

靶的厚度对激光产生的 x 射线输运到 靶后能谱的影响*

王 薇¹⁾²⁾ 张 杰¹⁾ 董全力¹⁾ V. K. Senecha³⁾

¹⁾中国科学院物理研究所光物理开放实验室, 北京 100080)

²⁾首都师范大学物理系, 北京 100037)

³⁾Laser Plasma Division, Centre for Advanced Technology, Indore-452013, India)

(2002 年 6 月 1 日收到, 2003 年 6 月 2 日收到修改稿)

利用一维辐射流体动力学程序 MULTI 数值模拟研究了功率为 10^{14} W/cm²、脉冲宽度为 1 ns、波长为 0.35 μm 的短脉冲强激光辐照不同厚度的平面 Au 靶时, 靶厚度对靶背面 x 射线能谱结构和辐射强度的影响.

关键词: 激光等离子体, 辐射流体力学, x 射线转换

PACC: 9530, 5225

1. 引 言

对高功率激光与物质相互作用产生 x 射线物理过程的研究可以追溯到上世纪 70 年代^[1-9], 随着理论和实验研究的不断深入, 激光等离子体 x 射线的应用变得越来越广泛, 它在惯性约束核聚变、x 射线激光物理学和材料物理学等研究领域都有十分重要的意义^[10-18]. 特别是近 10 年来, 在实验室天体物理学研究中利用激光等离子体 x 射线辐射加热来产生类似天体等离子体的条件, 使得实验室中对天体物理的某些过程的研究成为可能^[19-25]. 在激光-x 射线转换物理的研究和应用中, 靶厚度对输运到靶背面的 x 射线辐射强度^[26]和 x 射线能谱都有一定的影响, 例如设计 x 射线辐射源的一个关键就是要通过对靶厚度的优化来保证在靶背面得到足够强的、近似黑体辐射谱分布的 x 射线辐射. 本文主要利用一维辐射流体动力学程序 MULTI^[27], 数值模拟研究了功率为 10^{14} W/cm²、脉冲宽度为 1 ns、波长为 0.35 μm 的短脉冲强激光辐照不同厚度的平面 Au 靶时, 靶厚度对靶背面 x 射线能谱结构和辐射强度的影响; 分析比较了靶背面 x 射线能谱的结构特征, 给出了不同厚度靶的靶后 x 射线能谱结构与能谱强度随时间的演化. 这些研究对于 x 射线能谱的诊断和辐射

热波信息的获取, 以及 x 射线源的设计等, 都具有一定的理论价值.

2. 物理模型

激光-x 射线转换的主要物理过程涉及激光与靶物质的相互作用、能量在等离子体中的传输以及 x 射线的产生和发射. 强激光与高 Z 固体靶相互作用时, 可以在靶表面迅速形成向外膨胀的高温等离子体, 入射激光在等离子体中主要通过逆韧致碰撞等各种吸收机理被靶物质吸收. 吸收的激光能加热电子到高温(几个千电子伏), 引起流体力学运动, 通过电子热传导将能量向高密度区输运, 同时发射大量 x 射线, 以辐射的形式进一步输运能量. x 射线产生主要有韧致发射和吸收、光电复合发射与吸收以及谱线的发射和吸收. 在具体的研究中需要对包括激光吸收、辐射流体力学方程和非平衡原子物理动力学方程组进行耦合求解. 本文采用一维辐射流体动力学程序 MULTI 求解耦合到辐射输运方程中的一维平面流体力学方程. 它包括由逆韧致吸收导致的激光能量沉积、能流受限的电子热传导和表列物态方程以及非局域热力学平衡原子物理. 程序中采用两种温度, 分别为物质温度 T_e 和辐射温度 T_{rad} . 在激光与靶的耦合过程中, 由于等离子体的性质和激

* 国家自然科学基金(批准号: 19825110, J0176034 和 60078008)和国家高技术研究发展计划资助的课题.

光产生的 x 射线辐射特征强烈地依赖于非局域热力学平衡原子物理过程,为此,在计算中对于高温、低密度的转换区我们采用晕区平衡模型(corona equilibrium model),而在低温、高密度的再发射区,则采用局域热力学平衡模型(local thermodynamic equilibrium model).对于辐射输运方程,我们采用多群方法处理,将能量在 1eV—5keV 范围内的光子划分成 20 个频率间隔不等的光子群.此外, MULTI 程序中所需要的靶材料 Au 的状态方程和不透明度数据表列可以由 Los Alamos SESAME library^[28] 索取;电子的限流因子 f 根据文献^[29] 取为 0.08;激光脉冲波形为正弦平方型.利用 MULTI 程序可以研究激光等离子体中 x 射线转换过程中的物理机理以及各种参量,如激光强度、波长、脉宽以及靶材料和厚度等对 x 射线转换的影响.

3. 数值模拟研究与分析

3.1. 靶背面 x 射线能谱的结构特征

利用一维辐射流体动力学程序 MULTI 可以模拟研究强激光与固体 Au 靶相互作用产生的 x 射线能谱的结构特征.图 1(a)为功率密度分别为 10^{14} 和 10^{16} W/cm²、脉宽为 1ns、波长为 $0.35\mu\text{m}$ 的激光辐照厚度为 $0.25\mu\text{m}$ 的 Au 靶时,在激光脉冲峰值时刻,频谱范围从 1eV—5keV 的靶后 x 射线能谱分布.由图 1(a)可以看到 x 射线能谱主要由三个发射带构成:位于低能区的 O 带(0.25—0.4keV)和 N 带(0.7—0.9keV),以及高能区的 M 带(2.4—2.6keV).这些发射带主要是通过电子的束缚—束缚跃迁过程,但是产生的区域不同,其中 M 带主要在高温低密度的晕区产生;N 带在临界面附近的转换区产生,而 O 带则是在低温高密度的再发射区产生.由图 1(a)还可以看到随激光功率密度的增大,N 带和 M 带的发射增强.这是由于当激光强度增强时,M 壳层和 N 壳层的离化增强,导致高能级向这两个能级上的谱线跃迁增强,从而 M 带和 N 带的强度大大增强.

图 1(b)和(c)给出功率密度为 10^{14} W/cm²、脉宽为 1ns、波长为 $0.35\mu\text{m}$ 的激光辐照厚度为 $0.25\mu\text{m}$ 的 Au 靶时,不同时刻的靶后 x 射线能谱分布.模拟结果表明在激光脉冲峰值时刻附近,能谱的结构特征比较明显,可以看到明显的 O 带和 N 带结构,但在

脉冲峰值后期,能谱主要由 O 带贡献.

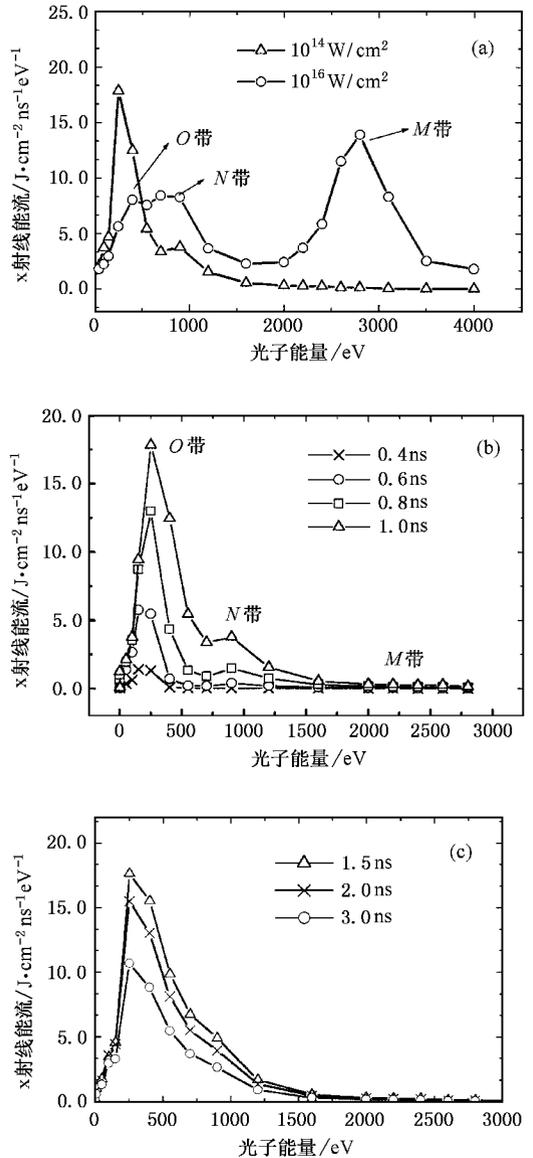


图 1 靶后 x 射线能谱的结构特征

图 2 将功率密度为 10^{14} W/cm²、脉宽为 1ns、波长为 $0.35\mu\text{m}$ 的激光辐照厚度为 $0.25\mu\text{m}$ 的 Au 靶时,靶后 x 射线能谱与等效温度的黑体辐射谱进行了拟合.结果表明 x 射线能谱与黑体辐射谱实际上是有-定的偏离,整个 x 射线能谱分布并不是真正的 Planck 谱^[30].但是鉴于 x 射线能谱主要是由低能 O 带贡献的,它与相应的黑体辐射谱基本上符合,为此我们常常视靶后 x 射线能谱为一个准黑体辐射谱.

图 3 示出功率密度为 10^{14} W/cm²、脉宽为 1ns、波长为 $0.35\mu\text{m}$ 的激光辐照厚度为 $0.5\mu\text{m}$ 的 Au 靶时,靶后 x 射线能谱随时间的演化过程.由图 3(a)可以看出,在激光脉冲初期($t = 0.4\text{ns}$ 和 $t = 0.6\text{ns}$)靶后 x

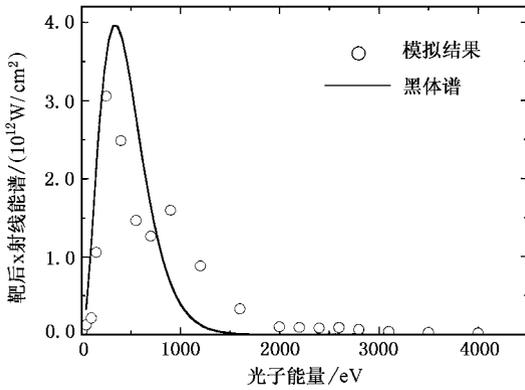


图 2 与黑体辐射谱的比较

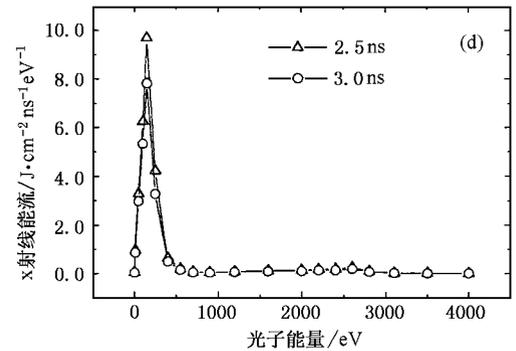
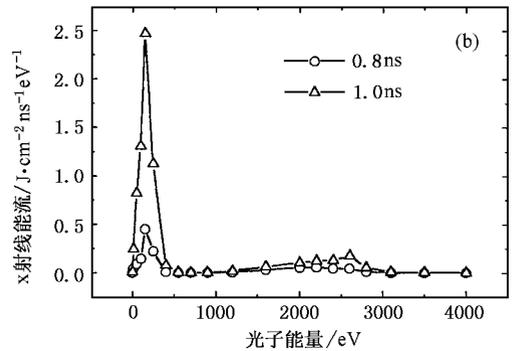
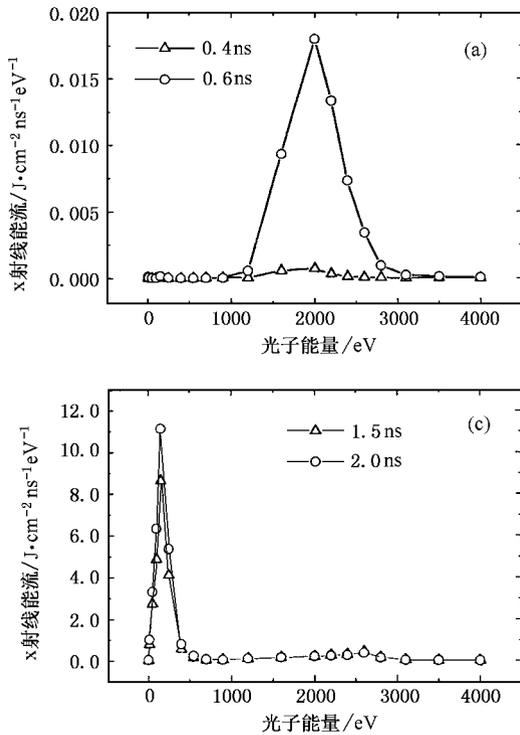


图 3 靶后 x 射线能谱随时间的演化过程

3.2. 厚度对 x 射线辐射强度和能谱结构的影响

在激光与高 Z 物质相互作用过程中, 吸收的激光能转换为物质的内能和动能, 同时以热辐射的形式流出系统. 图 4 给出 x 射线总的能量转换效率、流出系统的 x 射线总能流 (靶前 + 靶后) 和靶后 x 射线辐射能流随靶厚度的变化趋势. 结果表明对于厚度很薄的靶 (小于 $0.25\mu\text{m}$), 随靶厚度增加, 流出靶背面和系统的 x 射线能均持续增加, 但由于此情形下靶非常薄, 电子热传导很快把靶烧穿, 激光与靶耦合效率很低, 因而转移为 x 射线的能量实际很少. 当靶

射线能谱以 M 带为主, 这主要是由于高能 M 带的 x 射线穿透能力强, 而低能 O 带此时还没有输运到靶的背面. 随着时间的增加 (见图 3(b)), 显然在 $t = 0.8\text{ns}$ O 带强度开始迅速增强, 同时 M 带的强度也在继续增强. 在激光脉冲后期, 如图 3(c) 中 $t = 1.5\text{ns}$ 和 $t = 2.0\text{ns}$, 产生高能光子的晕区的温度因膨胀和激光功率衰减而降低, 导致 M 带发射强度开始衰减, 但由于此时辐射热波区的温度尚未能下降, 为此 O 带发射强度仍在继续增强. 图 3(d) ($t = 2.5\text{ns}$ 和 $t = 3.0\text{ns}$) 为激光脉冲过后的 x 射线能谱, 可以看出此时 M 带和 O 带的发射强度均衰减.

厚度增至 $0.25\mu\text{m}$ 时, 流出靶背面的 x 射线辐射能量将达到峰值. 之后 (靶厚度大于 $0.30\mu\text{m}$), 随靶厚度的增加, 流出系统的 x 射线能量开始趋于饱和, 而转换的 x 射线能量仍继续随靶厚度增加. 其增加的部分通过辐射热波加热物质. 由于辐射烧蚀的物质增多, 物质能量增加, 导致流出靶背面的辐射能量份额不断减少. 由此说明当靶厚度大于电子的烧蚀深度, 流出系统的 x 射线总能流几乎不再受到靶厚度的影响, 但对于流出靶背面的 x 射线辐射能量而言, 能流最大值对应有一个靶的最佳厚度值.

图 5 示出功率密度为 $10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$ 、脉宽为 1ns 、波

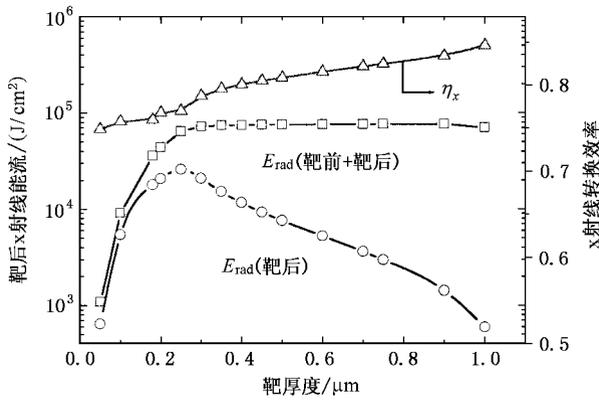


图 4 靶厚度对能量转换的影响

长为 $0.35\mu\text{m}$ 的激光辐照厚度分别为 0.25 和 $0.75\mu\text{m}$ 的 Au 靶时,靶后处于低能区的 O 带和高能区 M 带随时间的演化行为.

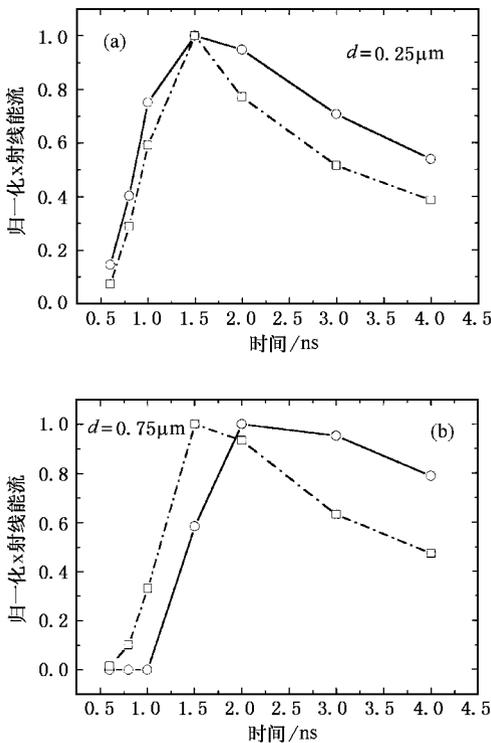


图 5 靶厚度对靶后 x 射线能谱时间行为的影响 ○为 O 带 □为 M 带

模拟结果表明对于 $0.25\mu\text{m}$ 的薄靶, O 带和 M 带的时间行为非常接近.而对于 $0.75\mu\text{m}$ 较厚的靶, O 带和 M 带的时间行为不再一致.比较图 5(a)与 (b)可以看到,对于高能区的 M 带,辐射峰值时刻不随靶厚度增加而变化,表明来自激光能量沉积区的 M 带辐射几乎直穿.对于低能区的 O 带,其辐射峰

值时间上的延迟随靶厚度的增加而增加.这是由于谱的低能部分(O 带)贡献于靶的加热(即辐射热波所贡献),只有当靶被烧透, O 带才能穿出.

图 6 给出靶厚度对靶后 x 射线能谱的影响.由图 6(a)可以看到厚度为 $0.25\mu\text{m}$ 的靶后 x 射线能谱的峰值位置较厚度为 $0.75\mu\text{m}$ 的靶后 x 射线能谱的峰值位置而言,将向低能区方向移动,同时峰值强度降低.图 6(b)给出靶厚度对靶后 x 射线能谱区的高能带(M 带)和低能带(O 带)的发射峰值强度的影响.结果表明随靶厚度的增加,高、低能带的发射峰值强度均随靶厚度的增加而衰减,且低能带较高能带强度衰减更为迅速.这主要是由于高能光子具有大的平均自由程,其穿透力远大于低能光子,为此靶物质对的低能 O 带的吸收要大于对高能 M 带的吸收,低能带的峰值强度衰减要比高能带更快.

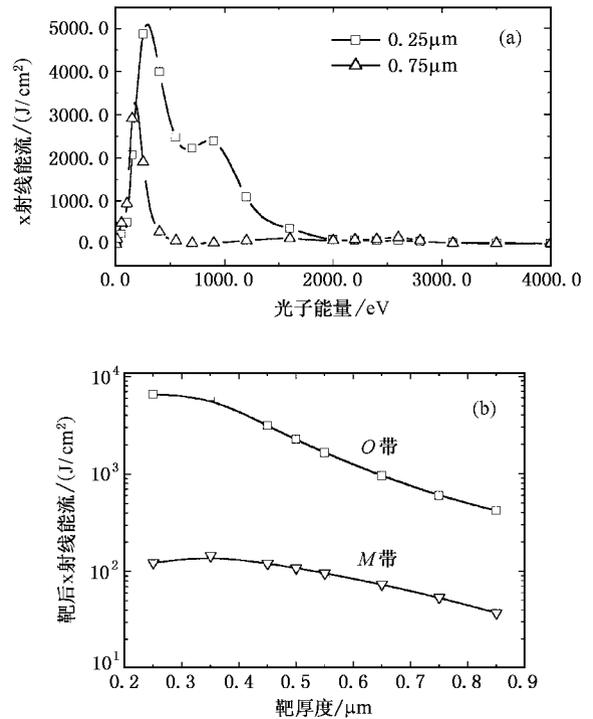


图 6 靶厚度对 x 射线能谱的影响

4. 结 论

本文利用一维辐射流体动力学程序 MULTI 分析研究了激光等离子体 x 射线能谱的结构特征以及靶厚度对靶后 x 射线能谱的影响.研究结果表明:

1. x 射线能谱主要是由高能区的 M 带和低能区的 O 带和 N 带构成,其中 M 带主要是在高温低密

度的晕区产生,而 N 带和 O 带则主要是在 x 射线转换区和辐射热波区产生.

2. 实际中我们所得到的 x 射线能谱并不是理想的黑体辐射谱,它与黑体辐射谱有一定的偏离,我们只能在某一个能量区域内将 x 射线能谱视为一个准黑体辐射谱.

3. 模拟研究了靶厚度对 x 射线能谱的影响.结果表明,当靶厚度大于电子的烧蚀深度,流出系统的 x 射线总的辐射能量几乎不再受到靶厚度的影响.但对于流出靶背面的 x 射线辐射,其辐射峰值对应一个最优厚度.

4. 分析比较了激光作用于薄靶和厚靶两种情

形下能谱的高能带和低能带的时间行为.结果表明,对于 $0.25\mu\text{m}$ 的薄靶, O 带和 M 带的时间行为非常接近.而对于 $0.75\mu\text{m}$ 较厚的靶, O 带和 M 带的时间行为不再一致.

5. 比较分析了厚度分别为 0.25 和 $0.75\mu\text{m}$ 的 Au 靶 x 射线能谱的性质.研究表明薄靶靶后 x 射线能谱的峰值位置较厚靶的峰值位置而言向低能区方向移动,峰值强度衰减.

上述研究对于 x 射线能谱的诊断、辐射热波信息的获取,以及 x 射线辐射源靶的设计等都具有一定的理论价值.

- [1] Shay H D *et al* 1978 *Phys. Fluids* **21** 1634
- [2] Rosen D *et al* 1979 *Phys. Fluids* **22** 2020
- [3] Matsuoka F *et al* 1983 *Phys. Fluids* **26** 1688
- [4] Mochizuki T *et al* 1987 *Phys. Rev. A* **36** 3279
- [5] Mead W C *et al* 1983 *Phys. Fluids* **26** 2316
- [6] Mead W C *et al* 1988 *Phys. Rev. A* **38** 5275
- [7] Goldstone P D *et al* 1987 *Phys. Rev. Lett.* **59** 56
- [8] Eidmann K and Kishimoto T 1986 *Appl. Phys. Lett.* **49** 377
- [9] Kodama R *et al* 1986 *J. Appl. Phys.* **59** 3050
- [10] Storm E *et al* 1988 *J. Fusion Energy* **7** 131
- [11] Mochizuki T *et al* 1987 *Phys. Rev. A* **36** 3279
- [12] Goodwin D G *et al* 1988 *J. Appl. Phys.* **64** 1005
- [13] Kuhne M *et al* 1988 *Appl. Opt.* **27** 3926
- [14] Jin Z *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 365 [in Chinese] 金 展等 2001 物理学报 **50** 365]
- [15] Wang W *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1517 [in Chinese] 王 薇等 2001 物理学报 **50** 1517]
- [16] Zhang S D and Zhang W J 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1512 [in Chinese] 张树东、张为俊 2001 物理学报 **50** 1512]
- [17] Liu M H *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1317 [in Chinese] 刘明海等 2002 物理学报 **51** 1317]
- [18] Zhang R M *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 914 [in Chinese] 张瑞明等 2001 物理学报 **50** 914]
- [19] Zhang J *et al* 2000 *Physics* **29** 392 [in Chinese] 张 杰等 2000 物理 **29** 392]
- [20] Xia J F and Zhang J 2001 *Physics* **30** 210 [in Chinese] 夏江帆、张杰 2001 物理 **30** 210]
- [21] Xia J F and Zhang J 2001 *Physics* **30** 340 [in Chinese] 夏江帆、张杰 2001 物理 **30** 340]
- [22] Remington B A *et al* 2000 *Phys. Plasmas* **7** 1641
- [23] Wark J S *et al* 1997 *Phys. Plasmas* **4** 2004
- [24] Ryutov D *et al* 1999 *Nature* **518** 822
- [25] Woolsey N C *et al* 2001 *Phys. Plasmas* **8** 2439
- [26] Wang W *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 590 [in Chinese] 王 薇等 2002 物理学报 **51** 590]
- [27] Ramis R *et al* 1988 *Comput. Phys. Commun.* **49** 475
- [28] Bennett B I *et al* 1987 Los Alamos report LA-7130
- [29] Sigel R *et al* 1990 *Phys. Fluids* **2** 199
- [30] Nishimura H *et al* 1991 *Phys. Rev. A* **43** 3073

Effects of target thickness on spectral characteristics of x-ray flux from the laser-produced plasmas^{*}

Wang Wei^{1,2)} Zhang Jie¹⁾ Dong Quan Li¹⁾ V. K. Senecha³⁾

¹⁾ *Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*

²⁾ *Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100037, China*

³⁾ *Laser Plasma Division, Centre for Advanced Technology, Indore-452013, India*

(Received 1 June 2002 ; revised manuscript received 2 June 2003)

Abstract

A detailed numerical simulation study of spectral characteristics of the x-ray flux from gold foil targets of different thickness irradiated by a 1ns laser pulse with 10^{14} W/cm² intensity at 0.35 μ m wavelength using the one dimensional radiation hydrodynamic code MULTI is investigated using one dimensional radiation hydrodynamic code MULTI. This is very important in the diagnosis of the x-ray spectrum and the design of an x-ray source.

Keywords : laser-produced plasmas , radiation hydrodynamics , x-ray conversion

PACC : 9530 , 5225

声 明

由于工作疏漏,本刊2000年第11期第2180页陈正林、张杰《对超热电子诱生的磁场分布的估算》的论文与2001年第4期第735页的论文重复刊登,现声明撤消2000年第11期第2180页的论文。

物理学报编辑部

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 19825110, 10176034 and 60078008), and the National High Technology Development Program of China.