

短脉冲强激光与固体靶作用在非相对论 激光参数区的高次谐波^y

扬 5 均, 陈 激, 李书民, 张声涛
(中国科技大学近代物理系, 安徽 合肥 230026)

摘 要: 利用“表面电流”模型, 探讨了激光参数在非相对论区条件下激光与固体靶作用产生的高次谐波的若干性质, 也讨论了在非相对论区条件下劳仑兹力项的修正对高次谐波效率的影响。

关键词: 短脉冲激光; 高次谐波; “表面电流”模型

中图分类号: O437 文献标识码: A

短脉冲强激光与固体靶作用产生高次谐波的问题, 由于与新兴 X 射线相干光源及激光核聚变等问题的研究关系密切, 所以这些年来引起人们极大的兴趣, 已有很多实验和理论研究工作发表, 特别引人注目的有: Norreys^[1] 等对激光与固体靶作用产生的高次谐波在实验上已观察到 68 次的谐波. 理论上 Gibbon^[2] 的一维 PIC 模拟工作和 Lichters^[3] 等提出的“moving mirror”模型均与 Norreys 等的实验结果符合较好. 我们也曾经采用“相对论表面电流”模型研究了超强超短脉冲 p 极化斜入射激光与固体靶作用产生的高次谐波, 结果与 Norreys 等的实验结果和 Gibbon 的 PIC 模拟结果也符合得很好^[4]. 这里所举的几个工作其激光参数都在相对论区. 一般说来, 当 $I\lambda^2$ (I 是激光强度, λ 是激光波长) 大于 10^{16} W/cm²· μm^2 时为相对论区, 当 $I\lambda^2$ 小于 10^{16} W/cm²· μm^2 时为非相对论区. 本文利用“表面电流”模型, 探讨了激光参数在非相对论区条件下激光与固体靶作用产生的高次谐波的若干性质, 所得到的结果与最近 Ganev^[5] 的实验结果基本一致. 同时我们也讨论了在非相对论区条件下劳仑兹力项的修正对高次谐波效率的影响.

当短脉冲强激光照射固体靶时, 靶表面会被迅速离化而产生高密度等离子体. 在等离子体密度大于电磁波传播的临界密度时, 入射激光将几乎全部被固体的高密度等离子体的表面所反射, 因此等离子体与真空的分界面可以作为理想导体表面近似.

这样根据理想导体表面的边界条件, 在入射激光作用下会产生面电流和面电荷, 这两个随时间谐变的面电流和面电荷正是辐射高次谐波的源.

对于 p 极化斜入射激光, 其电场强度用平面波表示为:

$$\mathbf{E}_i = E_0 \exp[i(k_x x + k_z z - \omega t)] \cdot (\cos \alpha \mathbf{e}_x - \sin \alpha \mathbf{e}_z), \quad (1)$$

其中, $k_x = k_i \sin \alpha$, $k_z = k_i \cos \alpha$. k_i 是入射光的波数, α 为入射角. 此时由边界条件得到的面电流和面电荷为:

$$\mathbf{j}_s = \frac{c}{2\pi} E_0 \exp[i(k_x x - \omega t)] \mathbf{e}_x, \quad (2)$$

$$\sigma_s = \frac{1}{2\pi} E_0 \exp[i(k_x x - \omega t)] \sin \alpha, \quad (3)$$

为了方便, 代替 \mathbf{j}_s 和 σ_s 可以引入两个等效的体电流 \mathbf{j}_1 和 \mathbf{j}_2 , 其中 $\mathbf{j}_1 = \mathbf{j}_s \cdot \delta(z)$ 而 \mathbf{j}_2 是因为面电荷随时间变化而引起的, 可由连续性方程得到:

$$\mathbf{j}_1 = \frac{c}{2\pi} E_0 \exp[i(k_x x - \omega t)] \delta(z) \mathbf{e}_x, \quad (4)$$

$$\mathbf{j}_2 = \frac{i\omega}{2\pi} E_0 \exp[i(k_x x - \omega t)] \sin \alpha \delta(z) \mathbf{e}_z, \quad (5)$$

从电流源 $\mathbf{j} = \mathbf{j}_1 + \mathbf{j}_2$ 辐射的第 n 次谐波在单位立体角内的辐射功率为

$$\frac{dP_n}{d\Omega} = \frac{n^2 \omega_n^2}{8\pi^3 c^3} \left| \int \rho d\rho \int d\phi \exp[-ink\rho \cdot \sin \theta \cos(\phi - \varphi)] \int dz \exp[-ink \cos \theta z] \right|^2 \times$$

^y 收稿日期: 2002 - 03 - 05; 修改日期: 2002 - 06 - 26

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10075043, 10074060)

作者简介: 扬 5 均(1979-), 男(汉族), 安徽安庆人, 研究生, 从事理论物理研究.

$$\int d\mathbf{k} \times (\hat{s} \times \mathbf{J}) \exp[i n(\tau - \mathbf{k}\hat{s} \cdot \Delta)] \Big|^2, \quad (6)$$

其中 $\hat{s} = (1, \theta, \varphi)$ 是观察点的方位矢, $\tau = \omega t$, Δ 是源点的位移:

$$\Delta = \int \mathbf{v}(x, \tau) d\tau, \quad (7)$$

其中 \mathbf{v} 是在入射激光场作用下的电子颤抖速度, 可由运动方程得到:

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = -e \left| \mathbf{E} + \frac{1}{c} \mathbf{v} \times \mathbf{B} \right|, \quad (8)$$

在非相对论区, 我们把劳仑兹力项作为一级微扰项处理, 由此可以求得:

$$\Delta = \frac{q}{k} \cos(k_x x - \omega t) (\cos \alpha \hat{e}_x - \sin \alpha \hat{e}_z) + \frac{q^2}{4k} \sin 2(k_x x - \omega t) (\sin \alpha \hat{e}_x + \cos \alpha \hat{e}_z), \quad (9)$$

上式第 2 项来自劳仑兹力项作为一级修正的结果, 其中 $q = (eE_0)/(m\omega c) = 0.85 \times 10^{-9} \sqrt{I\lambda^2}$ 是激光强度参数. 对辐射功率的表达式进行积分后可得:

$$\frac{dP_n}{d\Omega} = \frac{ca^2 E_0^2}{8\pi} \left| \frac{J_1(nka\xi)}{\xi} Y_n \right|^2 \cos^2 \theta + \sin^2 \theta \sin^2 \varphi + 4 \sin^2 \left| \frac{1}{2} nk \cos \theta \xi \right| \cdot \left| \frac{1}{n^2} \sin^2 \alpha \tan^2 \theta - \frac{1}{n} \sin \alpha \sin \theta \cos \varphi \right|, \quad (10)$$

其中

$$Y_n = \left| \sum_{\mu=2\nu-1-n} (-i)^\mu J_\mu(nQ) J_\nu(nQ') \right|^2, \quad (11)$$

$$\xi = (\sin^2 \theta + \sin^2 \alpha - 2 \sin \theta \sin \alpha \cos \varphi)^{1/2}, \quad (12)$$

$$Q = q(\sin \theta \cos \varphi \cos \alpha - \cos \theta \sin \alpha), \quad (13)$$

$$Q' = \frac{q^2}{4} \sin \alpha \sin \theta \cos \varphi, \quad (14)$$

其谐波转换效率为

$$\eta_n = \frac{1}{\pi a^2 I} \int \frac{dP_n}{d\Omega} d\Omega, \quad (15)$$

其中 a 是激光焦斑半径.

根据上面得到的表达式, 我们可以得到如下一些结果:

(1) 在 $\xi = 0$ 处, 辐射功率有极大值, 如图 1 所示. 这在斜入射的情况下, 意味着在反射方向辐射最大. 这与 Ganeev 的实验结果相一致.

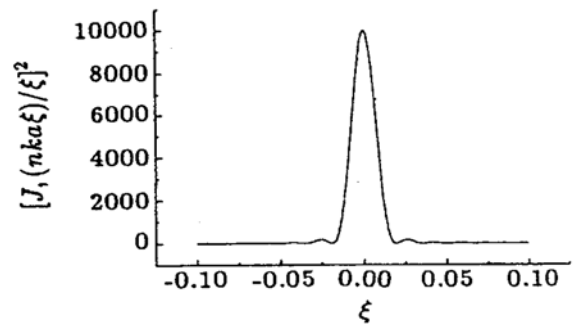


图 1 在 $n = 2, ka = 100$ 时, 衍射因子随 ξ 的变化

(2) 谐波转换效率 η_n 比例于 $I^{(n-1)}$, 这与我们上一篇文章^[4]得到的结论相同. 对第 2, 第 3, 第 4 次谐波, 由此得到的强度标度指数为: 1, 2, 3. 而 Ganeev 实验获得的标度是 1.5, 1.8, 3.8. 考虑到实验误差等因素, 两者结果相近.

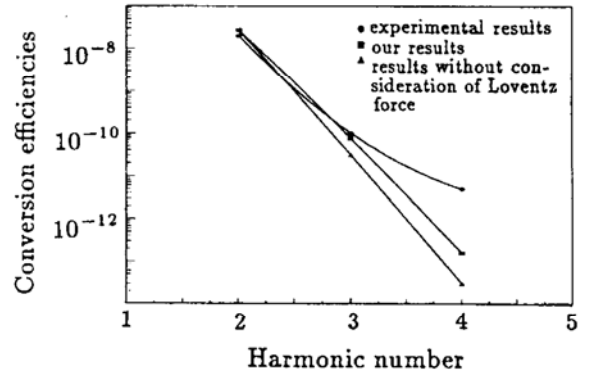


图 2 转换效率与谐波数的关系
激光参数与 Ganeev 实验的相同.

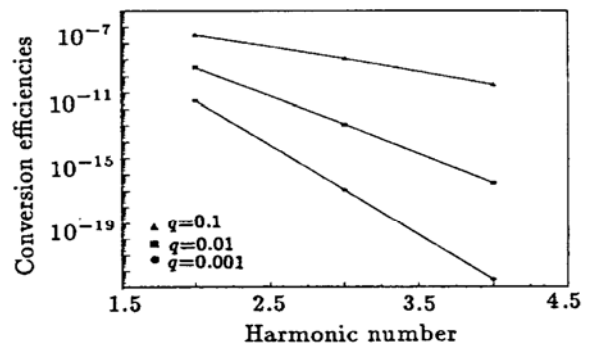


图 3 对不同 q 值时, 转换效率与谐波数的关系

(3) 由谐波转换效率的表达式可获得邻近谐波转换效率之比, 对 $n = 3$ 和 $n = 2$ 得到 $\eta_3/\eta_2 = 2.8 \times 10^{-3}$, Ganeev 的实验值为 5×10^{-3} , 两者也很接近.

(4) 谐波转换效率随谐波数 n 的增大而下降 (图 2), 随激光强度增大而上升 (图 3). 从图 2 还可

看到劳仑兹力效应对次数较高谐波的影响较大.

(5) 存在着获得最大效率的最佳的入射角, 对不同的谐波数, 最佳入射角不同(图 4).

我们利用“表面电流”模型, 探讨了激光参数在非相对论区条件下激光与固体靶作用产生的高次

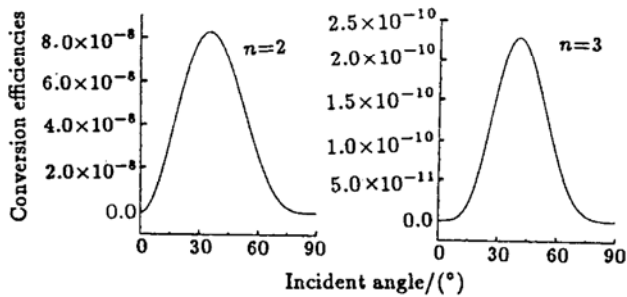


图 4 $n=2$, $n=3$ 时转换效率随入射角变化

谐波的若干性质, 获得的很多结果与最近 Ganeev 的实验结果比较接近. 结果表明, 非相对论参数区与

参 考 文 献:

- [1] Norreys P A, Zept M, Moustazis S. Efficient Extreme UV Harmonics Generated from Picosecond Laser Pulse Interactions Solid Target [J]. Phys Rev Lett, 1996, **76**: 1 832.
- [2] Gibbon P. Harmonic Generation by Femtosecond Laser-solid Interaction: A Coherent "Water-window" Light Source [J]. Phys Rev Lett, 1996, **76**: 50.
- [3] Lichters R, Meyer-ter-Vehn J, Pukhov A. Short-pulse Laser Harmonics from Oscillating Plasma Surfaces Driven at Relativistic Intensity [J].

相对论参数区的结果相比较其明显差别有: 1) 谐波转换效率随谐波数增大而下降的程度非相对论的厉害(见图 5). 2) 即使对非相对论参数区, 劳仑兹力效应对谐波辐射有一定贡献, 尤其对高次谐波.

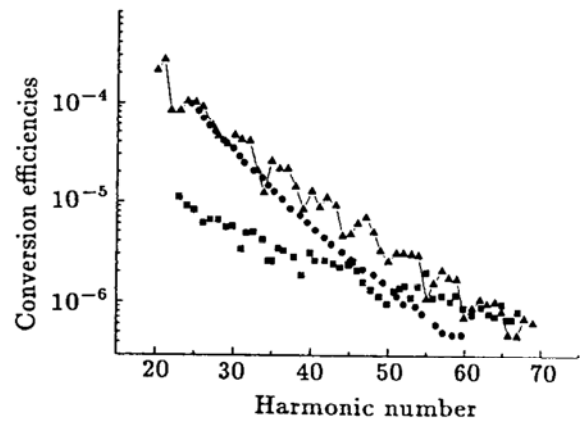


图 5 相对论区的结果

■ Norreys 的实验结果, ● PIC 结果, ▲ 本文计算结果^[4].

Phys Plasmas, 1996, **3**: 3 425.

- [4] Wu Shuai, Zhan Ruijuan, Chen Ji. Harmonic Generation During Ultrashort-pulse Ultraintense P-polarized Laser Interaction with solid target [J]. Phys Lett, 2001, **A286**: 282.
- [5] Ganeev R A, Chakera J A, Raghuramaiah M, et al. Experimental Study of Harmonic Generation from Solid Surfaces Irradiated by Multipicosecond Laser Pulses [J]. Phys Rev, 2001, **E63**: 026 402.

Harmonic Generation by Nonrelativistic Electrons During the Interaction between a Short-pulse Intense Laser and Solid Target^{*}

YANG Ting-jun, CHEN Ji, LI Shu-min, ZHANG Sheng-tao

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

Abstract: In this paper, we use the “surface currents” model to investigate the harmonic features during the interaction between a short-pulse intense laser in nonrelativistic regime and solid target. The contribution of modification from Lorentz force to the harmonic is also discussed.

Key words: short-pulse laser; high-order harmonics; “surface currents” model

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10075043, 10074060)