

相位反射产生的激光场空洞现象及其与 激光等离子体参数相关性研究^{*}

张秋菊¹⁾ 盛政明²⁾ 王兴海¹⁾ 满宝元¹⁾ 苍宇²⁾ 张杰²⁾

1) 山东大学物理与电子科学学院, 济南 250014)

2) 中国科学院物理研究所光物理开放实验室, 北京 100080)

(2005 年 6 月 1 日收到, 2005 年 11 月 7 日收到修改稿)

理论研究和数值模拟研究表明激光在等离子体中诱导的等离子体密度调制可以起类似布拉格反射镜的作用, 使得后面的入射光在等离子体平均密度远低于临界密度的区域就对入射光产生相位反射. 相位反射的发生会影响激光在等离子体中的传播, 例如激光在等离子体中相对传播时会出现激光场空洞现象. 进一步的理论和数值模拟研究表明, 相位反射持续发生的时间以及反射率的高低与等离子体的密度、等离子体区域的长度、激光强度以及脉宽等因素密切相关, 这些都会对激光在等离子体中的传输产生影响.

关键词: 相位反射, 密度调制, 激光等离子体, 粒子模拟

PACC: 5240D, 4225G, 5235M, 5265

1. 引 言

激光在分层介质中的传播一直是人们关注的热点问题. 最近的研究表明, 也可以利用激光对等离子体密度的调制形成周期性分层结构, 激光和这种诱导产生的等离子体周期性密度调制的相互作用带来了一些新的现象和应用, 由此引起了人们很大的兴趣^[1-5]. 近来, 人们对这个问题进行了不少研究. 例如, 人们在理论上研究了交叉激光脉冲在低密度等离子体中形成的密度调制, 并探索了其在产生高频辐射方面的应用^[6]. 还有研究发现可以利用等离子体周期性密度调制来实现激光脉冲的速度操控和脉宽压缩. 另外的结果表明, 在低密度等离子体中形成的密度调制除了对入射光可以产生镜面反射、背向衍射^[5]以及引起交叉的两束激光脉冲之间能量的相互转换^[7]之外, 也可以像布拉格反射镜一样使后来的入射光在低密度等离子体区域产生相位反射^[8].

为了更清楚地理解相位反射现象, 本文研究了相位反射导致的对撞激光在等离子体中传播时出现的空洞现象, 探讨了相位反射持续发生的时间、反射率的高低与等离子体的密度、等离子体区域的长度、

激光强度以及脉宽等因素的相关联系, 以及它们对激光在等离子体中传输的影响.

2. 对撞激光在低密度等离子体中形成的光场空洞现象

我们以前的研究表明, 激光入射到固体靶前的预等离子体中时, 入射激光场和反射场叠加形成干涉场, 然后干涉场的有质动力推动电子和离子, 使它们积聚在干涉场波节的位置, 从而会产生如图 1(a) 所示空间周期为 $\Lambda = \lambda_r/2 = \lambda/(2\sqrt{1-n_0/n_c})$ 的等离子体密度调制^[6], 其中 λ 和 λ_r 分别为激光的真空波长以及在初始均匀密度等离子体中的波长. n_0 和 n_c 分别是等离子体初始密度和等离子体的临界密度. 该周期性密度调制在等离子体平均密度远低于临界密度的区域就会对激光产生相位反射, 使得激光场不能到达等离子体临界密度附近, 如图 1(b).

除了用单激光束在固体靶前的预等离子体中可以观察到相位反射之外, 用两束对撞方向的激光也可以诱导产生等离子体周期性密度调制, 并观察到其对相应波长激光的相位反射, 这进一步说明相位反射发生的结果. 为了保证激光的脉宽足够长, 我们

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 10476033, 10547122, 10474059), 国家高技术惯性约束聚变基金以及国家重点基础研究专项(批准号: G1999075206)资助的课题.

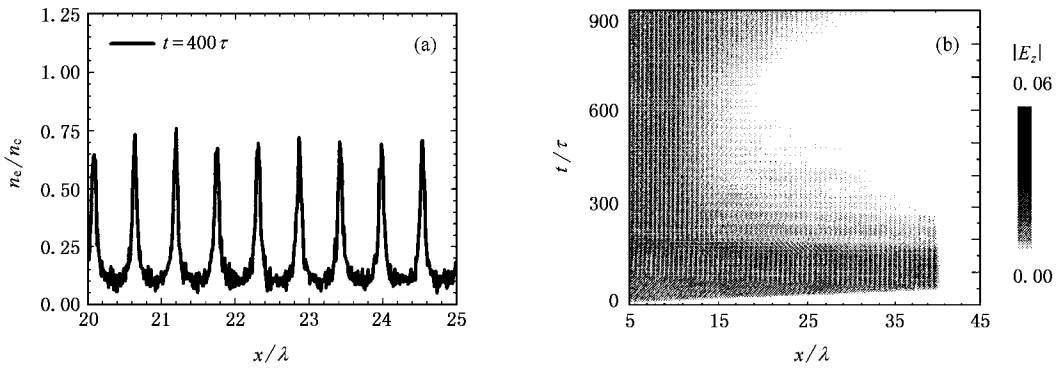


图 1 (a) 等离子体密度调制 (b) 激光场随时间和空间的演化(这里入射的半无限脉冲的振幅为 $a_0 = 0.03$, 等离子体密度为 $n_0 = 0.2n_c$)

采用了形式为 $a(t) = a_0 \tanh(t/10\tau)$ 的半无限长脉冲, 这里 τ 是激光的振荡周期, $a_0 = eE_0/m\omega_0 c$ 为激光振幅. 如图 2, 我们在数值模拟中考虑一段低密度 $n_0 = 0.2n_c$ 的等离子体平板. 模拟中有两束从形状、脉宽到振幅都相同的激光束分别垂直入射到等离子体平板的两侧. 其中激光的振幅 $a_1 = a_2 = 0.04$. 两束激光在等离子体中也会叠加干涉并形成驻波场, 然后等离子体中的电子和离子在驻波场的推动下形成一个等离子体密度光栅. 图 2(a) 给出的是等离子体电子密度随着时间和空间的演化, 可以看出, 密度调制很快形成, 并且持续了几百个光周期的时间. 图 2(b) 给出的是激光场随着时间和空间的演化. 最初两束激光都是行波模式, 当两束激光相遇, 行波变为驻波模式, 在驻波模式持续了一段时间之后, 图中开始出现激光场的空洞现象. 这表明两束激光脉冲都被产生的密度调制所反射, 而不能传到整个等离子体靶的中心区域.

3. 相位反射与激光等离子体参数的相关性

为了更清楚地理解相位反射现象与激光等离子体参数的关系, 我们考虑单激光束在固体靶前的预等离子体中产生的相位反射对激光在靶中传输的影响. 其中低密度的预等离子体区域的长度为 $L = 20\lambda$. 我们分别变化等离子体密度和激光强度等参数作数值模拟. 首先取入射激光的振幅为 $a_0 = 0.03$, 而改变等离子体的密度. 图 3(a) 和图 3(b) 给出了初始等离子体密度分别为 $n_0 = 0.1n_c$ 和 $n_0 = 0.4n_c$ 时的激光场的随时间和空间的演化. 与 $n_0 = 0.2n_c$ 的情况相比, $n_0 = 0.1n_c$ 时相位反射发生的时间比较短, 反映在图 3(a) 就是图中的空洞区域比较小. 图 3(b) 表明, 与前面两种相对比较低的初始密度的情况相比, $n_0 = 0.4n_c$ 时的激光场空洞区域更大. 这主要是因为其调制等离子体密度峰值更大的缘故, 但因为调制后的密度光栅只有少数几层达到

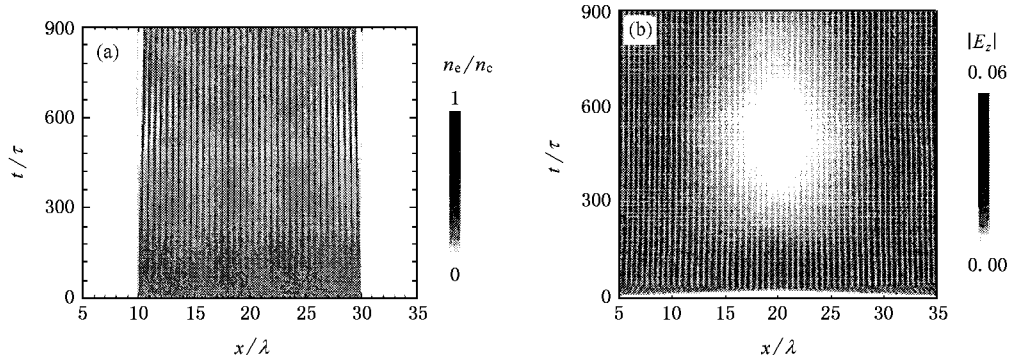


图 2 振幅为 $a_1 = a_2 = 0.04$ 的两个对撞激光脉冲在密度为 $n_0 = 0.2n_c$ 的等离子体中叠加 (a) 等离子体密度随时间和空间的演化 (b) 激光场随时间和空间的演化

了 n_c ,而多数都在临近 n_c 以下的密度 ,所以可以认为由大于临界密度的等离子体引起的镜面反射影响

较小 ,该激光场空洞区域主要还是相位反射发生的更快而且持续时间更长引起的 .

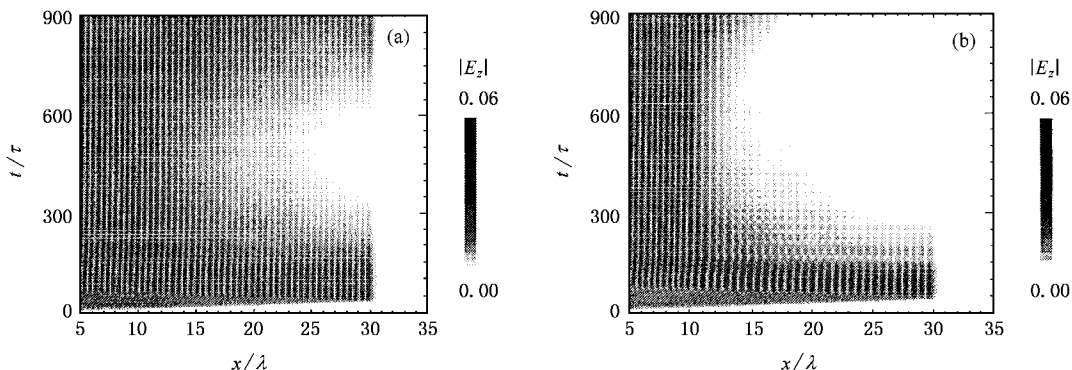


图 3 (a) $a_0 = 0.03, n_0 = 0.1n_c$ 时激光场随时间和空间的演化 (b) $a_0 = 0.03, n_0 = 0.4n_c$ 时激光场随时间和空间的演化

这与图 4 (b) 和图 4 (c) 的理论模型计算结果是一致的 .

如图 4 (a) 所示的周期性分层结构 ,其空间周期假定为 Λ .分层结构中的光场为

$$E(x) = \begin{cases} 1 \cdot e^{-ik_0 x} + \alpha e^{ik_0 x}, & x < 0, \\ a_0 e^{-ik_1 x} + b_0 e^{ik_1 x}, & 0 < x < \Lambda_1, \\ c_0 e^{-ik_2(x-\Lambda_1)} + d_0 e^{ik_2(x-\Lambda_1)}, & \Lambda_1 < x < \Lambda, \\ a_m e^{-ik_1(x-m\Lambda)} + b_m e^{ik_1(x-m\Lambda)}, & m\Lambda < x < m\Lambda + \Lambda_1, \\ c_m e^{-ik_2(x-m\Lambda-\Lambda_1)} + d_m e^{ik_2(x-m\Lambda-\Lambda_1)}, & m\Lambda + \Lambda_1 < x < (m+1)\Lambda, \\ \beta e^{-ik_0 x}, & (m+1)\Lambda < x, \end{cases} \quad (1)$$

其中 $m = 1, 2, 3, \dots$, $k_{1,2} = k_0(1 - n_{1,2}/n_c)^{1/2}$ 为波矢 , $n_{1,2}$ 是分层等离子体的密度 , $n_0 = (n_1\Lambda_1 + n_2\Lambda_2)/\Lambda$ 是初始时无扰动的等离子体密度 ,系数 $\alpha, \beta, a_m, b_m, c_m$ 等等是下面要定义的变量 .假定第一层内的系数为 a_0, b_0 ,那么第 $(m+1)$ 层内的系数 a_m, b_m 可以写成^[1]

$$\begin{pmatrix} a_m \\ b_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D & -B \\ -C & A \end{pmatrix}^m \begin{pmatrix} a_0 \\ b_0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

其中 A, B, C, D 四个矩阵元可以分别给出^[9] .利用这个模型 ,可以得到反射率 $|\alpha|^2$ 以及透射率 $|\beta|^2 = 1 - |\alpha|^2$.图 4 (b) 与 (c) 给出了当初始等离子体密度分别为 $n_0 = 0.2n_c$ 和 $0.1n_c$ 时的反射率与最大调制密度之间的关系 ,其中实线、虚线、以及点线分别对应 5 层、10 层、以及 20 层周期的情况 .同样情况下 ,图 4 (c) 中 $n_0 = 0.1n_c$ 时的反射率总是低于图 4 (b) 中 $n_0 = 0.2n_c$ 时的反射率 .例如 ,当有 20 层周期

结构时 ,图 4 (b) 中 $n_0 = 0.2n_c$ 时的反射率最大为 1 ,而图 4 (c) 中 $n_0 = 0.1n_c$ 时的反射率则最大约为 0.8 .

下面保持等离子体密度 $n_0 = 0.2n_c$ 以及等离子体区域的长度为 $L = 20\lambda$ 不变 ,而改变入射激光的振幅 .图 5 (a) 和 (b) 分别给出了 $a_0 = 0.03$ 和 $a_0 = 0.04$ 时的相位反射情况 .结果表明 ,对比较大的激光振幅 $a_0 = 0.04$ 时 ,由于密度光栅中的电子和离子在比较高的激光强度下具有更大的加速 ,所以密度光栅会衰变得更快 ,因此相位反射消失得也更快 .如果激光强度进一步增高 ,例如增大到 $a_0 = 0.1$ 时 (对应的激光强度约为 10^{16} W/cm^2) ,因为真空与等离子体边界处的光压的影响以及局域类孤子电磁结构的产生使得等离子体密度光栅被破坏 ,模拟结果中就看不到相位反射现象了 .

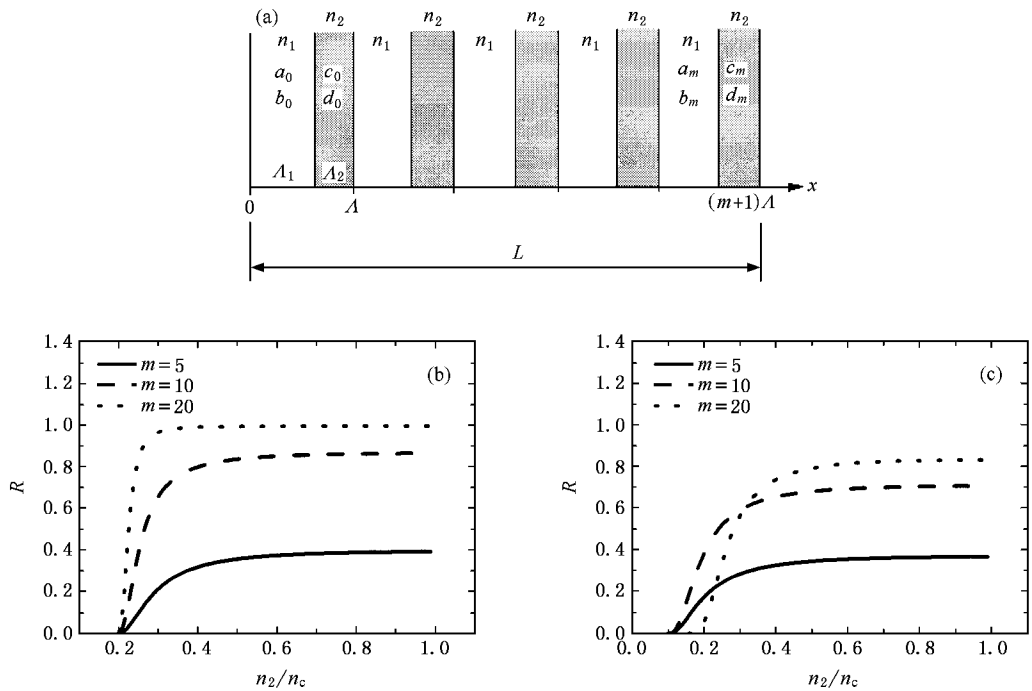


图4 (a)空间周期为 Δ 的周期性分层结构的示意图;初始等离子体密度分别为(b) $n_0 = 0.2n_c$ 和(c) $n_0 = 0.1n_c$ 时的反射率与最大调制密度的关系(其中的(b)和(c)中的实线、虚线、以及点线分别对应5,10,及20层周期的情况)

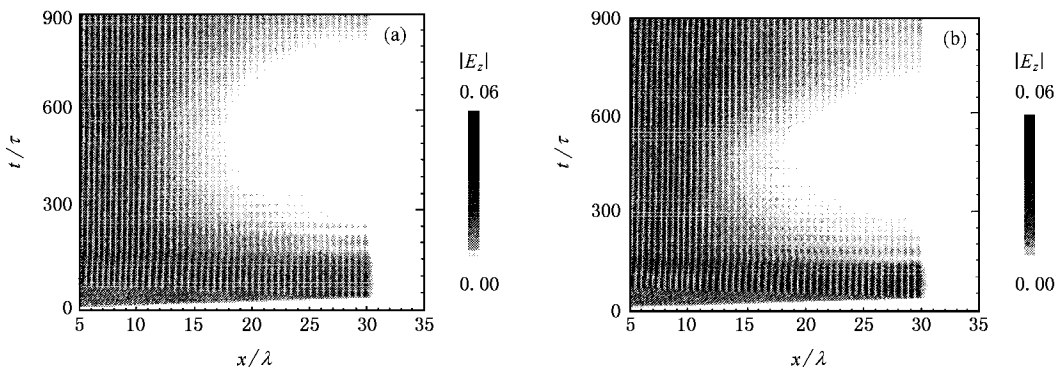


图5 (a) $a_0 = 0.03$, $n_0 = 0.2n_c$ 时激光场随时间和空间的演化 (b) $a_0 = 0.04$, $n_0 = 0.2n_c$ 时激光场随时间和空间的演化

我们还考虑了低密度等离子体区域长度的影响.数值模拟结果可以看出,即使发生相位反射,激光场也可以透过等离子体边界附近的一个小范围.理论计算表明,只要整个低密度等离子体区域不是只含仅仅几层周期结构,那么低密度等离子体区域的长度对相位反射的影响就很小.正如图4(b)和(c)所示的那样,即使在只有5层周期结构的情况下,也会产生相当大的反射率.在我们的研究中,预等离子体区域的长度是 $L = 20\lambda$,也就是能形成大约40层的周期结构,所以粒子在模拟结果中可以看到明显的相位反射现象.

另外,除了上述参数的影响之外,激光的脉宽对相位反射持续的时间也有一定的影响.如果激光的脉宽太短,以至于入射光和反射光的叠加来不及产生比较明显的密度调制,那么相位反射也不会被观察到了.

4. 结 论

除了可以在固体靶前的预等离子体中观察到单激光束产生的相位反射现象外,当两束激光相对入射到等离子体中时,也会由于相位反射产生导致等

离子体中出现光场的空洞现象,这有利于更清楚地理解等离子体中发生的这一特殊的反射现象.我们进一步的研究也表明相位反射持续发生的时间、反

射率的高低与等离子体的密度、等离子体区域的长度、激光强度、脉宽等都有着一定的关系,它们都会对激光在等离子体中的传输产生影响.

- [1] Yeh P 1988 *Optical Waves in Layered Media*(New York : John Wiley & Sons Inc.) p123 ,129
 [2] Nebenzahl I , Ron A , Rostoker N 1988 *Phys. Rev. Lett.* **60** 1030
 [3] Ma J X , Chen R Q , Xu Z S 1991 *J. Opt. Soc. Am. B* **8** 1442
 [4] Gupta G P , Sinha B K 1998 *Physics of Plasmas* **5** 2252
 [5] Andreev A A , Platonov K Y , Salomaa R E 2002 *Physics of Plasmas*

9 581

- [6] Sheng Z M , Zhang J , Umstadter D 2003 *Appl. Phys. B* **77** 673
 [7] Zhang P , Saleh N , Chen S *et al* 2003 *Physics of Plasmas* **10** 2093
 [8] Zhang Q J , Sheng Z M , Cang Y , Zhang J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4217 (in Chinese) [张秋菊、盛政明、苍宇、张杰 2005 物理学报 **54** 4217]

Vacancy of laser field induced by phase reflection in underdense plasmas and its relation to laser-plasma parameters^{*}

Zhang Qiu-Ju¹⁾ Sheng Zheng-Ming²⁾ Wang Xing-Hai¹⁾ Man Bao-Yuan¹⁾ Cang Yu²⁾ Zhang Jie²⁾

¹⁾ Department of Physics and Electrics , Shandong Normal University , Jinan 250014 , China)

²⁾ Laboratory of Optical Physics , Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China)

(Received 1 June 2005 ; revised manuscript received 7 November 2005)

Abstract

It is shown theoretically and by particle-in-cell simulations that the plasma density modulation produced by laser in underdense pre-plasmas can serve as a Bragg reflector , which results in phase reflection occurring at low-density plasma area . The phase reflection can influence the laser propagating in plasmas , such as the vacancy of laser field induced by two laser pulses counter-propagating in plasmas . It is also shown that the period of phase reflection and the reflectivity are related with the plasma density , thickness , intensity and the duration of laser .

Keywords : phase reflection , density modulation , laser plasma , particle-in-cell simulations

PACC : 5240D , 4225G , 5235M , 5265

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10476033 , 10547122 , 10474059) , the National High-Tech ICF Committee in China , and the National Key Basic Research Special Foundation (NKBRFSF) (Grant No. G1999075206)