamma-rays at spring-8 [J]. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 2003, **50**: 487~497
- 8 M. Fujita, A. Moon, E. Yasuda *et al.*. Applications of enhanced Compton scattering in a supercavity [J]. *Nucl. Instr. and Meth.*, 1996, **A375**: ABS14~ABS16
- 9 Zhao Yu. The theoretical and experimental research on laser Compton scattering source [D]. Beijing: The High-Energy Physics Institute, Chinese Academy of Sciences, 2001, 10
赵宇. 激光康普顿散射光源的理论和实验研究 [D]. 中国科学院高能物理研究所, 北京, 2001, 10
- 10 Meng Xianzhu, Ren Zhongmin. The radiation condition of laser synchrotron source [J]. *College Physics*, 2006, **25**(8): 14~15
孟现柱,任忠民. 激光同步辐射光源的辐射条件 [J]. *大学物理*, 2006, **25**(8): 14~15
- 11 Meng Xianzhu. Research of free-electron laser using Compton scattering [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2004, **10**(1): 11~13
孟现柱. 利用康普顿散射对自由电子激光器的研究 [J]. *量子光学学报*, 2004, **10**(1): 11~13
- 12 Meng Xianzhu. Research of the scatter on photon interacting with moveable particle [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2003, **9**(3): 102~104
孟现柱. 对光子和高速粒子散射的研究 [J]. *量子光学学报*, 2003, **9**(3): 102~104
- 13 Pan Qiangyan, Xu Wang, Chen Jinggen *et al.*. Shanghai laser electron gamma source (SLEGS) [J]. *Nuclear Physics Review*, 2008, **25**(2): 129~134
潘强岩,徐望,陈金根等. 上海激光电子 γ 源 [J]. *原子核物理评论*, 2008, **25**(2): 129~134
- 14 Meng Xianzhu, Wang Minghong. Radiation of the motion of an electron in the multilayer film wiggler [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 61~63
孟现柱,王明红. 电子在多层膜摇摆器中的辐射 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 61~63
- 15 Liu Yaqing, Cheng Jin, Yu Wei *et al.*. Synchrotron radiation characteristics of the high power laser-driven electron [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(9): 1183~1186
刘亚青,程静,余玮等. 电子在强激光场中的同步辐射特性研究 [J]. *光学学报*, 2000, **20**(9): 1183~1186
- 16 Shi Zongjun, Yang Ziqiang, Liang Zheng. Smith-purcell radiation from prebunched electron bunches [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1081~1085
史宗君,杨梓强,梁正. 预群聚电子束团辐射特性 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(8): 1081~1085