

# 激光聚爆玻璃球壳靶中硅的X射线辐射谱 及各离化态粒子数密度分布\*

吴存悳 楼祺洪

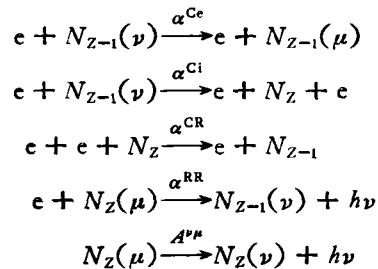
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

为了提高流体动力学特性,从而在较小的激光功率和能量下获得大的向心压缩,在激光核聚变的近期实验中,都采用充有氘氚热核燃料气或带有冷冻的固体氘氚衬里的玻璃球壳靶<sup>[1,2]</sup>.采用这种靶,已经获得了千倍以上的体压缩和大于 $10^9$ 个中子产额<sup>[3]</sup>.在一维三温度拉格朗日流体力学热核燃烧的计算机编码中,多半是将电子视为具有费密简并特性的粒子,而离子视为完全离化的理想气体<sup>[4-6]</sup>.为了获得好的流体力学性能,提出用低 $Z$ 材料做消融器,用高 $Z$ 材料做推进器的复合靶<sup>[7]</sup>.对于激光辐射的高 $Z$ 球壳靶所产生的等离子体,靶材粒子不能认为是完全离化的,其离化状态对流体动力学和热核燃烧过程有显著的影响<sup>[8]</sup>.在文献[8]中的二温度拉格朗日流体力学和热核燃烧的计算中,采用日冕平衡模型的经验公式简单地考虑了离化度对流体动力学和热核燃烧的影响.本文通过求解 SiXI, SiXII, SiXIII, SiXIV 和硅的全离化态的十三个能级粒子数密度的全速率方程,求得了硅的各个离化态的粒子数密度的时间分布.在计算中我们考虑了碰撞激发、碰撞离化、三体复合、辐射复合及辐射衰变五种过程.

计算了硅的类氢、类氦的八条线状辐射谱,计算了复合辐射谱.对于韧致辐射,我们分成二十个频率群,计算了韧致辐射谱分布.我们忽略了谱线线型的影响,简单地考虑了等离子体的自吸收效应.硅的五个高离化态十三个能级的能级图如图1所示.

碰撞激发速率表示为 $\alpha^{Ce}$ ,碰撞离化速率表示为 $\alpha^{Ci}$ ,三体复合速率表示为 $\alpha^{CR}$ ,辐射复

合速率表示为 $\alpha^{RR}$ ,爱因斯坦系数表示为 $A^{\nu\mu}$ ,这五种过程可表示为



其中 $\mu, \nu$ 分别表示束缚能级的高能态和低能态.三体复合过程是碰撞离化的逆过程.

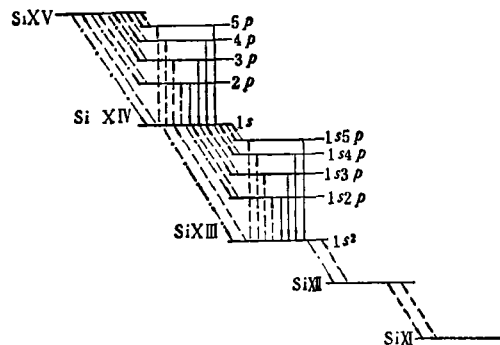


图1 计算中所考虑的硅的能级图

实验表明<sup>[9]</sup>,硅的X射线谱主要是由临界密度面以内且近于临界密度的等离子体发射出的.因此我们的计算由临界密度面开始.

设 $N_\mu$ 为第 $\mu$ 个能级的粒子数密度, $\alpha_{\nu\mu}$ 为由第 $\nu$ 个能级跃迁到第 $\mu$ 个能级的速率系数,则粒子数密度速率方程可表示为<sup>[10]</sup>

$$\frac{\partial}{\partial t} N_\mu = \sum_\nu \alpha_{\nu\mu} N_\nu, \quad (\mu, \nu = 1, 2, \dots, 13, \mu \neq \nu)$$

\* 1980年1月11日收到.

总的离子数为

$$N_i = \sum_{\mu} N_{\mu}$$

在计算中它为运动常数。速率系数  $\alpha_{\mu\nu}$  与电子温度及电子密度有关。电子密度可表示为

$$N_e = \sum_{\mu} Z_{\mu} N_{\mu}$$

式中  $Z_{\mu}$  为第  $\mu$  个能级所对应的离化度。线辐射的能量速率为

$$R_{\mu} = N_{\mu} A^{\nu\mu} (E_{\mu} - E_{\nu}),$$

式中  $E_{\mu}$  为第  $\mu$  个能级的能量。复合辐射能量速率为

$$S_{\mu} = N_{\mu} \alpha_{\nu\mu}^{RR} (E_{\mu} - E_{\nu}).$$

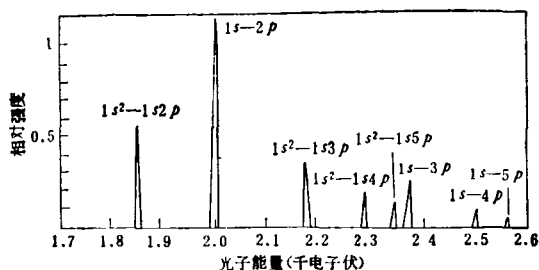
电子碰撞离化速率  $\alpha^{Ci}$  由 Scaton<sup>[11]</sup> 给出的公式计算。电子碰撞激发速率  $\alpha^{Ce}$  采用 Blaha 给出的公式<sup>[12]</sup>。其中吸收振子强度用 Allen<sup>[13]</sup> 给出的值,对于高能态采用外推值,平均 Gaunt 因子取自 Oran<sup>[14]</sup> 给出的值,将其线性外推至高能态。

三体复合过程是碰撞离化的逆过程,由细致平衡原理可求得三体复合速率  $\alpha^{CR}$ 。

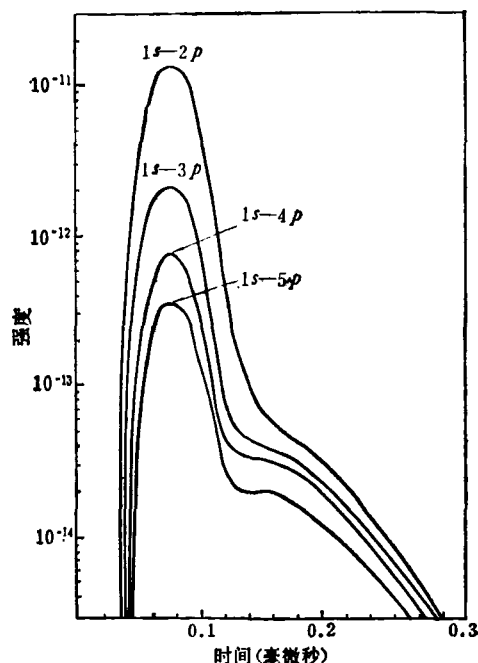
辐射复合速率  $\alpha^{RR}$  用 Scaton<sup>[15]</sup> 导出的公式。爱因斯坦系数  $A^{\nu\mu}$  取自文献[13]。

对于波长为 1.06 微米的激光,其临界电子数密度为  $N_e(0) = 10^{21}$  厘米<sup>-3</sup>。等离子体电子温度变化取自文献[8]。各能级初始粒子数密度分布由玻耳兹曼分布确定。初始平均离化度采用 Sheare 等人<sup>[16]</sup>基于日冕平衡模型得到的经验公式。等离子体自吸收的影响,用 Holstein<sup>[17]</sup> 给出的吸收系数公式。

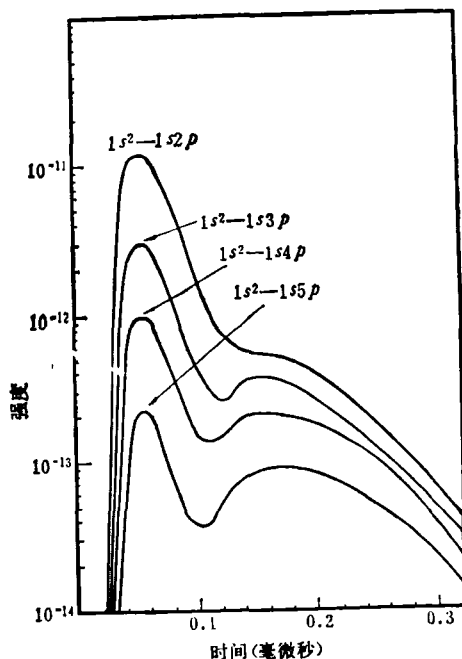
硅的类氢、类氦的 X 射线线辐射谱的计算



(a) 硅的类氢、类氦线辐射谱辐射强度;



(b) 硅的类氢线辐射功率随时间的变化;



(c) 硅的类氦线辐射功率随时间的变化

图 2 硅的类氢、类氦 X 射线线辐射谱的计算结果

结果绘于图 2 中。由图 2 可以看出类氢和类氦线谱的峰值输出功率点对应于不同的时间。玻璃球壳的聚爆时间约为 200 微微秒。

硅的类氢、类氦线辐射谱的实验结果<sup>[18]</sup>绘于图3中。由图3可以看出,理论计算与实验结果符合得较好。

硅的五个高离化态粒子数密度随时间的变化曲线绘于图4中。由图4可以明显地看出完全离化的近似是很粗糙的。

硅的复合辐射谱的截止频率分布绘于图5中。相应于硅的五个高离化态的十三个能级有十二个复合辐射的截止频率。

电子温度为  $T_e$  的等离子体,在单位时间、单位体积、单位立体角、单位频率间隔所发射的

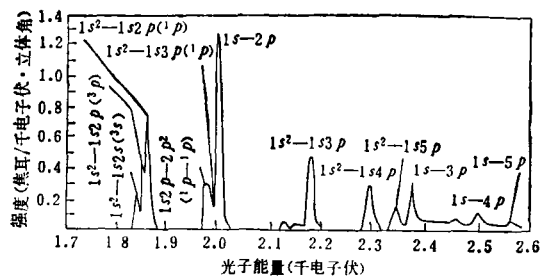


图3 硅的类氢、类氦线辐射谱的实验结果

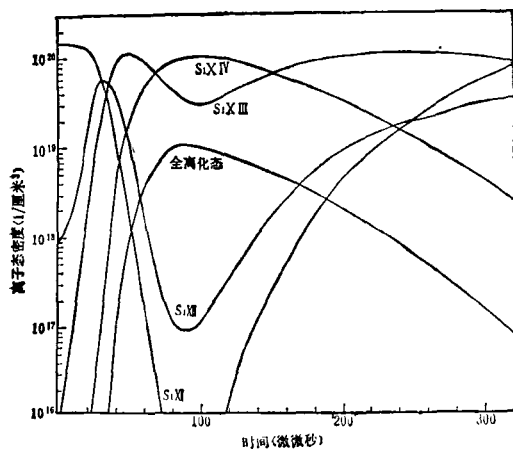


图4 硅的五个高离化态的粒子数密度随时间的变化

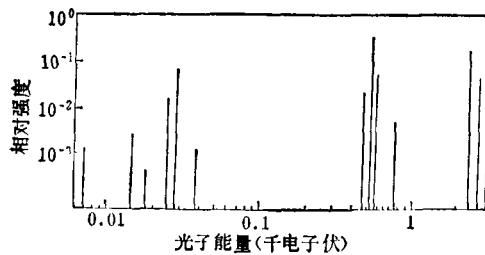


图5 硅的复合辐射截止频率谱分布

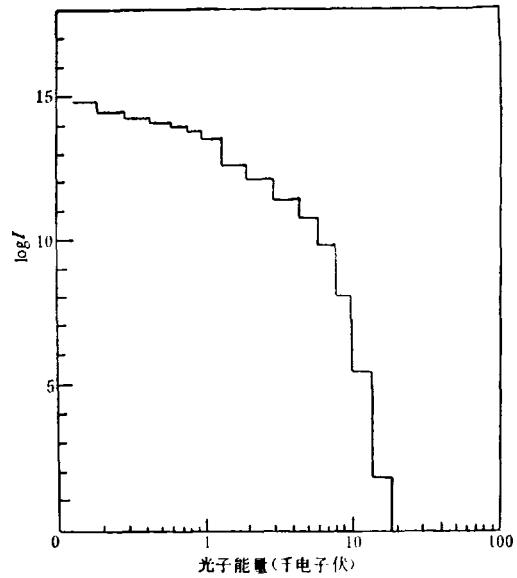


图6 硅等离子体临界密度面附近的韧致辐射谱

韧致辐射谱的功率为<sup>[4]</sup>

$$S_b(\nu) = 1.6077 \times T_e^{1/2} N_e N_i Z^2 h K_0(h\nu/2kT_e) \cdot \exp(-h\nu/kT_e),$$

式中  $K_0(x)$  为修正的贝塞尔函数,为了计算韧致辐射功率谱,我们将 0 至 100 千电子伏能量范围分成二十个频率群,其计算结果绘于图6中。由图6可以看到,在临界密度面附近的韧致辐射没有能量高于 70 千电子伏的高能部分,且大于 20 千电子伏的韧致辐射很弱。计算的韧致辐射强度低于实验测量的总的 X 射线辐射强度近一个数量级。这就表明,等离子体的韧致辐射大部分是来自于临界密度面以内的靶心部分。

谭维翰、徐兰展同志对本工作提出许多宝贵意见,潘仲雄、张文琦同志对计算机程序安排给与许多帮助,在此致谢。

### 参 考 文 献

- [1] P. M. Campbell, G. Charatics, G. R. Montry, *Phys. Rev. Lett.*, **34**(1975), 74.
- [2] T. M. Henderson, R. R. Johnson, *Appl. Phys. Lett.*, **31**(1977), 18.
- [3]  $\nu$ - $\nu$  研究, 4-4 (1976). Proceedings of the U. S. Japan Seminar on Laser Interaction with Mater. Laser Fusion Experiments at 2TW, H. G. Ahlsstrom.
- [4] G. S. Fraley et al., *Phys. Fluids*, **17**(1974), 474
- [5] R. J. Mason, R. L. Morse, *Phys. Fluids*, **18**(1975), (下转第10页)