

# 强激光与等离子体相互作用产生的超强太赫兹辐射\*

盛政明<sup>†</sup> 张杰

(中国科学院物理研究所光物理实验室 北京 100080)

**摘要** 超短强激光脉冲在等离子体中传播时会激发大振幅的等离子体尾波场,它是一种电子等离子体波.由于这是一种静电波,它一般不能转换成电磁辐射.我们发现在不均匀等离子体中激发的尾波场在一定条件下可以通过线性模式转换产生电磁辐射.由于用超短强激光脉冲尾波场可以达到的电场振幅达 100GV/m,其振动频率在太赫兹( $10^{12}$  Hz)附近,用这种方法可以产生电场强度达到 GV/m 的太赫兹辐射.

**关键词** 超短强激光脉冲,激光尾波场,电子等离子体波,超强太赫兹辐射

## Powerful terahertz emission produced in intense laser interaction with underdense plasmas

SHENG Zheng-Ming<sup>†</sup> ZHANG Jie

(Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

**Abstract** A high-amplitude laser wakefield, which is an electron plasma wave, can be excited by an ultra-short intense laser pulse. Because it is an electrostatic wave, usually it cannot radiate. However, it has recently been found that the laser wakefield can, under certain conditions, radiate in inhomogeneous plasma through so-called mode conversion. Because the wakefield can be driven at amplitudes higher than 100GV/m with an oscillating terahertz (THz) frequency, one can generate ultra-powerful THz emission with field amplitudes greater than GV/m. This may find applications in high-field condensed matter physics and other areas.

**Keywords** ultra-short intense laser pulses, laser wakefields, electron plasma waves, terahertz emission

激光尾波场是由激光有质动力在稀薄等离子体中激发的电子等离子体波.基于它在新型粒子加速器、激光频率上转换、激光脉宽压缩、激光强度提升等方面的应用前景<sup>[1]</sup>,过去二十年里这种波被广泛研究.针对这些应用激发的这种大振幅等离子体波的典型振动频率在太赫兹(THz,  $10^{12}$  Hz)附近.目前有关 THz 电磁辐射的产生和应用受到物理学界广泛关注.这种辐射的频率介于可见光和微波之间.凝聚态物质的声子频率、大分子的振转频率在 THz 波段有很多特征指纹谱并包含着非常丰富的物理和化学信息.因此,在物理、材料、生物、信息等领域,用 THz 辐射对研究对象进行扫描成像和光谱检测有着广泛的应用前景.但是,由于基于激光与固体材料作用产生的 THz 辐射受转换效率低和材料破坏阈值的限制,目前的技术难以获得高功率的辐射,无法满

足在某些重要应用方面的需求.譬如快速二维空间实时成像、强场凝聚态物理等研究需要场强达到 100MV/m 的 THz 辐射.为此,人们一直在寻找可以产生超强 THz 辐射的新方案.国际上一些重要研究机构都在开展用等离子体和高能电子加速器来产生超强太赫兹辐射.譬如,德国柏林电子储存环同步辐射公司通过利用超短脉冲电子束获得超强的相干太赫兹辐射<sup>[2]</sup>;美国劳伦斯伯克利实验室的科学家利用强激光产生的超短脉冲电子束,穿过介质表面,产生超强的太赫兹辐射<sup>[3]</sup>;美国的几个国家实验室联

\* 国家自然科学基金(批准号:10390160,10335020,10425416)、国家高技术研究发展计划惯性约束聚变主题和国家重点基础研究专项经费资助项目

2005-04-05 收到

† 通讯联系人. Email: zmsheg@aphy.iphys.ac.cn

合研究把超短脉冲激光作用砷化镓产生超短脉冲电子束,经过加速后通过同步辐射产生超强的太赫兹辐射<sup>[4]</sup>.

虽然在等离子体中可以激发大振幅的等离子体波,但由于它是静电波,具有与电磁波完全不同的色散关系,因此一般不能从中产生辐射.最近我们通过数值模拟和理论分析发现,等离子体波在一定条件下可以转换成电磁波,由此可以得到高效率的 THz 辐射<sup>[5]</sup>.这种转换方式被称为线性模式转换.

在 20 世纪 70—80 年代,在惯性约束聚变研究领域,人们对线性模式转换有深入的研究,因为它与入射激光在等离子体中的吸收有很大的关系.人们发现当激光以 P 偏振方式斜入射到有密度梯度的等离子体中时,入射激光在等离子体的临界密度(此密度对应的等离子体振荡频率与激光频率相同)附近通过线性模式转换激发起大振幅的电子等离子体波.这个模式转换之所以可以发生是因为在临界密度点波数  $k=0$ ,等离子体波的色散关系( $\omega^2 = \omega_p^2 + 3k^2 v_e^2$ )和等离子体中电磁波的色散关系( $\omega^2 = \omega_p^2 + k^2 c^2$ )重合.通过这种方式,入射激光能量最高可以有近 50% 转换成等离子体波的能量而被等离子体吸收.在 20 世纪 80—90 年代,Mean 等人 and Hinkel-Lipsker 等人分别研究了上述过程的逆过程<sup>[6]</sup>,即电子等离子体波转换成电磁辐射的过程.他们发现这个逆过程的转换效率与(激光转换成等离子体波的)正过程是一样的.在研究逆过程时假定等离子体波的波数为零,因此等离子体波和电磁波的色散关系重合.

在均匀等离子体中,激发的等离子体波的波数  $k = \omega_p / v_g \neq 0$ ,其中  $\omega_p$  和  $v_g$  分别为等离子体振荡频率和激光脉冲在等离子体中传播的群速度.因此一般不可能产生模式转换现象.这是均匀等离子体中等离子体波不能产生电磁辐射的原因.但在不均匀等离子体中,由于等离子体波在各处的振荡频率不同,由此导致等离子体波数随时间和空间发生变化.激发的等离子体波的局域振荡幅度可以写成:  $\delta = \delta_0 \cos[\psi(x, t)]$ ,其中  $\psi(x, t) = \omega_p(x)(t - x/v_g)$ ,  $\omega_p^2(x) = 4\pi e^2 n_e / m_e$ .假定沿着入射光的传播方向,等离子体密度随空间线性增大:  $n_e = n_0(x/L)$ ,那么等离子体波的波数  $k = -\partial\psi/\partial x = [\omega_p(x)/v_g][3x - v_g t]/2x$ .可见沿着直线  $x = v_g t/3$ ,  $k=0$ .在这种情况下等离子体波和电磁波的色散关系一样,模式转换就可能发生.假如等离子体密度以别的形式增大,则沿着别的曲线也能产生模式转换.

但是如果沿着入射光的传播方向,等离子体密度随空间减小,则可以通过类似的计算得出等离子体波数永不为零,所以模式转换不能产生.

另一方面,波数为零不是产生模式转换的惟一条件.等离子体波是静电纵波,而电磁波是横波.如果两者传播方向一样,则它们的电场方向相互垂直,因而也不能产生模式转换.如果入射激光的方向和等离子体密度梯度方向有一个夹角,那么可以造成两者的电场分量部分地平行,线性模式转换就可以发生.图 1 给出的产生模式转换的示意图,表示产生的低频电磁辐射相当于在入射光的反射方向.

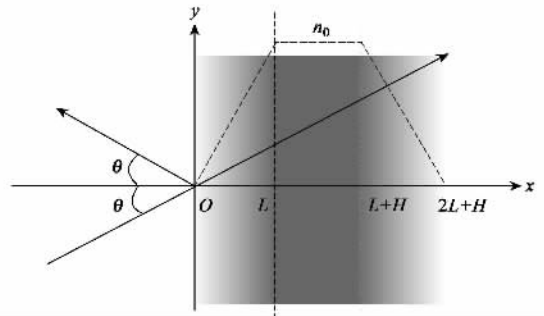


图 1 将光脉冲入射到不均匀等离子体中,激发的等离子体波可以通过模式转换产生低频电磁辐射

为了验证这个理论的可靠性,我们对这个问题做了粒子模拟 (particle-in-cell) 研究.首先我们采用一维的粒子模拟程序进行模拟.一维模拟程序之所以可以模拟这个二维的问题是因为通过洛伦兹变换把它变换到一个运动坐标系中<sup>[7]</sup>.图 2 给出了其中一个计算例子.它表明有很强的低频辐射从等离子体传播到真空区 ( $x/\lambda_0 < 50$ ).对于  $\sim 10^{17} \text{ W/cm}^2$  的入射激光强度,可以产生电场强度达到  $\text{GV/m}$ 、频率在十几 THz 的辐射,其瞬时功率高达 MW,脉宽在几十皮秒量级,能量为几十个  $\mu\text{J}$ .

由于产生的辐射机制是线性模式转换,辐射场正比于激发的等离子体波的振幅,而后者正比于入射激光的强度.因此在弱相对论激光强度下,辐射强度与入射激光强度平方成正比.数值模拟研究完全证实这个模式转换的理论模型.在强相对论激光强度下,辐射强度的定标有所下降,同时频谱结构有很大改变.这是因为在这种条件下,激发的等离子体波的振幅不再与入射激光强度成正比.同时,等离子体波破裂现象也可能发生,形成了复杂的频谱结构.图 3 的数值模拟表明了这些特征.

前面提到,一维平面激光脉冲需要通过斜入射到不均匀等离子体,其激发的等离子体波才能通过

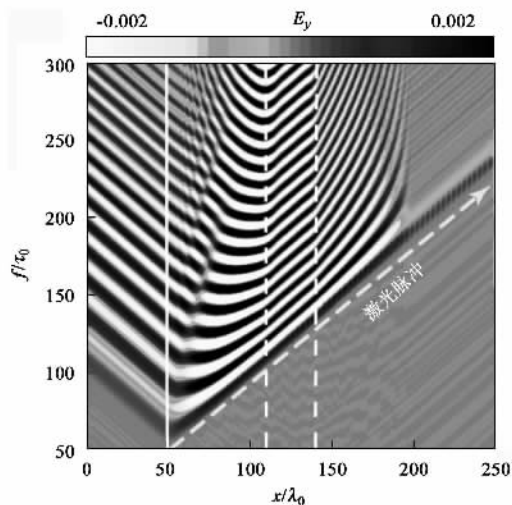


图2 利用一维粒子模拟得到的等离子体尾波场辐射的时空图 (入射激光强度约为  $3 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ , 脉宽  $20\lambda_0$ , 入射角为  $25^\circ$ . 等离子体密度从  $x = 50\lambda_0$  上升到  $110\lambda_0$ , 然后保持密度不变到  $140\lambda_0$ , 然后开始下降. 这里  $\lambda_0$  为入射激光波长,  $\omega_0$  为激光频率, 电场强度归一化到  $m_e \omega_0 c/e$ )

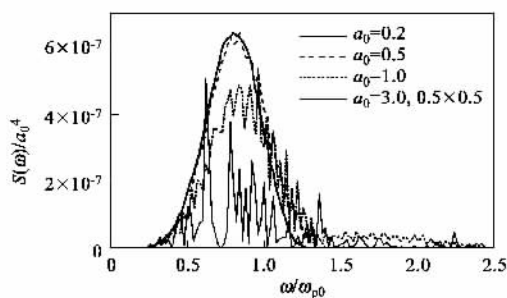


图3 通过粒子模拟得到的不同激光强度下的尾波场辐射的频谱 (在弱相对论激光强度下, 辐射强度与入射激光强度平方成正比. 在强相对论激光强度下, 辐射强度的定标有所下降, 同时频谱结构有很大改变. 图中入射激光归一化振幅  $a_0 = eE_0/m_e \omega_0 c$ , 辐射频率归一化到均匀等离子体区对应的等离子体频率)

模式转换产生辐射. 对于聚焦的光脉冲, 即使正入射到不均匀的等离子体中, 激发的等离子体波也会产生辐射. 由于光脉冲的有限横向尺度, 激发的等离子体波除了纵向的周期结构, 还有横向的结构. 这就是说同时有横向和纵向的波矢量存在. 这也相当于多路激光脉冲斜入射到不均匀等离子体中. 最后形成的辐射是以入射光轴为对称的锥状结构, 如图4所示. 辐射振幅在光轴上为零, 在光脉冲横向边缘处为最强. 图4(b)和(c)给出了从左边真空边界传出的电磁辐射随时间的变化和相应的频谱. 这个频谱一般有较宽的范围, 因为所有不均匀密度区的等离子体波都会产生辐射, 而不同的区域有不同的等离子

体密度, 对应于不同的振荡频率. 基于这点, 人们可以通过改变不均匀等离子体密度分布, 来改变产生辐射的频谱.

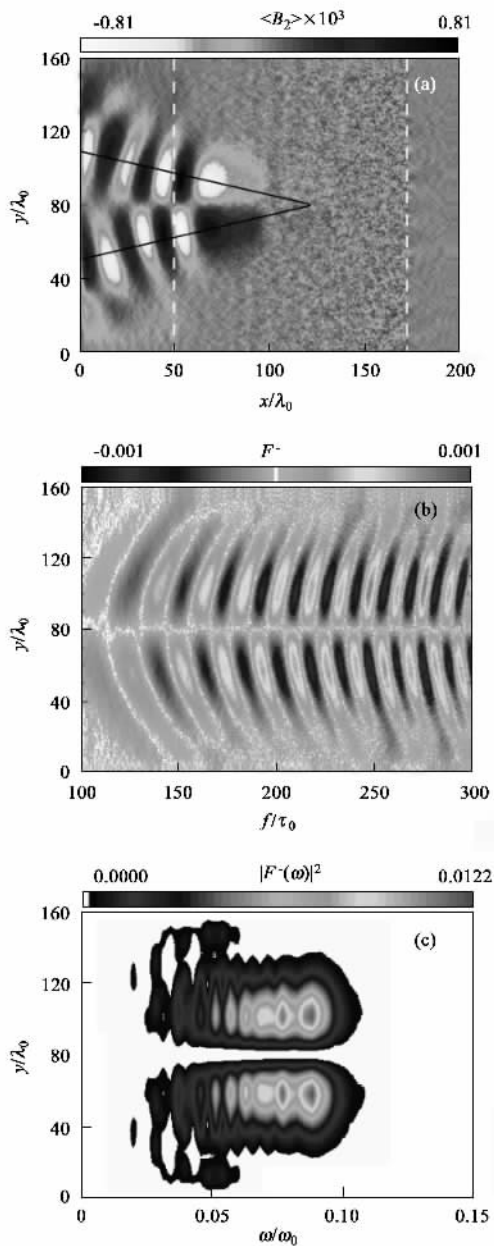


图4 (a)通过二维粒子模拟得到的某一时刻的电磁辐射分布, 入射激光强度约为  $3 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ , 脉冲的纵向和横向尺度均为  $20\lambda_0$  (b)从左边真空边界传出的电磁辐射随时间的变化 (c)从左边真空边界传出的电磁辐射的频谱

最后需要一提的是, 这个从等离子体波中产生的辐射除了可以作为强 THz 辐射源之外, 它还可以用来诊断等离子体波的振幅. 在本文最初提到的有关应用, 都与等离子体波的振幅密切相关. 而等离子

体波振幅的诊断比较困难,它比对其辐射的诊断要复杂得多.辐射的频谱还可以判断等离子体波破裂与否.在我们提出上述理论基础上,目前国内外多个实验室在准备探测等离子体波辐射.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Tajima T, Dawson J M. Phys. Rev. Lett. ,1979 ,43 :267 ;  
Wilks S C *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1989 ,62 :2600 ;Sheng Z  
M *et al.* Phys. Rev. E ,2000 ,62 :7258 ;盛政明等.物理 ,

2004 ,33 #00[ Sheng Z M *et al.* Wuli( Physics ) ,2004 ,33 :  
400( in Chinese ) ]

- [ 2 ] Abo - Bakr M *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2003 ,90 :094801  
[ 3 ] Leemans W P *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2003 ,91 :074802  
[ 4 ] Carr G L *et al.* Nature ,2002 ,420 :153  
[ 5 ] Sheng Z M ,Mima K ,Zhang J *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2005 ,  
94 :095003 ;Sheng Z M ,Wu H C ,Li K *et al.* Phys. Rev. E ,  
2004 ,69 :025401  
[ 6 ] Means R W *et al.* Phys. Fluids ,1981 ,24 :2197 ;Hinkel -  
Lipsker D E *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1989 ,62 :2680  
[ 7 ] Sheng Z M *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2000 ,85 :5340

### · 物理新闻和动态 ·

## 桌上聚变装置

美国物理学家在一个简单的桌面装置中在室温条件下产生了核聚变.加州大学洛杉矶分校( UCLA )的 Brian Naranjio , Jim Gimzewski 和 Seth Putterman 使两个氦核碰撞,产生了  $\alpha$  粒子、中子和能量( Nature ,434 :1115 ).这种装置有可能用于便携式中子发生器或微型太空船的推进系统,但不能作为能源使用,因为这种装置所消耗的能量大于产生的能量.

实验装置由厘米大小的圆柱状钽酸锂晶体组成,晶体周围是氦气.当这种晶体受热时,正负电荷将分别累积在晶体的相反的表面上.这样就产生一个电场.晶体带正电的表面上装有钨丝,电场的强度足以使钨丝尖端附近的氦原子电离.这些氦离子被从表面排斥开,并受到电场加速到一个氦化钨靶,在那里发生聚变反应.

该装置目前可每秒中发射约 900 个中子. UCLA 小组的人说,如果此装置的输出可增加约每秒钟一百万个中子,则可用作“简单的手掌大小的中子发生器”.使用氦代替靶中的氦将使中子产额增加 50 倍,优化装置的几何结构并增加束流将会使产额再增加 4 倍.

( 树华 编译自 Physicsweb News 27 April 2005 )



## 无锡市苏威试验设备有限公司

WUXI SUWEI TESTING EQUIPMENT CO., LTD.

苏威公司是一家集科研、设计及制造各类模拟气候环境试验设备的专业性企业。本公司现已通过 ISO 9001:2000 质量管理体系认证。产品有：适于作步入式恒温、高低温、高低温湿热、高低温交变湿热、恒定湿热、高温恒温、盐雾腐蚀、滴水淋雨、紫外灯(氙灯)耐气候、砂尘、霉菌、振动、跌落等各种试验的试验设备。

<http://www.wxsuwei.com>



GDJS-系列

高低温交变湿热试验箱



GDJS-系列

高低温交变湿热试验箱



GDJS-系列

高低温交变湿热试验箱



YWX/Q-系列

盐雾腐蚀试验箱

地址：无锡市山北双河大庄 1 号

电话：0510-3019806(总机)

邮编：214037

销售热线：0510-3725132 3723557

传真：0510-3739455

手机：0-1390619778

北京办事处：010-68633994 13671120840

广州办事处：020-31398162 13640248003