

文章编号: 1007-4627(2002)02-0184-04

稠密、冷铝等离子体的辐射不透明度研究*

曾交龙, 靳奉涛, 袁建民

(国防科技大学理学院应用物理系, 湖南长沙 410073)

摘要: 使用细致谱项模型、联合组态相互作用方法和 R -矩阵方法计算了处于局域热动平衡条件下的稠密、冷铝等离子体的辐射不透明度. 组态相互作用方法用于获得束缚-束缚吸收截面所需要的偶极跃迁振子强度, R 矩阵方法用于获得光电离截面. 对于温度在 6—12 eV、密度为 0.36 mg/cm³ 的铝等离子体, 计算得到的吸收系数在波长为 0.351, 0.527 和 1.054 μm 处与实验结果符合较好, 而温度在 3—6 eV 时, 理论计算比实验结果大.

关键词: 铝等离子体; 辐射不透明度; 细致谱项模型

中图分类号: O53 **文献标识码:** A

1 引言

长期以来, 人们对等离子体的辐射不透明度具有强烈的兴趣, 这种兴趣主要是由于在惯性约束聚变和等离子体诊断等实际应用的急迫需要. 最近, 我们^[1]使用细致谱项模型模拟了激光产生的铝等离子体在两个典型的实验条件下^[2, 3]的 X 射线透射谱, 得到了与实验符合非常好的结果. 在此 X 射线区域, 吸收来自不同电离度的铝离子的 $1s$ 到 $2p$ 的内壳层跃迁. 在此以前, 已有一些理论工作对铝等离子体的透射谱进行了研究(例如, 参看文献[4, 5]), 但是他们把 $1s$ 到 $2p$ 的跃迁过程处理为分立的束缚-束缚跃迁, 并且在计算透射谱时只考虑了多普勒谱线展宽效应. 通过我们的工作^[1], 揭示了对这些 $1s$ 到 $2p$ 的内壳层激发态远在各价离子的单电子电离阈之上, 因而比较严格的处理应该考虑为光电离过程. 具体的工作表明, $1s$ 到 $2p$ 的内壳层激发态的自电离宽度比对应的多普勒宽度要大, 因而是主要的谱线展宽机制之一. 同时, 我们还对 Winhart 等^[6, 7]的实验条件下(温度为 20 eV, 密度为 0.01 g/cm³)的铝等离子体的光谱分辨的辐射不透明度和 Rosseland 及 Planck 平均不透明度进行了详细的研究^[8], 理论计算的透射谱与实验谱符合较好.

本文的目的是使用细致谱项模型计算处于局域热动平衡条件下稠密、冷铝等离子体的辐射不透明度, 重点是检验我们发展的细致谱项模型在较低光子能量处计算结果的准确性. Mostovych 等^[9]实验测量了温度在 1—11 eV, 密度为 0.36 mg/cm³ 的铝等离子体在探测波长为 0.351, 0.527 和 1.054 μm 处的吸收系数, 我们的理论结果将与实验结果进行对比.

2 理论计算方法

使用细致谱项模型计算等离子体不透明度的方法已在我们以前的文献[1, 8, 10]中进行了详细的描述, 本文仅给出计算的大概轮廓. 对处于局域热动平衡的温度为 T , 质量密度为 ρ 的等离子体, 在辐射能量为 $h\nu$ 的辐射不透明度为

$$\rho \kappa'(h\nu) = \left(\sum_i \left(\sum_{t'} N_i \sigma_{it'}(h\nu) + \sum_t N_i \sigma_{it}(h\nu) \right) + \mu_{\text{ff}}(h\nu) \right) \cdot \left(1 - e^{-h\nu/kT} \right) + \mu_{\text{scat}}(h\nu), \quad (1)$$

其中 $\kappa'(h\nu)$ 为总辐射不透明度, 一撇表示受激发射已包括在计算中, $\sigma_{it'}(h\nu)$ 是从谱项 t 到 t' 的光激发截面, $\sigma_{it}(h\nu)$ 是自谱项 t 的光电离截面, $\mu_{\text{ff}}(h\nu)$ 和

收稿日期: 2002-03-13; 修改日期: 2002-03-22

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19974075); 国家自然科学基金杰出青年基金资助项目(1002516); 中国国家高技术 ICF 委员会资助项目

作者简介: 曾交龙(1967-), 男(汉族), 湖南邵阳人, 副教授, 从事激光与物质的相互作用和等离子体辐射不透明度的理论研究.

$\mu_{\text{scatt}}(h\nu)$ 分别是自由-自由吸收过程和散射过程所贡献的吸收系数. N_{it} 为第 i 种离子的第 t 个谱项的粒子占据数, 它可由 Saha 方程和 Boltzmann 分布函数获得.

对某一给定的谱线, 束缚-束缚截面可由对应的振子强度得到:

$$\sigma_{it}(h\nu) = \frac{\pi h e^2}{m c} f_{it} S(h\nu), \quad (2)$$

其中 S 为光谱线形函数, h 为 Planck 常数, c 为真空中的光速, e 为电子电荷, m 为电子静质量. 本文中, 光谱线形取为 Voigt 轮廓, 其具体表达式见文献[8]. 振子强度由 MCHF^[11] 程序计算得到. 光电离截面使用密耦近似的 R -矩阵方法^[12] 得到.

自由-自由吸收系数为

$$\mu_{\text{ff}}(h\nu) = \sum_i N_i \sigma_{\text{iff}}(h\nu), \quad (3)$$

其中 $\sigma_{\text{iff}}(h\nu)$ 为 Kramers 截面:

$$\sigma_{\text{iff}}(h\nu) = \frac{16\pi^2 e^6 h^2}{3\sqrt{3}c(2\pi m)^{3/2}} \frac{z_i^3 N_e g_{\text{iff}}}{(kT)^{1/2} (h\nu)^3}, \quad (4)$$

其中 z_i 为离子电荷. 散射吸收系数 $\mu_{\text{scatt}}(h\nu)$ 通过 Thomson 散射截面获得.

3 结果与讨论

使用细致谱项模型对密度为 0.36 mg/cm^3 , 温度 $3\text{--}12 \text{ eV}$ 的铝等离子体的辐射不透明度进行了详细的研究. 作为例子, 图 1 给出了温度为 8 eV 时的光谱分辨的不透明度. 由图可见, 在光子能量 6 Ry (1 Ry (里德堡) = 13.605 eV) 以下, 不透明度结果较小, 而在光子能量 6 Ry 以上, 结果显著增加. 这是因为在 6 Ry 以上引起的吸收主要是由 Al III 的 $2p$ 光电离和 Al IV 的束缚-束缚跃迁引起的, 而这些离子有 6 个 $2p$ 电子. 事实上, 由电离平衡方程可得, 此时 Al IV 占 88% , Al III 占 10% . 对 Al IV 离子而言, 主要的束缚-束缚跃迁的跃迁能量大于 6 Ry , 因而小于 6 Ry 时的束缚-束缚跃迁吸收主要是由 Al III 离子引起的, 由于它所占的粒子数较少, 因而对吸收的贡献也小. 而在大于 6 Ry 的能量区域, 不但有 Al III 离子的 $2p$ 激发共振, 而且有 Al IV 离子的束缚-束缚跃迁的贡献, 因而引起的吸收大.

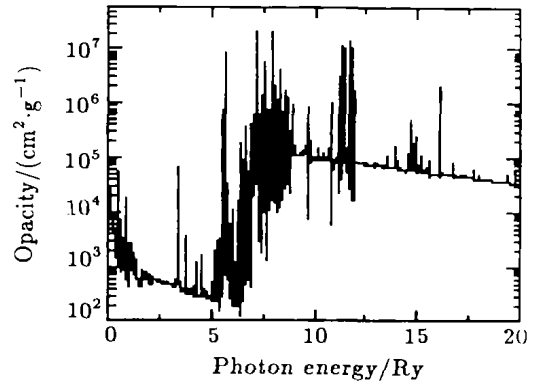


图 1 密度为 0.36 mg/cm^3 , 温度为 8 eV 的铝等离子体的辐射不透明度

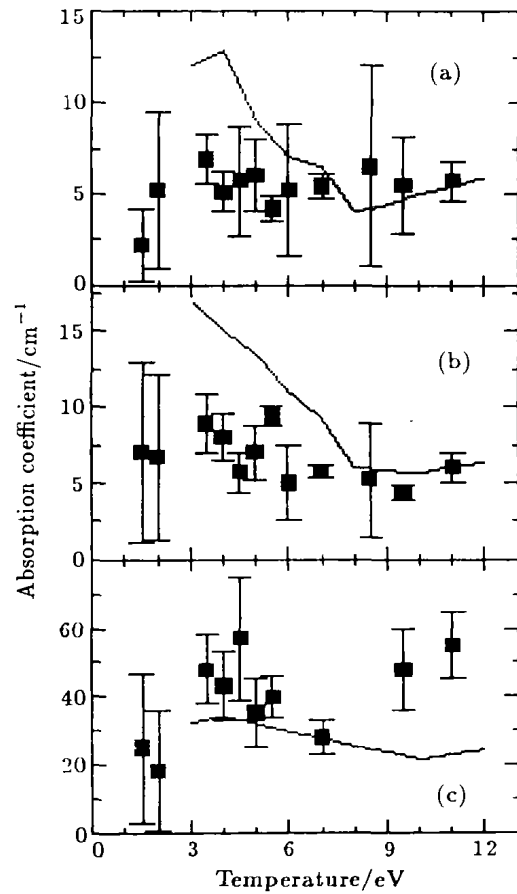


图 2 不同波长下吸收系数随温度变化的计算结果与实验结果的比较
—为本工作使用细致谱项模型的结果, ■为实验结果, 实验误差同时在图中标出.

我们发展的细致谱项模型在对 Rosseland 平均不透明度起主要作用的光子能量区域和更高的 X 射线能量区域获得了与实验符合很好的结果^[1, 8]. 下面检验在很低的光子能量区域, 此模型得到的结

果. Mostovych 等^[9]实验测量了铝等离子体在波长为 0.351, 0.527 和 1.054 μm (对应的光子能量分别为 3.532, 2.353 和 1.176 eV)处的吸收系数. 为了与实验结果进行对比, 下面将讨论在这些光子能量处的吸收系数.

表 1 Al III 的一些能级(相对于基态)

能级	能量/Ry
$(1s^2 2s^2 2p^6) 3s$	0.000 0
3p	0.490 6
3d	1.056 7
4s	1.149 7
4p	1.309 4
4d	1.510 8
4f	1.527 4

图 2 给出了在这些波长处我们计算得到的吸收系数随等离子体温度的变化关系. 由图可见, 在 1.054 μm 处, 理论结果与实验结果符合较好. 在温度为 9.5 和 11 eV 时, 实验结果比理论结果大一些, 这是由于在这些温度处, 实验中的等离子体偏离了局域热动平衡状态, 非热动平衡效应引起比较大的吸收系数. 在此波长处, 光子能量很低, 只有大约 1 eV, 主要的吸收来自自由-自由吸收. 根据我们的计算, 在温度小于 6 eV 时, 自由-自由吸收占全部吸收的 50% 左右, 而在温度大于 7 eV 时, 自由-自由吸收占全部吸收的 75% 以上. 由此可见, 我们发展的模型在这些等离子体条件下, 对自由-

自由吸收的处理是适当的.

在 0.351 和 0.527 μm 处, 温度较高时, 理论结果与实验结果符合不错, 但在温度小于 6 eV 时, 两者存在较大的差异, 理论结果比实验结果大. 在这些波长处, 光子能量比 1.054 μm 时大, 自由-自由吸收的重要性降低, 束缚-束缚吸收开始变得重要. 由电离平衡方程可得, 在温度 3—6 eV 时, Al III 离子的丰度较高, 因而它是引起吸收的主要因素. 表 1 给出了 Al III 离子能量较低的一些谱项结构. 由表可见, 3d—4p 的跃迁能量为 3.438 eV, 与 0.351 μm 时的光子能量 3.532 eV 非常接近, 由于电子碰撞展宽等谱线增宽因素, 此束缚-束缚跃迁必将在 3.532 eV 处产生较大的吸收. 然而, 实验结果在这些波长处的吸收较小, 与理论结果存在一定的差异, 其中的原因有待进一步进行实验和理论方面的研究.

总之, 本文使用细致谱项模型计算了密度为 0.36 mg/cm^3 , 温度在 3—12 eV 的铝等离子体的辐射不透明度, 特别研究了在较低光子能量处的结果以检验自由-自由引起的吸收. 在波长为 1.054 μm 处, 引起吸收的主要因素为自由-自由吸收, 理论结果与实验符合较好, 表明细致谱项模型对自由-自由吸收的处理是适当的, 在 0.351 和 0.527 μm 处, 温度大于 6 eV 时, 理论与实验符合较好, 温度在 3—6 eV 时, 理论结果比实验值高. 根据具体的计算, 此时束缚-束缚吸收起着重要的作用.

参 考 文 献:

- [1] Zeng Jiaolong, Jin Fengtao, Yuan Jianmin, *et al.* Detailed-term-accounting Approximation of X-ray Transmission Through Laser-produced Al Plasmas [J]. *Phys Rev*, 2000, **E62**: 7 251.
- [2] Davidson S J, Foster J M, Smith C C, *et al.* Investigation of the Opacity of Hot, Dense Aluminum in the Region of Its K Edge [J]. *Appl Phys Lett*, 1988, **52**(10): 847.
- [3] Perry T S, Davidson S J, Serduke F J D, *et al.* Opacity Measurements in a Hot Dense Medium [J]. *Phys Rev Lett*, 1991, **67**(27): 3 784.
- [4] Abdallah J Jr, Clark R E H. X-ray Transmission Calculations for an Aluminum Plasma [J]. *J Appl Phys*, 1991, **69**(1): 23.
- [5] Iglesias C A, Nash J K, Chen M H, *et al.* Observation on Radiation Transfer Experiments Using K-shell Absorption Spectra [J]. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 1995, **54**: 185.
- [6] Winhart G, Eidmann K, Iglesias C A, *et al.* XUV Opacity Measurements and Comparison with Models [J]. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 1995, **54**: 37.
- [7] Winhart G, Eidmann K, Iglesias C A, *et al.* Measurements of Extreme uv Opacities in Hot Dense Al, Fe and Ho [J]. *Phys Rev*, 1996, **E53**: R1 332.
- [8] Zeng Jiaolong, Yuan Jianmin, Lu Qisheng. Detailed Term Accounting Approximation Calculations of the Radiative Opacity of Laser-produced Al Plasmas [J]. *Phys Rev*, 2001, **E64**: 066 412.
- [9] Mostovych A N, Chan L Y, Kearney K J, *et al.* Opacity of Dense, Cold and Strongly Coupled Plasmas [J]. *Phys Rev Lett*, 1995, **75**(8): 1 530.

- [10] Zeng Jiaolong, Jin Fengtao, Yuan Jianmin. Detailed Spectral Line Effects on the Radiative Opacity of Laser-produced Al Plasmas [J]. *Chin Phys Lett*, 2001, **18**(7): 924.
- [11] Fischer C F. The MCHF Atomic-structure Package [J]. *Comput Phys Commun*, 1991, **64**: 369.
- [12] Berrington K A, Essner W B, Norrington P H. *R-matrix1*: Belfast atomic *R-matrix* codes [J]. *Comput Phys Commun*, 1995, **92**: 290.

Radiative Opacity of Dense, Cold Aluminum Plasmas*

ZENG Jiao-long, JIN Feng-tao, YUAN Jian-min

(*Applied Physics Department, Institute of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

Abstract: The radiative opacity has been investigated by using detailed term accounting approximation for dense, cold aluminum plasmas under local thermodynamic equilibrium. The configuration interaction scheme has been used to obtain the relevant atomic parameters for bound-bound absorption, such as excitation energies and oscillator strengths. *R-matrix* method has been used to obtain the photoionization cross sections. For aluminum plasmas of density 0.36 mg/cm^3 , temperature of 6—12 eV, the calculated absorption coefficients are in good agreement with the experiment, while for temperature of 3—6 eV, theoretical results are larger than that of the experiment.

Key words: aluminum plasma; radiative opacity; detailed term accounting approximation

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (19974075); National Natural Science Fund for Distinguished Yang Scholar(1002516); National 863 Technology Inertial Confinement Fusion of China