

电子在激光驻波场中运动产生的太赫兹及 X 射线辐射研究

朱卫卫 张秋菊 张延惠 焦扬

Motion-induced X-ray and terahertz radiation of electrons captured in laser standing wave

Zhu Wei-Wei Zhang Qiu-Ju Zhang Yan-Hui Jiao Yang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 124104 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.124104

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124104>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I12>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

脉冲激光辐照液滴锡靶等离子体极紫外辐射的实验研究

Experimental study on laser produced tin droplet plasma extreme ultraviolet light source

物理学报.2015, 64(7): 075202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.075202>

高功率脉冲电子束辐照 SiO₂ 的光学和激光损伤性能

Optical properties and laser damage performance of SiO₂ irradiated by high-power pulsed electron beam

物理学报.2014, 63(24): 246103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.246103>

强激光与锥型结构靶相互作用准直电子束粒子模拟研究

Collimated electrons generated by intense laser pulse interaction with cone-structured targets using particle simulation

物理学报.2014, 63(9): 094101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.094101>

基于镍-63 硅基辐伏能量转换结构初探

Investigation of a energy conversion silicon chip based on ⁶³Ni radio-voltaic effect

物理学报.2012, 61(17): 176101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.176101>

电子在激光驻波场中运动产生的太赫兹及 X 射线辐射研究*

朱卫卫 张秋菊[†] 张延惠 焦扬

(山东师范大学物理与电子科学学院, 济南 250014)

(2014 年 11 月 4 日收到; 2014 年 12 月 16 日收到修改稿)

采用单电子模型和经典辐射理论分别对低能和高能电子在线偏振激光驻波场中的运动和辐射过程进行了研究. 结果表明: 垂直于激光电场方向入射的低速电子在激光驻波场中随着光强的增大, 逐渐从一维近周期运动演变为二维折叠运动, 并产生强的微米量级波长的太赫兹辐射; 高能电子垂直或者平行于激光电场方向入射到激光驻波场中, 都会产生波长在几个纳米的高频辐射; 低能电子与激光驻波场作用中, 激光强度影响着电子的运动形式、辐射频率以及辐射强度; 高能电子入射时, 激光强度影响了电子高频辐射的强度, 电子初始能量影响着辐射的频率; 电子能量越高, 产生的辐射频率越大. 研究表明可以由激光加速电子的方式得到不同能量的电子束, 并利用电子束在激光驻波场的辐射使之成为太赫兹和 X 射线波段的小型辐射源. 研究结果可以为实验研究和利用激光驻波场中的电子辐射提供依据.

关键词: 激光驻波场, 电子运动和辐射, X 射线辐射, 太赫兹辐射

PACS: 41.75.Jv, 61.80.Fe, 33.20.Xx, 52.59.-f

DOI: 10.7498/aps.64.124104

1 引言

超短波长 X 光源在医学成像、X 射线诊断学、核共振吸收、显微术以及固体物理和材料学等领域, 太赫兹辐射在物体成像、医疗诊断、环境监测等方面都有着重要的科学价值和广阔的应用前景. 自实验室强激光技术发展以来, 对超短波长 X 射线源和太赫兹新型辐射源的研究一直得到了人们的广泛关注. 自由电子与激光的相互作用由于与电子加速、非线性汤姆孙散射及其激光同步辐射光源等研究相联系, 也是人们关注的问题之一^[1-6]. 2000 年, Pogorelsky 等^[1]利用高能相对论电子束和激光相向传播, 电子和激光作用时发生的线性汤姆孙散射用来产生可调谐的、单色性好的准直 X 射线源. 近年来, 随着台面短脉冲高强度激光技术和高亮度电子加速技术的迅速发展, 使得自由电子与激光的相互作用也已经进入到相对论范围, 相关工作证实自

由电子与相对论激光的相互作用在超短波长辐射源方面有着重要的应用价值^[4-9]. 但已有的研究大都是逆流相对论电子与激光脉冲相互作用的后向线性汤姆孙散射方式获取 X 射线源. 研究表明, 电子与单激光束或者激光驻波场作用都可以获得有效加速^[10,11]. 现有的激光技术也已经可以利用光压从薄膜靶中加速推出电子, 得到能量在百 meV 以上的相对论速度的高能电子束^[12,13]. 本文讨论了基于激光加速电子获得的不同初始能量的自由电子在强激光驻波场中的运动和辐射. 结果表明: 激光驻波场的周期性结构使得电子运动表现出规律行为并伴随着明显的辐射产生. 高能入射电子表现为 X 射线波段的高频辐射. 当低能量电子垂直于激光电场方向入射时, 随着激光强度增大到相对论范围, 电子在强激光驻波场由一维近周期运动变为二维的折叠运动, 电子被长时间地俘获在驻波场中, 并产生强的太赫兹辐射. 这些结果可以为实验研究和利用激光驻波场中的电子辐射提供理论依据.

* 国家自然科学基金 (批准号: 11104168) 和山东省自然科学基金 (批准号: ZR2014AM030) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: qjzhang@sdu.edu.cn

2 作用模型和基本方程

考虑由两束沿 z 轴相向传播的线极化激光复合形成的驻波场, 其矢势为

$$\mathbf{a} = a_0 \exp(-\rho^2/b_0^2) [\cos(z-t)\hat{\mathbf{x}} + \cos(z+t)\hat{\mathbf{x}}], \quad (1)$$

其中, a_0 是被 mc^2/e 归一化的单束激光峰值振幅, $\rho^2 = x^2 + y^2$, b_0 为束腰半径, $\hat{\mathbf{x}}$ 为 x 方向的单位矢量. 以上空间坐标 x, y, z 和时间 t 分别由 k_0^{-1} 和 ω_0^{-1} 归一化, 其中 k_0 和 ω_0 分别是激光波数和频率, m 和 e 分别为电子质量和电荷.

电子在电磁场中的运动可以用拉格朗日方程和电子的能量方程描述^[14]:

$$d_t(\mathbf{p} - \mathbf{a}) = -\nabla_a(\mathbf{u} \cdot \mathbf{a}), \quad (2)$$

$$d_t\gamma = \mathbf{u} \cdot \partial_t \mathbf{a}, \quad (3)$$

式中, \mathbf{u} 是由光速 c 归一化的电子速度; $\mathbf{p} = \gamma\mathbf{u}$ 是由 mc 归一化的电子动量; $\gamma = (1 - u^2)^{-1/2}$ 是相对论因子, 也是由 mc^2 归一化的电子能量, (3) 式中的 ∇_a 算符只作用在 \mathbf{a} 上. 在激光驻波场中做加速运动的电子, 其单位立体角辐射功率为

$$\frac{dP(t)}{d\Omega} = \frac{|\mathbf{n} \times [(\mathbf{n} - \mathbf{u}) \times \dot{\mathbf{u}}]|^2}{(1 - \mathbf{n} \cdot \mathbf{u})^5}, \quad (4)$$

式中, P 是辐射功率, 用 $e^2\omega_0^2/4\pi c$ 归一化; $\dot{\mathbf{u}} = d\mathbf{u}/dt$ 是电子运动加速度; \mathbf{n} 是电子位置到辐射谱

观察点方向的单位矢量. 入射电子在与激光驻波场作用过程中, 其单位立体角单位频率间隔的辐射能量可以表示为^[15]

$$\frac{d^2I}{d\omega d\Omega} = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\mathbf{n} \times [(\mathbf{n} - \mathbf{u}) \times \dot{\mathbf{u}}]|^2}{(1 - \mathbf{n} \cdot \mathbf{u})^5} \times \exp[is(t - \mathbf{n} \cdot \mathbf{r})] dt \right|^2, \quad (5)$$

式中, $\frac{d^2I}{d\omega d\Omega}$ 由 $e^2/4\pi^2c$ 归一化; $s = \omega/\omega_0$, 其中 ω 为电子辐射频率, ω_0 为激光脉冲中心频率; $\mathbf{r}, \mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}}$ 分别为电子在驻波场中的位置矢量、运动速度和加速度.

3 结果与讨论

3.1 低能电子在相对论光强激光驻波场中的二维电子俘获及辐射

首先考虑初始能量 $\gamma_0 = 1.005$ 的低能量电子在线偏振激光驻波场中的运动及其辐射. 低能量电子由初始位置 $x_0 = 0, z_0 = \pi/2$, 沿 z 轴正向 (垂直激光电场方向) 入射到线偏振激光驻波场中. 设形成驻波场的激光束腰半径 $b_0 = 5\lambda$, λ 为激光波长. 当激光光强从弱变强时, 电子运动发生变化, 前向观测到的电子辐射谱也相应变化.

弱光情况下, 当激光振幅 $a_0 = 0.01$ 时, 电子在激光驻波场中沿着 z 方向运动, 在 x 方向上电子速

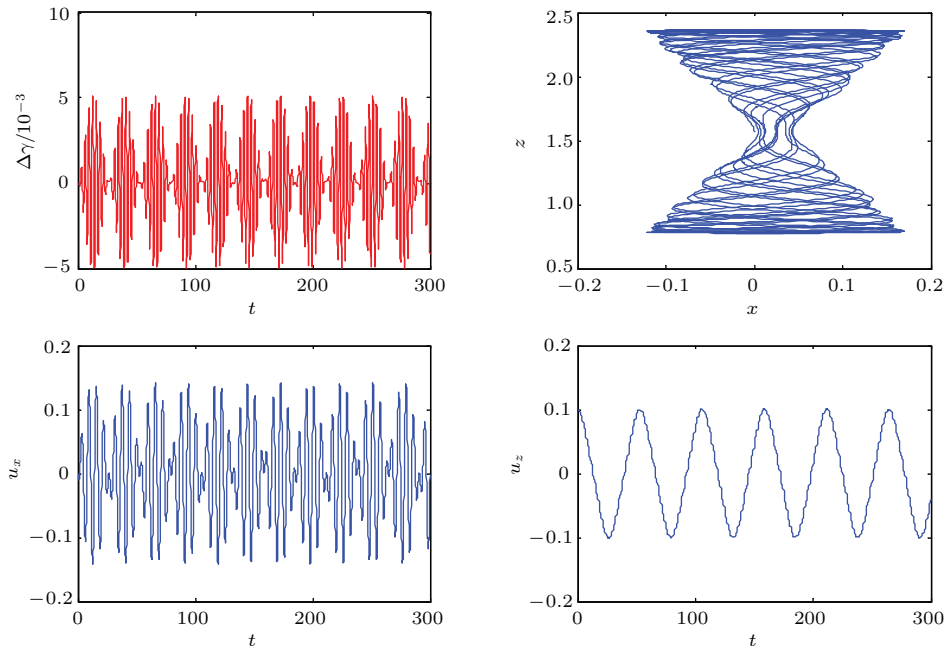


图1 在 $\gamma_0 = 1.005, x_0 = 0, z_0 = \pi/2, a_0 = 0.1$ 时, 电子的能量增量、运动轨迹及速度

Fig. 1. The energy increment, trajectory and speed of electron when $\gamma_0 = 1.005, x_0 = 0, z_0 = \pi/2$ and $a_0 = 0.1$.

度正负交替, 以 $x = 0$ 为平衡位置做近周期振荡. 电子运动轨迹表现为 x 方向的一维近周期运动, 相应电子的前向观测辐射谱的辐射频率大约为 1 和 1.22 倍频激光频率.

当激光振幅增大到弱相对论范围, 电子运动出现折叠, 电子被俘获在驻波场中的时间可以达到 $t = 2000$ 以上, 然后穿出驻波场. 图 1 为 $a_0 = 0.1$ 时电子的能量增量、运动轨迹及速度. 图 2 为相应电子的前向观测辐射谱, 其辐射频率大约为 0.9, 1.0 以及 1.1. 当激光振幅为 $a_0 = 0.3$ 时, 运动规律与 $a_0 = 0.1$ 类似, 电子辐射频率分别约为 0.6, 1.0 以及 1.4 倍频.

当激光光强达到相对论范围, 如激光振幅 $a_0 = 1.0$ 时, 电子表现为二维折叠运动, 且有很好的收敛性. 电子被很长时间 ($t > 2500$) 俘获在激光驻波场中, 前向观测辐射谱中出现近单色的低频辐射. 图 3(a) 为 $a_0 = 1.0$ 时电子的运动轨迹, 图 3(b) 为相应电子的前向观测辐射谱, 谱中出现

了约为 0.2 倍频的太赫兹辐射.

当 $a_0 = 2.55$ 时, 电子被驻波场俘获的时间达到 3000 个激光周期以上, 运动收敛性好, 其前向辐射谱中出现了很强的 0.07 倍频的太赫兹辐射. 电子的运动轨迹以及辐射谱分别如图 4(a) 和图 4(b) 所示.

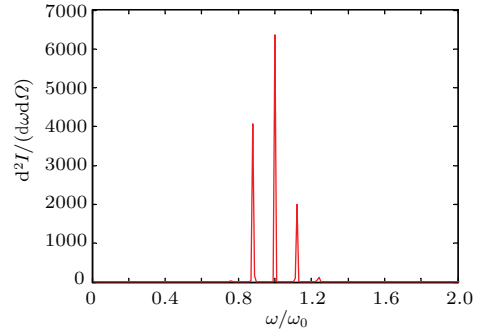


图 2 在 $\gamma_0 = 1.005, x_0 = 0, z_0 = \pi/2, a_0 = 0.1$ 时, 电子的前向观测辐射谱

Fig. 2. The forward radiation spectrum of electron when $\gamma_0 = 1.005, x_0 = 0, z_0 = \pi/2$ and $a_0 = 0.1$.

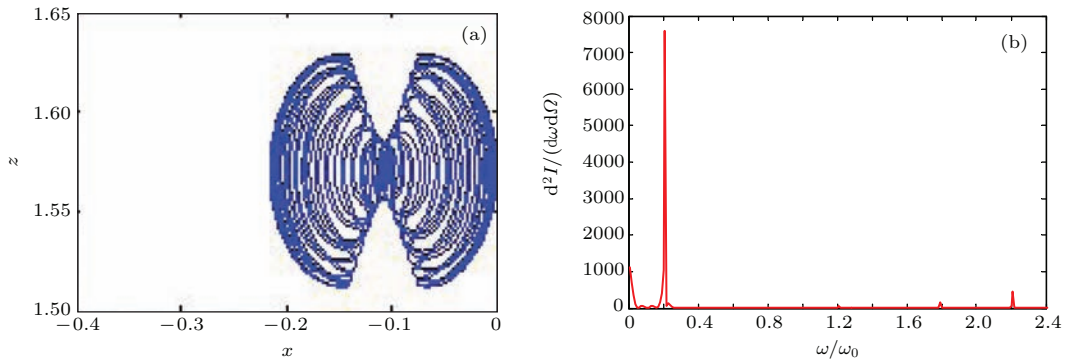


图 3 (a) $\gamma_0 = 1.005, x_0 = 0, z_0 = \pi/2, a_0 = 1.0$ 时电子的运动轨迹; (b) 在 $\gamma_0 = 1.005, x_0 = 0, z_0 = \pi/2, a_0 = 1.0$ 时电子的前向观测辐射谱

Fig. 3. (a) The trajectory of electron when $\gamma_0 = 1.005, x_0 = 0, z_0 = \pi/2$ and $a_0 = 1.0$; (b) the forward radiation spectrum of electron when $\gamma_0 = 1.005, x_0 = 0, z_0 = \pi/2$ and $a_0 = 1.0$.

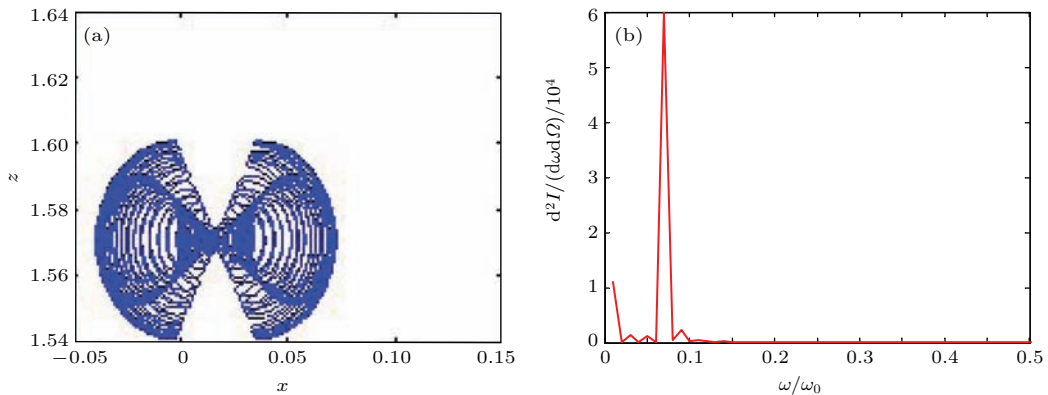


图 4 (a) $\gamma_0 = 1.005, x_0 = 0, z_0 = \pi/2, a_0 = 2.55$ 时电子的运动轨迹; (b) $\gamma_0 = 1.005, x_0 = 0, z_0 = \pi/2, a_0 = 2.55$ 时电子的前向观测辐射谱

Fig. 4. (a) The trajectory of electron when $\gamma_0 = 1.005, x_0 = 0, z_0 = \pi/2$ and $a_0 = 2.55$; (b) the forward radiation spectrum of electron when $\gamma_0 = 1.005, x_0 = 0, z_0 = \pi/2$ and $a_0 = 2.55$.

3.2 垂直于激光电场方向入射的高能电子产生的高频辐射

考虑初始能量 $\gamma_0 = 10$ 的高能电子, 由初始位置 $x_0 = 0, z_0 = \pi/2$, 沿 z 轴正向垂直于激光电场方向入射, 并观测电子的前向辐射情况. 计算结果表

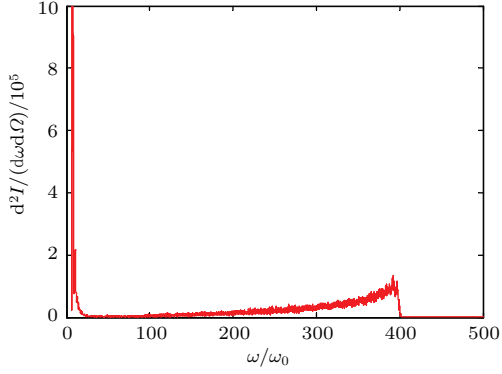


图5 $\gamma_0 = 10, x_0 = 0, z_0 = \pi/2, a_0 = 0.05$ 时电子的前向观测辐射谱

Fig. 5. The forward radiation spectrum of electron when $\gamma_0 = 10, x_0 = 0, z_0 = \pi/2$ and $a_0 = 0.05$.

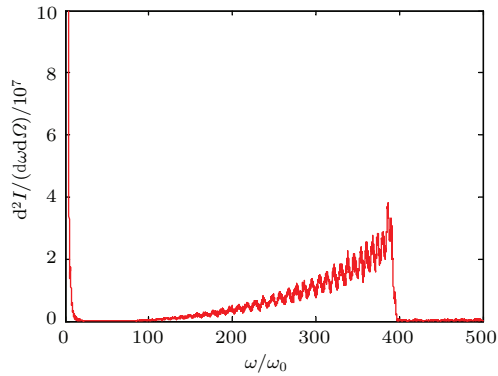


图6 $\gamma_0 = 10, x_0 = 0, z_0 = \pi/2, a_0 = 0.2$ 时电子的前向观测辐射谱

Fig. 6. The forward radiation spectrum of electron when $\gamma_0 = 10, x_0 = 0, z_0 = \pi/2$ and $a_0 = 0.2$.

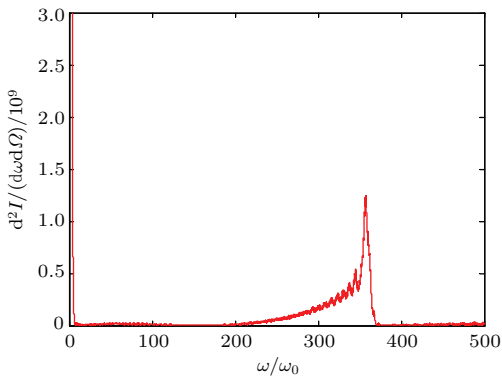


图7 $\gamma_0 = 10, x_0 = 0, z_0 = \pi/2, a_0 = 0.5$ 时电子前向观测辐射谱

Fig. 7. The forward radiation spectrum of electron when $\gamma_0 = 10, x_0 = 0, z_0 = \pi/2$ and $a_0 = 0.5$.

明: 高能电子垂直于激光电场方向入射时, 电子和驻波场作用时间较长, 形成从低频到高频的连续辐射谱, 且有明显的高频辐射产生. 图5、图6、图7分别为 $a_0 = 0.05, a_0 = 0.2$ 和 $a_0 = 0.5$ 时的电子辐射谱. 可以看到, 随着光强的增大, 高频辐射强度增强, 频率略有减小.

3.3 平行于激光驻波电场方向入射的高能电子的运动和辐射

考虑高能电子, 由初始位置 $x_0 = -3b_0, z_0 = \pi/2$, 沿 x 轴正向平行于激光电场方向入射. 计算结果表明: 电子平行于激光电场方向入射时, 电子和驻波场作用时间较短, 且有明显的高频辐射产生. 图8为 $a = 0.05$ 时, 初始能量 $\gamma_0 = 10$ 时电子的前向辐射谱. 图9和图10分别为 $a = 0.05$ 时 $\gamma_0 = 20$ 的电子和 $a = 0.2$ 时 $\gamma_0 = 20$ 的电子在激光驻波场中的前向辐射谱. 从图8和图9可以看出, 辐射谱中

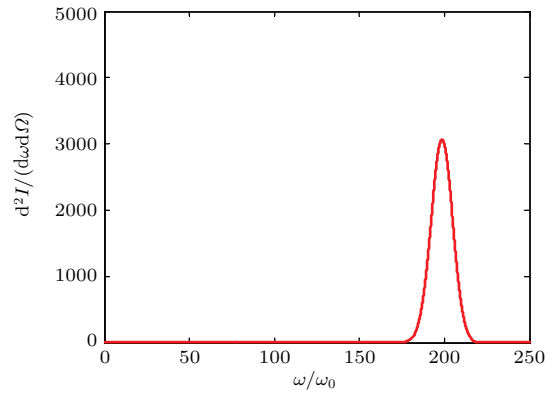


图8 $\gamma_0 = 10, x_0 = -3b_0, z_0 = \pi/2, a_0 = 0.05$ 时电子的前向观测辐射谱

Fig. 8. The forward radiation spectrum of electron when $\gamma_0 = 10, x_0 = -3b_0, z_0 = \pi/2$ and $a_0 = 0.05$.

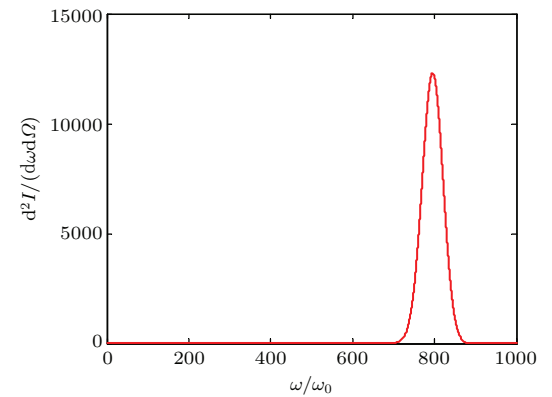


图9 $\gamma_0 = 20, x_0 = -3b_0, z_0 = \pi/2, a_0 = 0.05$ 时电子的前向观测辐射谱

Fig. 9. The forward radiation spectrum of electron when $\gamma_0 = 20, x_0 = -3b_0, z_0 = \pi/2$ and $a_0 = 0.05$.

能量主要集中在高频辐射部分, 电子初始能量从 $\gamma_0 = 10$ 增大到 $\gamma_0 = 20$ 时, 可以有效提高电子辐射频率. 当激光强度增大到 $a = 0.2$ 时, 如图 10 所示, 电子的高频辐射强度增大, 频率略有下移. 总之, 高能电子平行于激光电场方向入射到激光驻波场中时, 在弱相对论光强的驻波场中就可以获得高频率的辐射.

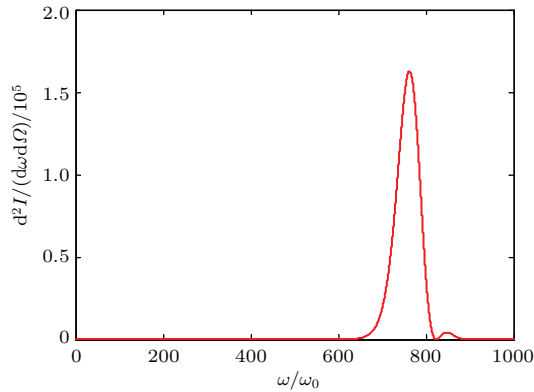


图 10 $\gamma_0 = 20$, $x_0 = -3b_0$, $z_0 = \pi/2$, $a_0 = 0.2$ 时电子的前向观测辐射谱

Fig. 10. The forward radiation spectrum of electron when $\gamma_0 = 10$, $x_0 = -3b_0$, $z_0 = \pi/2$ and $a_0 = 0.2$.

4 结 论

两束及以上的激光复合而成的激光场由于具有电磁场的可调性, 带电粒子在其中的运动有多种形式. 两束相向运动的激光复合而成的驻波场具有周期性结构, 电子在驻波场中的运动表现出规律行为, 其中以电子被俘获的运动形式最为引人注目, 该运动形式伴随着明显的辐射产生. 在现有的实验条件下可以容易地将电子枪产生的低能自由电子束或者激光加速电子产生的相对论运动的电子束注入到周期性的驻波场中. 本文研究了不同初始能量的电子在线偏振激光驻波场中的运动及其辐射现象. 当低能入射电子垂直于激光电场方向入射时, 电子在驻波场中可以以被俘获的形式做折叠运动, 伴随着明显的太赫兹辐射. 而高能电子与弱相对论强度以下的激光驻波场的作用则表现为 X 射线波段的高频辐射, 其中电子初始能量影响着辐射

的频率, 激光强度影响电子高频辐射的强度. 平行于激光电场方向入射时, 高能电子的高频辐射具有很好的准单色性与可调谐性. 本文所做的工作可以为实验研究和利用激光驻波场中的电子辐射提供依据, 也可以为人们设计与新型辐射源器件以及自由电子激光等相关的实验提供参考.

参考文献

- [1] Pogorelsky I V, Ben-Zvi I, Hirose T, Kashiwagi S, Yaki-menkol V, Kuschel K, Siddons I P, Skaritkal J, Kumita T, Tsunemi A, Omori T, Urakawa T, Washio M, Yokoya K, Okugi T, Liu Y, He P, Cline D 2000 *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **3** 090702
- [2] Hentschel M, Kienberger R, Spielmann C, Reider G A, Milosevic N, Brabec T, Corkum P, Heinzmann U, Drescher M, Krausz F 2001 *Nature* **414** 509
- [3] Tian Y W, Yu W, He F, Xu H, Senecha V, Deng D, Wang Y, Li R, Xu Z Z 2006 *Phys. Plasmas* **13** 123106
- [4] Lee K, Cha Y H, Shin M S, Kim B H, Kim D 2003 *Phys. Rev. E* **67** 026502
- [5] Yu W, Li B W, Yu M Y, He F, Ishiguro S, Horiuchi R 2005 *Phys. Plasmas* **12** 103101
- [6] Tian Y W, Yu W, Lu P X, Senecha V, Cang Y, Xu H, Deng D G, Li R X, Xu Z Z 2006 *Opt. Commun.* **261** 104
- [7] Wu H C, Meyer-ter-Vehn J, Fernández J, Hegelich B M 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 234801
- [8] Wu H C, Meyer-ter-Vehn J, Hegelich B M, Fernández J 2011 *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **14** 070702
- [9] Wu H C, Meyer-ter-Vehn J 2012 *Nature* **6** 304
- [10] Zhang Q J, Yu W, Luan S X, Ma G J 2012 *Chin. Phys. B* **21** 013403
- [11] He F, Yu W, Lu P X, Xu H, Qian L J, Shen B F, Yuan X, Li R X, Xu Z Z 2003 *Phys. Rev. E* **68** 046407
- [12] Yan C Y, Zhang Q J, Luo M H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 035202 (in Chinese) [闫春燕, 张秋菊, 罗牧华 2011 物理学报 **60** 035202]
- [13] Bai Y L, Zhang Q J, Tian M, Cui C H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 125206 (in Chinese) [白易灵, 张秋菊, 田密, 崔春红 2013 物理学报 **62** 125206]
- [14] Paul G 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 1915
- [15] Jackson J D 1975 *Classical Electrodynamics* (New York: Wiley) p241

Motion-induced X-ray and terahertz radiation of electrons captured in laser standing wave*

Zhu Wei-Wei Zhang Qiu-Ju[†] Zhang Yan-Hui Jiao Yang

(College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

(Received 4 November 2014; revised manuscript received 16 December 2014)

Abstract

The motions of charged particles in electromagnetic fields composed of two or more laser beams show a variety of forms due to the adjustable properties of electromagnetic fields. In this paper, we consider the periodic laser standing wave field composed of two laser beams with opposite propagating directions. The movement of electrons in the standing wave field shows a periodic behavior, accompanied with the obvious radiation, especially when electrons are captured by the laser standing wave field. This phenomenon has aroused much interest of us. Under the existing experimental conditions, the free electron beam with low energy from an electron gun or the relativistic electron beam generated from laser acceleration can be easily obtained and injected into the periodic standing wave field. In this paper, using the single-electron model and the classical radiation theory of charged particles, we study the motion and radiation processes of low and high energy electrons in the polarized laser standing wave field. The results show that when the direction of incident electrons with low-speed is perpendicular to the direction of the laser standing wave electric field, the one-dimensional nearly periodic motion of electrons evolves into a two-dimensional folded movement by gradually increasing the light intensity of the laser standing wave field, and the strong terahertz radiation at micrometer wavelength is produced. High energy electrons generate the high-frequency radiation with the wavelength at several nanometers when the incident direction of high energy electrons is perpendicular or parallel to the direction of the laser standing wave electric field. In the case of low-energy electron, the motion of electron, frequency and intensity of radiation are affected by the laser intensity. In the case of incident high-energy electrons, the laser intensity affects the intensity of electronic radiation, and the initial electron energy influences radiation frequency. The bigger the incident electrons energy, the higher the frequency of radiation is.

We can obtain electron beams with different energies by laser acceleration, and they can be promising small radiation sources for terahertz and X-ray by using the electron beam radiation in a laser standing wave field. These studies also provide a basis for experimental researches and the applications of electron radiation in a laser standing wave field.

Keywords: laser standing wave field, motion and radiation of electron, X-ray, terahertz radiation

PACS: 41.75.Jv, 61.80.Fe, 33.20.Xx, 52.59.-f

DOI: 10.7498/aps.64.124104

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11104168) and the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (Grant No. ZR2014AM030).

[†] Corresponding author. E-mail: qjzhang@sdu.edu.cn