

文章编号: 0253-2239(2010)01-0241-05

飞秒激光空气等离子体通道的吸收和辐射特性

岳帅英^{1,2} 林 晨¹ 高军毅¹

(¹ 中国科学院武汉物理与数学研究所, 湖北 武汉 430071; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 研究了飞秒激光诱导单个空气等离子体通道的吸收和辐射特性,给出了等离子体通道吸收系数的解析表达式,并理论推导出了辐射能流率的表达式。与 TOPS 不透明度数据库查表方法比较,两种方法计算结果符合得很好。分析了吸收和辐射参量对入射激光参量的依赖关系。计算了中心波长 800 nm,脉宽 40 fs 的飞秒激光空气等离子体通道的吸收和辐射参量的典型数值。结果表明,成单丝情况下等离子体通道的 Rosseland 吸收系数为 0.0270 cm^{-1} ,辐射能流率为 $7.87 \times 10^{10} \text{ W/m}^2$;窄脉宽长波长的入射激光有利于生成吸收小辐射强的等离子体通道。

关键词 物理光学;吸收和辐射特性;飞秒激光脉冲;等离子体通道

中图分类号 O536 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103001.0241

Absorption and Emission Characteristics of Plasma Channel Produced by Femtosecond Laser Pulse in Air

Yue Shuaiying^{1,2} Lin Chen¹ Gao Junyi¹

(¹ Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)
(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The absorption and emission characteristics of single plasma channel produced by femtosecond laser pulse in air have been investigated theoretically. Analytical expressions of Rosseland mean absorption coefficient and radiant energy fluence rate are deduced. It is found that our analytical results are consistent with data from TOPS opacities database. The dependences of absorption and emission characteristics on initial laser parameters are studied. Calculation of such quantities for air plasma channel induced by laser pulse with 800 nm central wavelength and 40 fs pulse width is carried out. Results indicate that, in the case of single filament, the average Rosseland mean absorption coefficient is 0.0270 cm^{-1} , and total radiant energy fluence rate reaches $7.87 \times 10^{10} \text{ W/m}^2$. Incident fs laser with shorter pulse width and longer wavelength furns out advantage to producing weak absorbing and strong radiative plasma channel.

Key words physical optics; absorption and emission characteristics; femtosecond laser pulse; plasma channel

1 引 言

飞秒激光脉冲在透明介质中的自导传输过程和宽带激光雷达大气遥感探测^[1,2]、太赫兹波产生^[3]等领域的潜在应用,引起了国内外研究人员的广泛兴趣。达到自聚焦阈值功率的飞秒激光脉冲在空气中传输时,会出现成丝现象,留下长达几米至数百米的等离子体通道^[4~10]。入射激光脉冲和新生相干超连续光谱^[10]在等离子体中传输时发生复杂的吸

收-发射过程,这种过程制约了超连续光谱的转换效率。另外,在利用激光等离子体通道产生相干太赫兹波辐射的方法中,太赫兹波的产生效率也受激光脉冲与等离子体的相互作用制约。飞秒激光诱导等离子体的应用中,吸收和辐射特性是一个重要的研究课题。目前,关于激光诱导高温高密度等离子体的吸收和辐射特性^[11~14]的研究较多,而对激光诱导空气等离子体细丝的吸收和辐射特性的研究较少。

收稿日期: 2009-02-16; 收到修改稿日期: 2009-03-26

基金项目: 国家自然科学基金(10475110)资助课题。

作者简介: 岳帅英(1982—),女,博士研究生,主要从事飞秒激光脉冲传输方面的研究。E-mail: yuesy2009@126.com

导师简介: 高军毅(1956—),男,研究员,博士生导师,主要从事大气光学和激光光谱学等方面的研究。

E-mail: gaojunyi@wipm.ac.cn(通信联系人)

本文通过数值拟合得到等离子体通道吸收系数的解析表达式、理论推导辐射能流率的表达式,提供了一种计算等离子体通道吸收和辐射参数的直观方法;分析了入射激光参数对等离子体通道吸收系数和辐射能流率的影响;计算了中心波长 800 nm,脉宽 40 fs 的钛宝石激光脉冲诱导空气等离子体通道的吸收系数和辐射能流率数值。

2 激光等离子体通道的平均吸收系数和辐射能流率

实验与大量的理论计算^[4~10]表明,入射到空气的飞秒激光脉冲其功率密度在自聚焦阈值以上而小于 9 倍阈值的区域内,可以形成一段在时间、空间分布上相对稳定的单丝状激光等离子体通道。从理论上计算等离子体通道的吸收系数和辐射能流率,其过程为:先由平均激光场近似计算出通道中的电子密度和电子温度,由此确定对应的 Rosseland 辐射不透明度和 Rosseland 吸收系数,进而得到等离子体通道的吸收系数和辐射能流率。

2.1 电子密度、电子温度的简单计算

采用如图 1(a)所示的柱坐标系,激光脉冲沿 z 轴正方向传输,形成的等离子体通道呈柱对称。在不考虑大气扰动和电离能量损失时,飞秒高斯光束在空气中传输时光强空间分布近似保持高斯型^[6,15],激光脉冲时域峰值光强为

$$I(r, z) = I_0(z) \exp[-r^2/R^2(z)], \quad (1)$$

轴上光强 $I_0(z) = I_{th} = 10^{13} \sim 10^{14} \text{ W/cm}^2$, I_{th} 为自导光丝中光强的截止上限^[16]。在此光强下空气主要发生多光子电离过程^[5,6],不考虑电场的瞬态效应,平均电子数密度(单位为 cm^{-3})近似表达为

$$n_e \approx n_n W_{mp} [I(r, z)] \tau. \quad (2)$$

在飞秒高斯脉冲激光场中,电子的动能可由纵向有质动力势能^[7]计算,电子温度(单位为 eV)为

$$T_e(r) = \frac{2}{3} U_p(r) = 6.213 \times 10^{-14} (I \lambda^2), \quad (3)$$

式中 $U_p = \frac{e^2}{4m_e \omega^2} 2\mu_0 c I = 9.32 \times 10^{-14} (I \lambda^2)$ 为有质动力势能(单位为 eV), λ 为入射激光波长, $I = I(r, z)$ 为入射激光脉冲峰值强度, $I \lambda^2$ 约定单位为 $(\text{W/cm}^2) \cdot \mu\text{m}^2$ 。

以中心波长 800 nm,脉宽 40 fs 的钛宝石脉冲激光诱导单丝空气等离子体通道为例,图 1(b)显示了通道的电子密度、电子温度的径向分布,所用参数取值为 $I_{th} = 10^{14} \text{ W/cm}^2$,半径 $R = 50 \mu\text{m}$,长度 $L = 1 \text{ m}$ 。电子密度 $n_e = 4 \times 10^{14} \sim 1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,平均值 $3.76 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。电子温度 $T_e = 1.46 \sim 3.97 \text{ eV}$,平均值 2.96 eV。电子密度的分布与其他理论模拟结果^[5,6]一致,数值与国内外实验结果^[4]一致。平均电子温度与其他理论模拟^[7]和实验测量^[8]结果符合。由此方法得到的电子密度、电子温度的平均值是进一步计算等离子体吸收系数和辐射能流率的基本参数。

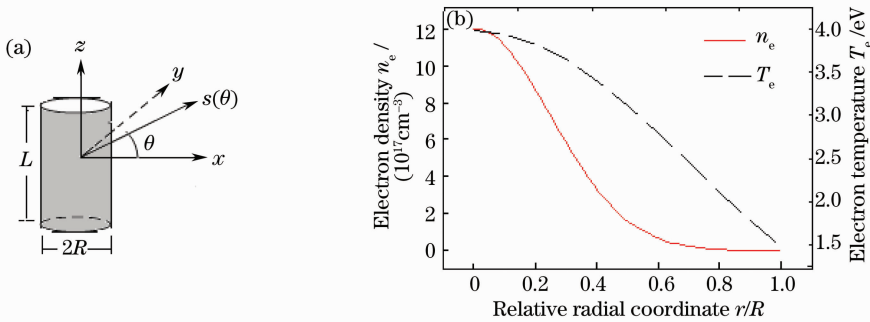


图 1 (a) 计算使用的坐标系;(b)等离子体通道电子密度、电子温度的径向分布

Fig. 1 (a) Coordinate for calculation; (b) radial distribution of electron density and electron temperature of plasma channel

2.2 等离子体通道的吸收系数

吸收是等离子体的一个重要特性,反映了等离子体对电磁波的衰减能力,它来自 4 个部分:束缚-束缚吸收、束缚-自由吸收、自由-自由吸收、电子对光的散射,它们与等离子体的分子类型、电子密度、电子温度和电磁波的频率有关^[11,12]。飞秒激光空气等离子体通道为低温低密度等离子体,其吸收系数可由下式确定:

$$\alpha_R(n_{em}, T_e) = n_{em} k_R(n_{em}, T_e), \quad (4)$$

式中 k_R 为 Rosseland 平均不透明度(单位为 cm^2/g),通过对频率积分平均得到; α_R 为 Rosseland 平均吸收系数(单位为 cm^{-1}),反映了等离子体对电磁波的平均衰减能力。 $n_{em} = 1.29 \times 10^{-3} n_e/n_n$ 为等离子体通道的平均电子质量密度(单位为 g/cm^3), T_e 为平均电子温度。 k_R 包含多项来源,尚无精确简单的解析表达式描述,其数值需要经过耗时巨大的数值计算才能

得到^[11,12]。由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室(LANL)提供的不透明度数据库 TOPS,可以得到离散密度、温度下物质的等离子体的 k_R 值,通过数值计

算和拟合,可以得到飞秒激光空气等离子体的吸收系数 α_R 的解析表达式。吸收系数 α_R 随电子质量密度 n_{em} 和电子温度 T_e 的变化情况如图 2 所示。

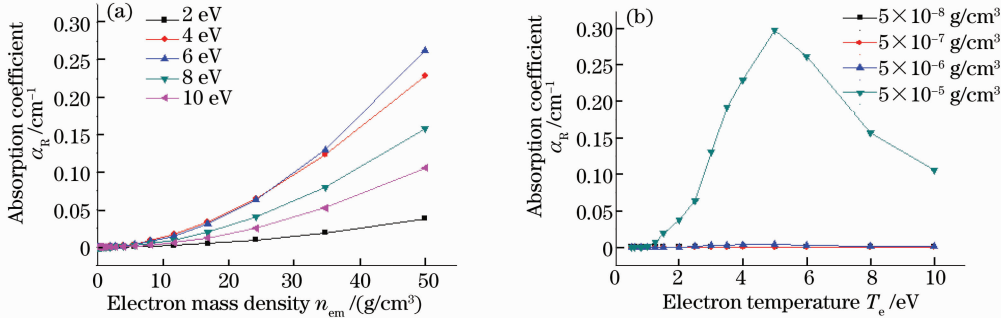


图 2 (a)不同电子温度时吸收系数随电子密度的变化趋势;(b)不同电子密度时吸收系数随电子温度的变化趋势
Fig. 2 (a)Dependence of absorption coefficient on electron density at different electron temperature; (b) dependence of absorption coefficient on electron temperature at different electron density

由图 2 表明:

1) $T_e = C$ 时, C 为常数, $\alpha_R(n_e, C) = a(n_e)^b$, 符合幂函数分布, 如图 2(a) 所示;

2) $n_e = D$ 时, D 为常数

$$\alpha_R(D, T_e) = \frac{A}{\sqrt{2\pi\omega T_e}} \exp\left[-\left(\ln \frac{T_e}{T_{ec}}\right)^2 / 2\omega^2\right],$$

符合对数正态分布, 如图 2(b) 所示;

3) 在 1) 情况下 a 值随 C 值的变化符合对数正态

分布; 在 2) 情况下, $\frac{A_1}{A_2} \approx \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^b$ 。

因此, 采用(5)式表示的幂函数与对数正态函数乘积的形式拟合 $\alpha_R(n_{em}, T_e)$ 是合理的

$$\alpha_R(n_{em}, T_e) = n_{em}^b \frac{A}{\sqrt{2\pi\omega T_e}} \exp\left[-\left(\ln \frac{T_e}{T_{ec}}\right)^2 / 2\omega^2\right]. \quad (5)$$

其中 4 个待定常数由拟合得到, 分别为

$$\begin{aligned} A &= 9.904 \times 10^6, & T_{ec} &= 6.182, \\ \omega &= 0.4414, & b &= 1.580. \end{aligned}$$

(5)式适用范围:

$$\begin{aligned} T_e &= 0.1 \sim 10 \text{ eV}, & n_e &= 10^{15} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}, \\ n_{em} &= 5 \times 10^{-8} \sim 5 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^3. \end{aligned}$$

(5)式表明, 吸收系数对电子密度成幂函数分布, 对电子温度成对数正态分布, 存在最大值点。这一结果与低温低密度的空气等离子体吸收主要来源于受激吸收和逆韧致辐射吸收的结论一致。

2.3 等离子体通道的辐射能流率

在低温低密度的飞秒激光等离子体通道中, 主要的辐射过程为热电子与中性粒子碰撞产生韧致辐射连续谱, 分子、原子和一价离子退激发辐射特征线谱, 低温的电子与离子碰撞复合产生复合辐射连续

谱。在局部热力学平衡状态下, 等离子体的发射与吸收满足基尔霍夫(Kirchhoff)定律, 发射的电磁波在通道内部的传输过程可以由输运方程描述。不考虑辐射随时间衰减时, 输运方程^[13,14]为

$$\frac{\partial I_s}{\partial s} = j_s - \alpha_s I_s, \quad (6)$$

式中 s 为电磁波传输路径的坐标。 I_s, j_s, α_s 分别为通道内部频率依赖的辐射强度、发射本领和吸收系数, 它们与电子密度 n_{em} 、电子温度 T_e 有关。对频率积分得到总的输运方程

$$\frac{\partial I}{\partial s} = j - \alpha_R I. \quad (7)$$

由基尔霍夫定律 $j_s = \alpha_s P_s$, 式中 P_s 为普朗克常数, 得到总发射本领 $j(s) \approx \alpha_R \sigma (eT_e/k)^4 / \pi$ 。式中 σ, e, k 分别为 Stefan 常数、电子电荷、玻尔兹曼常数。考虑等离子体通道纵剖面厚度为 d 的薄层, 经过此薄层到达与表面法线成 θ 角方向单位立体角内的辐射通量为[单位为 $(\text{W/m}^2) \cdot \text{sr}$]

$$S(\theta) = \int_0^{d/\cos\theta} j(s) \exp[-\tau(s)] ds. \quad (8)$$

通道近似均匀条件下, 光学深度 $\tau(s) \approx \alpha_R (d/\cos\theta - s)$, 得

$$S(\theta) = \frac{\sigma e^4 T_e^4}{\pi k^4} [1 - \exp(-\alpha_R d/\cos\theta)]. \quad (9)$$

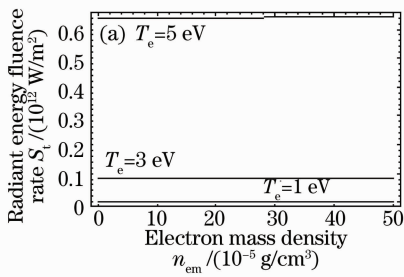
对半球的立体角积分得到薄层面元表面辐射能流率(单位为 W/m^2)

$$S_i(n_{em}, T_e) = 2\sigma \left(\frac{e}{k} T_e\right)^4 \left[1 - \int_0^1 t \exp(-\alpha_R d/t) dt\right]. \quad (10)$$

其中 $0 < t < 1$, 令 $d = 2R$ 即得到等离子体通道的辐

射能流率。

图 3 给出了辐射能流率对电子密度、电子温度



的依赖关系。图 3 表明辐射能流率随电子密度几乎无变化,随电子温度成幂函数增长。

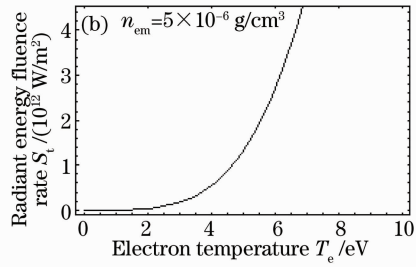


图 3 (a)辐射能流率随电子密度的变化情况;(b)辐射能流率随电子温度的变化情况

Fig. 3 (a) Dependence of radiant energy fluence rate on electron density at different electron temperature; (b) dependence of radiant energy fluence rate on electron temperatures

3 计算结果和讨论

3.1 两种方法的比较

为确认本解析方法计算激光等离子体通道吸收和辐射参数的精确程度,对同一条件下的飞秒激光等离子体通道,分别利用解析方法和 TOPS 不透明度数据库查表的方法计算了其吸收系数 $\alpha_R(n_{em}, T_e)$ 和辐射能流率 $S_e(n_{em}, T_e)$ 。两种方法计算结果

的比较情况如图 4(a)和(b),图中离散的点为查表方法得到的结果,而连续变化的曲面为解析方法得到的结果。由图 4 可见,解析方法不但能计算 T_e, n_e 连续变化时的 α_R, S_e 值,而且比查表方法更能直观地反应 α_R, S_e 对 T_e, n_{em} 的依赖关系。

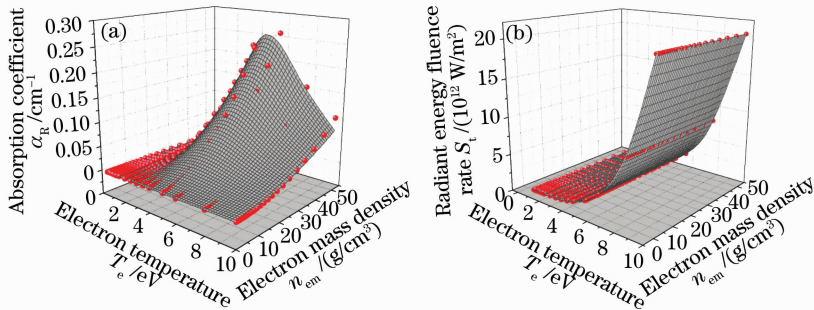


图 4 (a)用两种方法计算吸收系数的结果;(b)用两种方法计算辐射能流率的结果

Fig. 4 (a) Absorption coefficient obtained by analytical way and by TOPS opacities database; (b) radiant energy fluence rate obtained by the two ways

两种方法计算 $\alpha_R(n_{em}, T_e)$ 值的均方差为 9.02×10^{-4} , 计算 $S_e(n_{em}, T_e)$ 值的均方差为 2.0×10^{-6} 。对于平均电子密度 $n_{em} = 1.94 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^3$ 、平均电子温度 $T_e = 2.96 \text{ eV}$ 的飞秒激光空气等离子体通道,由解析方法和 TOPS 数据库查表方法得到吸收系数为 0.0270 cm^{-1} 和 0.0272 cm^{-1} ;得到辐射能流率有效结果为 $7.87 \times 10^{10} \text{ W/m}^2$ 和 $7.87 \times 10^{10} \text{ W/m}^2$ 。两种方法计算结果的误差均在 1% 以下。可见,由解析方法计算吸收系数,进而计算辐射能流率,不但方便直观,而且结果误差很小。

3.2 入射激光参数对吸收和辐射特性的影响

飞秒激光空气等离子体通道的吸收和辐射参数会随入射激光参数的改变而变化。由(2)式,(3)式,(5)式

和(10)式可知,吸收系数和辐射能流通过电子密度、温度而与入射激光光强、波长和脉宽有关。当入射激光功率大于自聚焦阈值并且小于 9 倍阈值时^[10],会形成不同长度的单丝等离子体通道。在此条件下,由于传输过程中光丝中峰值光强的截止效应^[16],改变入射激光功率可以改变通道的长度,但是对丝中电子密度、温度影响不大。图 5 显示了入射激光波长在 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$, 脉宽在 $10 \sim 500 \text{ fs}$ 范围内变化时,等离子体通道的吸收系数、辐射能流率的变化情况。

图 5(a)表明在形成单丝通道的条件下,入射激光脉宽较短时,等离子体通道的吸收系数随激光波长变化很小;脉宽较长时,吸收系数随波长缓慢增大。图 5(b)表明在形成单丝通道的条件下,辐射能流率随入射激光脉宽几乎不变,随入射激光波长成

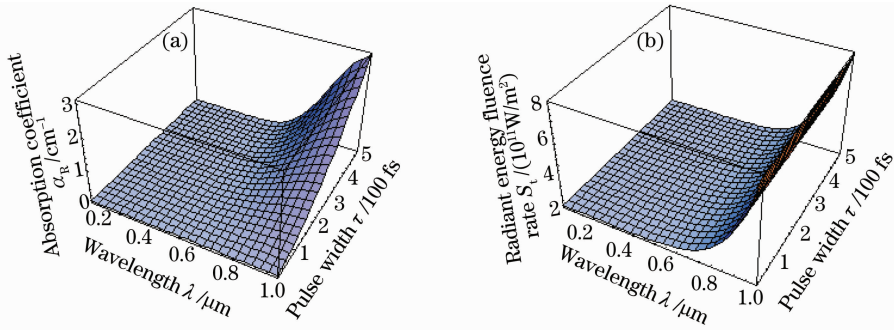


图 5 (a) 吸收系数随入射激光波长、脉宽的变化; (b) 辐射能流率随入射激光波长、脉宽的变化

Fig. 5 (a) Dependence of absorption coefficient on wavelength and pulse width of incident laser; (b) dependence of radiant energy fluence rate on wavelength and pulse width of incident laser

幂函数增大。可见,飞秒激光等离子体通道的应用中,可以通过改变入射激光波长、脉冲宽度来改变等离子体通道的吸收系数和辐射能流率。

4 结 论

本文采用数值拟合方法给出了空气中飞秒激光等离子体通道的吸收系数的解析表达式,并理论推导了辐射能流率的表达式,从而为计算吸收系数和辐射能流率提供了一种方便直观的方法。计算比较了本解析方法与通常采用的 TOPS 不透明度数据库查表法的精度,表明本解析方法不但方便直观,而且计算精度较高。利用上述解析表达式分析了入射激光参数对单丝等离子体通道的吸收和辐射特性的影响。具体计算了中心波长 800 nm、脉宽 40 fs 的钛宝石激光脉冲诱导空气等离子体通道的吸收系数和辐射能流率典型数值。本文的研究对激光诱导气体等离子体通道的实际应用具有重要指导意义。

参 考 文 献

- 1 G. Mejean, J. Kasparian, E. Salmon *et al.*. Towards a supercontinuum-based infrared lidar [J]. *Appl. Phys. B*, 2003, **77**(2-3): 357~359
- 2 F. Theberge, W. Liu, S. A. Hosseini *et al.*. Long-range spectrally and spatially resolved radiation from filaments in air [J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **81**(1): 131~134
- 3 Sun Bo, Yao Jianquan. Generation of terahertz wave based on optical methods[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1350~1357
孙 博, 姚建铨. 基于光学方法的太赫兹辐射源[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1350~1357
- 4 B. La Fontaine, F. Vidal, Z. Jiang *et al.*. Filamentation of ultrashort pulse laser beams resulting from their propagation over long distances in air [J]. *Phys. Plasmas*, 1999, **6**(5): 1615~1621
- 5 H. Yang, J. Zhang, W. Yu *et al.*. Long plasma channels generated by femtosecond laser pulses [J]. *Phys. Rev. E*, 2001, **65**(1): 016406

- 6 Shmuel Eisenmann, Anatoly Pukhov, Arie Zigler *et al.*. Fine structure of a laser-plasma filament in air [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **98**: 155002
- 7 F. Vidal, D. Comtois, C. Y. Chien *et al.*. Modeling the triggering of streamers in air by ultrashort laser pulses [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2000, **28**(2): 418~433
- 8 W. Liu, J. Bernhardt, F. Théberge *et al.*. Spectroscopic characterization of femtosecond laser filament in argon gas [J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **102**(3): 033111
- 9 Zhu Jiabin, Ji Zhonggang, Deng Yunpei *et al.*. Study on lifetime of a plasma channel induced by femtosecond laser pulses and an external electric field [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1059~1062
朱佳斌, 季忠刚, 邓蕴沛 等. 外加高压电场下空气中激光等离子体通道寿命研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1059~1062
- 10 A. Couairon, A. Mysyrowicz. Femtosecond filamentation in transparent media [J]. *Physics Reports*, 2007, **441**: 47~189
- 11 Zeng Jiaolong. *Study on the Radiative Opacity of Aluminum Plasmas Using a Model Based on the Detailed-Term-Accounting Approximation* [D]. Hunan: National University of Defense Technology, 2001. 30~51
曾交龙. 使用细致谱项模型研究铝等离子体的辐射不透明度 [D]. 湖南: 中国人民解放军国防科学技术大学, 2001. 30~51
- 12 Duan Yaoyong, Chen Zhihua, Guo Yonghui *et al.*. Approximate calculation of planck and rosseland mean opacities of Ne, Ar, Kr, Xe plasmas [J]. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 2002, **22**(3): 188~192
段耀勇, 陈志华, 郭永辉 等. Ne, Ar, Kr, Xe 等离子体 Planck 和 Rosseland 平均不透明度近似计算[J]. *核聚变与等离子体物理*, 2002, **22**(3): 188~192
- 13 Qiang Xiwen, Zhang Jianquan, Liu Feng. The theoretical research on radiation and self-absorption of laser-induced plasmas [J]. *Laser Journal*, 1999, **20**(6): 20~23
强希文, 张建泉, 刘 峰. 激光等离子体的辐射与自吸收现象研究[J]. *激光杂志*, 1999, **20**(6): 20~23
- 14 J. P. Apruzese, J. Davis, K. G. Whitney *et al.*. The physics of radiation transport in dense plasmas [J]. *Phys. Plasmas*, 2002, **9**(5): 2411~2419
- 15 H. Yang, J. Zhang, J. L. Ying *et al.*. Characteristics of self-guided laser plasma channels generated by femtosecond laser pulses in air [J]. *Phys. Rev. E*, 2002, **66**(1): 016406
- 16 J. Bernhardt, W. Liu, S. L. Chin *et al.*. Pressure independence of intensity clamping during filamentation: theory and experiment [J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **91**(1): 45~48