

北京大学高功率相干 Terahertz 光源设计*

王桂梅¹⁾ 刘初玉 鲁向阳 庄杰佳 赵夔 陈佳洱

(北京大学重离子物理研究所重离子物理教育部重点实验室 北京 100871)

摘要 给出北京大学射频超导组拟建的准单色、高平均功率、波长可调的相干 THz 光源的系统设计. 该装置是根据相干扭摆器自发辐射原理, 采用自主原创的 DC-SC 超导光阴极注入器提供的高品质电子束经过磁压缩单次通过扭摆器产生 0.25—0.5 THz 之间的光. 该装置提供的 THz 光具有波长连续可调、功率高、相干性好、单色性好、线偏振等特点, 为生物、医学、材料科学、通信等领域提供强有力的研究工具.

关键词 THz 光源 相干扭摆器辐射 高功率 射频超导

1 引言

THz 波是指介于微波与红外之间的电磁波, 频率范围在 0.1—10 THz^[1] 之间, 恰好处于电子学向光学的过渡. THz 波长比微波波长小 3 个量级, 所以空间分辨率很高, 穿透能力强; 它的量子能量低, 只有毫电子伏, 不会对物质产生破坏作用; 另外, 许多物质大分子的振动和转动频率都在该频段. 因此, THz 波在生物医学、成像技术、无损检测、通信、遥感、材料分析与测试等方面有着重要的应用^[2]. 目前, 国际科技界公认 THz 科学技术是一个非常重要的前沿交叉领域^[3], 将为科学技术创新、国民经济发展和国家安全等方面提供很好的机遇. 但是由于缺乏有效的 THz 光源(即所谓 THz Gap), 目前与 THz 相关的学科研究难以全面深入开展, 因此 THz 波段的光源研究成为 THz 研究中的瓶颈.

由于 THz 波段特征尺寸小 ($\omega \propto 1/a$), 采用微波器件的办法很难达到, 同时, 它的量子能量低, 传统激光器很难实现. 直到 20 世纪 80 年代末, 与 THz 相关的科学技术才逐渐活跃起来. THz 波源产生方式主要有半导体 THz 源、激光激励的 THz 辐射源、基于自由电子的 THz 源等. 国内相关单位在 THz 光源的研究上也做了很多工作, 但很少兼具相干性好、平均功率高、波长可调、重复频率高的 THz 光源.

北京大学射频超导实验室拟采用先进的超导加速技术提供的高品质电子束, 将相干同步辐射与扭摆器技术结合, 研究高功率相干 THz 光源, 产生的光波长在 660—1200 μm 之间, 旨在为生物、医学、材料科学、通信等领域提供研究工具, 该装置提供的 THz 光源具有波长连续可调、平均功率高 (W 量级)、相干性好、准单色、线偏振光等特点. 这是目前国内绝大多数 THz 波源所不具备的.

2 北京大学 THz 光源装置介绍

北京大学 THz 装置主要由自主研制的 1+1/2 DC-SC 超导光阴极注入器^[4]、磁压缩、扭摆器和诊断等组成, 如图 1 所示. 它的工作过程是注入器产生的高品质电子束经过磁压缩装置压缩, 然后在扭摆器中出光. 因此, 该光源具有自由电子激光的所有特点, 光波长由自由电子激光谐振公式^[5]给出:

$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2}(1 + K^2/2), \quad (1)$$

其中, $\lambda_u[\text{cm}]$ 为扭摆器周期, $\gamma = E/m_e c^2$ 为相对论能量因子; 扭摆器磁场无量纲调制参数 $K = \frac{eB\lambda_u}{2\pi m_e c} = 0.934B\lambda_u$, 式中, e 为电子电荷量, $B[\text{T}]$ 为扭摆器磁场峰值磁感应强度, m_e 为电子静止质量, c 是光速, 即波长由扭摆器和电子束能量共同决定. 通过改变电子束

2006-06-01 收稿

* 国家重点基础研究发展规划项目 (2002CB713600) 和国家自然科学基金 (10276001) 资助

1) E-mail: wangguimei@pku.edu.cn

能量和扭摆器磁间隙可分别实现波长大范围和小范围的精确的连续调谐。

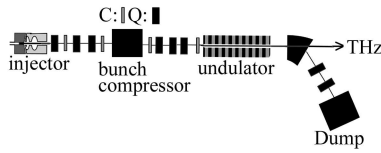


图 1 PKU-THz 装置示意图

电子束通过扭摆器辐射的总功率 $P(\omega)$ 是:

$$P(\omega) = p(\omega)N_e + \dot{p}(\omega)N_e(N_e - 1)|f(\omega)|^2, \quad (2)$$

式中, $p(\omega)$ 是单电子在单位频率单位立体角中辐射能量, N_e 是单束团包含的电子个数, $f(\omega)$ 是束团形状因子. 该装置通过磁压缩把电子束压到亚 ps, 使得 $f(\omega)$ 在 THz 长波段接近 1, 辐射光中相干光远远大于非相干光, 接近增大 N_e 倍, 因此它属于相干扭摆器辐射^[6].

3 注入器

北京大学的 DC-SC 注入器采用了 ps 激光驱动^[7]和射频超导技术, 与其他加速装置相比, 具有提供高平均流强、短脉冲、电子束品质好、cw 运行等优势. 图 2 是 PARMELA 模拟的注入器出口束流相空间分布, 其中上方两幅图是 x 和 y 方向的相空间分布, 下方两幅图分别是横向束截面和纵向相空间分布. 考虑到后面的束团压缩系统 alpha 磁铁对纵向相空间的要求, 加速相位选在偏离峰值相位 16° 附近, 注入器出口能量为 2.04 MeV, 能散为 0.97%, 束团长度为 4.37 ps, 能量位置相关系数是 0.993, 横向归一化 rms 发射度为 $3.5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, 纵向发射度是 29.42° keV .

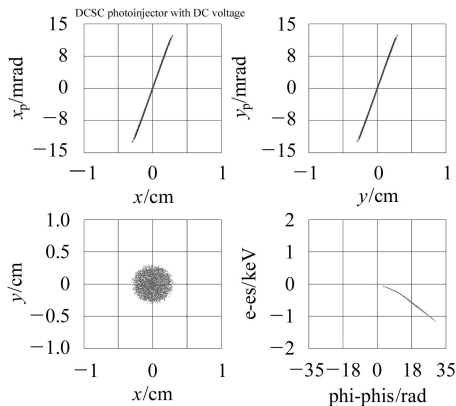


图 2 注入器出口相空间分布

为了满足扭摆器对束流相空间以及束团长度的要求, 在注入器和扭摆器之间加入 Q 铁以及磁压缩系统, 图 3 是 ELEGANT 模拟的这一段运输线的 beta 函数随路径的变化曲线.

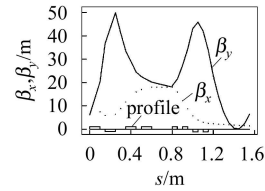


图 3 注入器和扭摆器之间 beta 函数随路径的变化

4 扭摆器

常用的扭摆器有电磁型、超导型和永磁型 3 种, 该装置采用间隙可调的永磁型扭摆器. 考虑到辐射光波长范围、功率、谱纯度以及衍射损耗等, 扭摆器长度是 1.5 m, 周期长度是 3 cm, 磁间隙在 1.2 cm 到 2.4 cm 之间可调, 峰值磁场强度是 0.5—0.13 T.

5 光辐射

电子束团纵向长度可以与辐射波长相比时, 束团中电子辐射之间是相干的, 辐射谱亮度与束团纵向分布函数相关. 实际束团分布一般是介于高斯分布和平顶分布之间, 为了计算简便, 假设束团分布为高斯束. 束团形状因子为

$$f(\omega) = e^{-(\omega\sigma)^2/2}, \quad (3)$$

式中, σ 是电子束团的 rms 长度, 图 4 给出 5 种不同的电子束长度下 (0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 ps (FWHM)), 电子束能量为 2 MeV 时, 形状因子 $|f(\omega)|^2$ 随辐射波长的变化曲线.

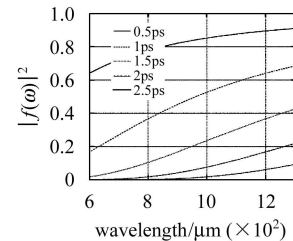


图 4 不同束团长度下, 高斯分布的电子束团形状因子随波长变化 (电子束能量 2 MeV)

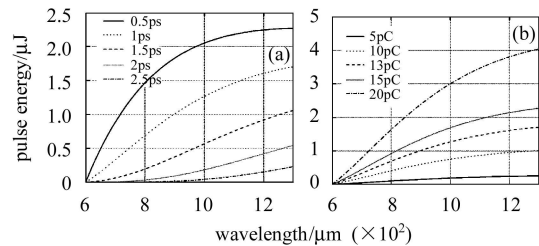


图 5 不同束团长度下 (a) 和不同束团电荷量下 (b), 辐射脉冲能量随波长变化
电子束能量 2 MeV, 13 pC; 束团 FWHM 长度 1 ps.

由图4可知,束团长度在1ps以下时,相干辐射功率比非相干部分提高 10^7 量级,非相干部分可以忽略。

相对论效应引起电子束通过扭摆器产生的辐射主要集中在沿电子运动方向的中心锥^[8]内,中心锥的半角为 $\theta_{\text{cen}} = \sqrt{(1+K^2/2)/N_u}/\gamma$,相比弯转磁铁,辐射角减小了 $1/\sqrt{N_u}$ 。辐射相对谱宽 $\delta\omega/\omega \cong 0.89/N_u$,单束

团电子在中心锥内的相干辐射能量 E_{CUR} 为

$$E_{\text{CUR}} \cong \alpha h\omega N_u K^2 N_e^2 |f(\omega)|^2 \times [J_0(\xi) - J_1(\xi)]^2 / (1 + K^2/2), \quad (4)$$

其中, α 为精细结构常数, h 为普朗克常数, $\xi = \frac{K^2}{4+2K^2}$, J_0 和 J_1 为Bessel函数。图5给出不同电子束长度、不同束团电荷量下,辐射脉冲能量随波长变化曲线。

表1给出装置在电子束长度为1ps,束团电荷量为13pC时的辐射光性能参数,该装置输出波长在660 μm 到1226 μm 范围内连续可调,平均功率约10W。

6 小结

本文给出了北京大学相干扭摆器辐射产生相干THz光源的系统设计方案。通过数值计算分析对THz光的性能给出全面评价。该光源通过改变扭摆器磁间隙可以实现一定范围内波长连续可调,输出光亮度比同步辐射提高 10^7 量级,平均功率到W量级,此外,光源的相干性及单色性很好,重复频率到MHz,为多种基础研究、应用研究提供有力的研究工具。

表1 PKU-THz装置辐射光的性能参数

物理量	数值
辐射光波长/ μm	664—1226
辐射光重复频率/MHz	81.25
辐射带宽(均匀加宽)	1.8%
辐射光脉冲长度/mm	33—61
辐射光脉冲能量/ μJ	0.2—1.6
辐射角/rad	0.03
峰值功率/W	$\sim 10^3$
平均功率(cw)/W	~ 10
单脉冲光子数	$\sim 10^{14}$
光通亮/ $\text{photon}\cdot\text{s}^{-1}$ in 0.1%bandwidth	$\sim 10^{20}$
亮度/ $\text{photon}(\text{s}\cdot\text{mm}^2\cdot\text{mrad}^2)^{-1}$ in 0.1% bandwidth	$\sim 10^{14}$
偏振	线偏振光
纵向相干长度/cm	3—6
横向相干面积/ $\text{mm}^2\cdot\text{rad}^2$	~ 0.1

参考文献(References)

- Gallerano G P, Biedron S. Overview of Terahertz Radiation Source. Proceedings of the 2004 FEL Conference. Italy: Comitato Conference Elettra, 2004, 216
- Peter H. Siegal IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, 2002, **50**(3): 910
- LIU Sheng-Gang. China Basic Science, 2006, **8**(1): 7 (in Chinese)
(刘盛纲. 中国基础科学, 2006, **8**(1): 7)
- WANG Gui-Mei, ZHAO Kui, HAO Jian-Kui et al. Experimental Progress of DC-SC photoinjector at Peking University. Proceeding of the FEL 2005 Conference. Stanford, e-Print: <http://www.slac.stanford.edu/econt>, 2005, 161
- Kim Kwang-Je et al. Introduction to the Physics of Free Electron Lasers. SPAS Lecture Note, 2003, 22
- Neuman C P, Ponds M L, Barnett G A et al. Nucl. Instrum. and Methods, 1999, **A429**: 287
- LU Xiang-Yang, LIN Lin et al. The Driver Laser System for DC-SC Injector. Proceeding of the 2004 FEL Conference. Italy: Comitato Conference Elettra, 2004, 484
- Kim K J. AIP Conf. Proc., 1989, **184**: 565

Initial Design of High Power Coherent Terahertz(THz) Source*

WANG Gui-Mei¹⁾ LIU Chu-Yu LU Xiang-Yang ZHUANG Jie-Jia ZHAO Kui CHEN Jia-Er
(MOE Key Laboratory of Heavy Ion Physics, Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract THz radiation lying in the region between the microwaves and the infrared, with the property of high spatial resolution and low quantum energy, has wide applications. However, lacking of proper THz source has greatly delaying the related THz science and technology development. Peking University plans to construct a facility of THz source using the DC-SC superconducting accelerator. It is based on coherent undulator radiation. The source has the property of high peak power, high average power, high coherence, high repetition rate and tunable wavelength between 660—1200 μm . The facility will provide a powerful tool for the research of biology, medicine, material, telecommunication and so on. This paper gives a brief description about the design considerations and an estimation on the property of the THz source.

Key words Terahertz source, coherent undulator radiation, high power, RF superconductivity

Received 1 June 2006

* Supported by Major State Basic Research Development Program (2002CB713600) and NSFC (10276001)

1) E-mail: wangguimei@pku.edu.cn