中 国 科 学

1987 年 3 月　　A 辑　　第 3 期

激光等离子体的快离子发射谱*

谭维翰 林尊琪 张燕珍 陆伟平 余文炎 邓锡铭

（中国科学院上海光学精密机械研究所）

摘　　要

本文报道用宽频带与窄频带 Nd 玻璃激光辐照平面 CD_2, Al, Ta 靶，靶面功率密度 $0.3\sim2\times10^{14}W/cm^2$. 在与光轴成 39°方向放置 Faraday 筒观察靶面快离子发射的时间波形. 打 CD_2 靶的快离子发射谱中，有表现 C, D 离子运动的两个峰；而打 Al 靶仅有一个峰，打 Ta 靶信号较弱. 我们用激光场加速电子、离子获得高的平动能，又通过电子-电子、电子-离子的碰撞使得部分平动能转化为热能，电子、离子均被加热获得高温的理论模型计算了离子的平动能、温度与由实验的离子峰值及宽度定出的平动能与温度基本相符. 也定性阐明了电子、离子温度与激光频带宽度的关系.

一、引　　言

前文[1,2] 报道了激光等离子体慢离子发射谱的时间波形以及激光频带宽度对慢离子发射角分布的影响. 本文则是用 Faraday 筒测定快离子发射波形的峰值位置和宽度，由此定出快离子的平动能和温度. 根据这些提出了电子、离子的加速、加热机制与通过碰撞的能量转移过程，从而揭示了快离子、慢离子的发生机制. 我们用 p 偏振与 s 偏振、窄频带与宽频带激光打 CD_2, Al 与 Ta 靶、发现在打 CD_2 靶时，快离子发射波形有两个峰，分别对应于 D 与 C 离子的运动；打 Al, Ta 靶时，则只有一个峰，对应于 Al 或 Ta 离子的运动，但打 Ta 靶的信号较弱. 我们采用的理论模型为：在临界面附近由于共振吸收产生强纵场加速电子[3]，逸出后便形成一静电加速场，加速那些最先离化的离子[4]，使之获得高的平动能，这些便是快离子. 这些快离子与被纵场加速后的（包括那些逸出后又回流过来的）高速电子相碰，便被加热. 至于快离子与离子相碰，因质量相等或同量级，有相当一部分平动能转移到较大偏离于碰撞前运动方向的无规运动能，导致离子慢化，这就是慢离子的重要来源之一. 当然热电子与离子碰撞作为产生慢离子的另一来源，也是不可忽略的. 根据理论模型，计算了离子的平动能与温度，得出与实验基本相符的结果，并定性地解释了激光频带宽度对加热的影响.

二、激光等离子体快离子的加速与加热理论

快离子的加速、加热理论主要解决激光能量怎样转换为快离子的平动能，又如何使得快离子获得高温的. 现分述如下.

本文 1986 年 5 月 29 日收到.

* 中国科学院科学基金资助课题.

1. 静电场加速带电粒子

激光在临界面附近由于共振吸收产生一纵的强场[3]驱动并加速电子，使之逸出，便形成一静电场 E 直接加速离子，其运动及连续方程为[4]

$$\frac{\partial v}{\partial t}+v\frac{\partial v}{\partial x}=\frac{z_e}{m_i}E, \tag{1}$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(n_i v)=0. \tag{2}$$

参照文献[4]将静电场 E 随时间 t 而变的函数形式取为 $E=2KT_e/\left(et\sqrt{\frac{z2KT_e}{m_i}}\right)$. 又将纵场能密度 $\frac{\varepsilon E^2}{8n}$ 用等效的激光场能 I/c 来表示. 便得

$$KT_e=\frac{8\pi z e^2 t^2}{2m_i\varepsilon}\left(\frac{\varepsilon E^2}{8\pi}\right)=\frac{4\pi z e^2 t^2}{cm_i\varepsilon}I. \tag{3}$$

由 E 的函数形式便得(1)，(2)式的等温膨胀解析解

$$n=n_0\exp\left(\frac{-x}{\sqrt{\frac{2zKT_e t}{m_i}}}\right),\qquad v=\sqrt{\frac{2zKT_e}{m_i}}+\frac{x}{t}. \tag{4}$$

离子向外膨胀的平均动能为

$$\frac{\int\frac{m_i}{2}nv^2dx}{\int ndx}=5KT_e.$$

对宽频带打靶情形，(3)式中的 tE 可采用无规位相近似[6,7]

$$tE\to\int_0^t\langle E_0e^{i\Delta\phi}\rangle dt'=E_0\int_0^t e^{-\Delta\omega t'}dt'=\frac{E_0}{\Delta\omega}(1-e^{-\Delta\omega t}),$$

(3) 式为 $KT_e=\frac{4\pi z e^2(1-e^{-\Delta\omega t})^2}{cm_i(\Delta\omega)^2\varepsilon}I\simeq\frac{4\pi z e^2 I}{cm_i(\Delta\omega)^2\varepsilon}$. (3)′

2. 电子、离子的碰撞加热

当光强 I，频宽 $\Delta\omega$，介电系数 ε 给定后，可由(3)′式计算 KT_e 及离子的平动能 $5KT_e$. 离子的加热升温则是靠高速或超热电子与离子的碰撞实现的. 超热电子温度 T_H 与激光功率密度 ϕ，波长 λ 的定标关系为[5] $T_H\propto(\phi\lambda^2)^\delta$. 超热电子与离子的碰撞加热可按下面方程描述：

$$\frac{dT_H}{dt}=-\frac{T_H-T_i}{\tau_{ei}},\quad \tau_{ei}=\frac{3T_e^{3/2}m_i}{8n_i z_i^2 e^4\Lambda(2\pi m_e)^{1/2}},$$

$$\frac{dT_i}{dt}=-\frac{T_i-T_H}{\tau_{ie}},\quad \tau_{ie}=\frac{n_i}{n_e}\tau_{ei}. \tag{5}$$

T_H，T_i 的解为：

$$T_H=T_{eq}+\frac{\alpha}{\tau_{ei}}\exp\left(-\left(\frac{1}{\tau_{ei}}+\frac{1}{\tau_{ie}}\right)t\right)$$

$$T_i=T_{eq}-\frac{\alpha}{\tau_{ie}}\exp\left(-\left(\frac{1}{\tau_{ie}}+\frac{1}{\tau_{ei}}\right)t\right),$$

$$T_{eq}=\frac{\tau_{ei}T_H^0+\tau_{ie}T_i^0}{\tau_{ei}+\tau_{ie}},\quad \alpha=\frac{T_H^0-T_0^i}{\frac{1}{\tau_{ei}}+\frac{1}{\tau_{ie}}}. \tag{6}$$

式中 T_e^0, T_i^0 为电子、离子的初始温度. 由于电子与电子碰撞到达热平衡是很快的,故上面只讨论了超热电子与离子的碰撞,未讨论高速电子与离子的相碰. 实际上高速、低温电子在与离子相撞前后,通过电子与电子相碰也很快变为超热电子; 在与离子相碰时,电子也能得到加热.

三、实验安排、结果与分析

实验中采用的宽频带与窄频带激光的参数为激光脉冲能量 2—10J,脉冲宽度 250ps, 靶面功率密度 0.3—2 × 10^{14}W/cm², 宽频带激光宽度 30 Å, 窄频带激光宽度 0.2 Å. 激光入射方向与靶面法线成 20°, 激光取 p 偏振或 s 偏振. Faraday 筒放在与激光光轴成 39° 方向, 与靶面距离为 18cm, 如图 1 所示. 示波器频带宽度为 500MC, 给脉冲宽度测量带来的误差不大于 5ns. 图 2—图 4 分别为宽带、窄带打 CD_2 靶的快离子发射波形,其参量见图注及表1. 图 5 为打 Al 靶的快离子发射波形. 仅有一个峰,平动能 KE 为 162keV. 图 6 为打 Ta 靶发射的快离子波形, 讯号很弱.

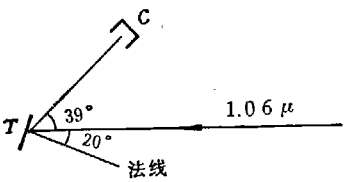


图 1 实验布置

表 1 列出了图 2—图 5 各实验编号照片的参量包括入射激光频带、偏振、能量 E (单位为 J), 快离子波形的峰值位置 t, 宽度 Δt (单位为 10^{-7}s)以及由此计算出来的平动能 KE, 温度 T (单位为 keV). 脚标 "1","2" 分别表示第 1、2 峰. 出现在前面的第 1 峰为 D 离子的波形;在后面的第 2 峰为 C 离子的波形. 由图 2—图 6 及表 1,可进行如下的一些讨论.

1. 对应于 D, C 快离子的平动能 K_1, K_2 几乎相等. 这是因为由(1),(3),(3)′式, KT_e 只依赖于离子的荷质比 z/m_i. 而 C, D 的荷质比为相同, 即 6/12=1/2, 故平动能也相同. 按(3)′式,取 $I=2\times10^{14}$W/cm², $\varepsilon=1-\omega_p^2/\omega^2=0.15$. $\Delta\omega=5\times10^{12}$s^{-1},测得 $KE=5KT_e=$ 48 keV. 这就是表 1 中所列各平动能同量级的数值. 按色散关系 $k\lambda=\sqrt{\omega^2-\omega_p^2}$, 得

$$\Delta\lambda=\lambda\frac{\Delta\omega}{\omega\sqrt{\varepsilon}}=68.5\text{ Å},$$

这就意味着入射窄带激光 $\Delta\lambda=0.2$ Å 经冕区及稠密等离子的扰动后,已被展宽至 68.5 Å. 而宽带 30 Å激光(半能宽度按 20 Å计算), 经同样扰动后, 将被展宽至 20 + 68.5 = 88.5 Å, 频宽为 $\Delta\omega'=6.5\times10^{12}$s^{-1}. 按(3)′式 $KT_e\propto(\Delta\omega)^{-2}$. 即宽频带激光打靶的参数 KT_e 比窄频带激光打靶下降 $\left(\frac{6.5\times10^{12}}{5\times10^{12}}\right)^2\simeq1.7$ 倍. 表 1 中数据已能初步看出窄带的平动能要比宽带的平动能略高. 实验编号 109, 110, 111 的平动能为 75, 59, 48keV; 实验编号 105,108, 103, 113 的平动能为 40, 48, 48, 48keV.

2. 表 1 中最后一栏 t_0 为慢离子信号的起始时间. 在文献 [1] 对慢离子波形进行计算时, t_0 是参照实验照片取定的. 从物理机制来看, 以 v_1 快速运动的 D 离子与静止的 C 离子相碰, 这 C 便是最快的慢离子, C 的末速为

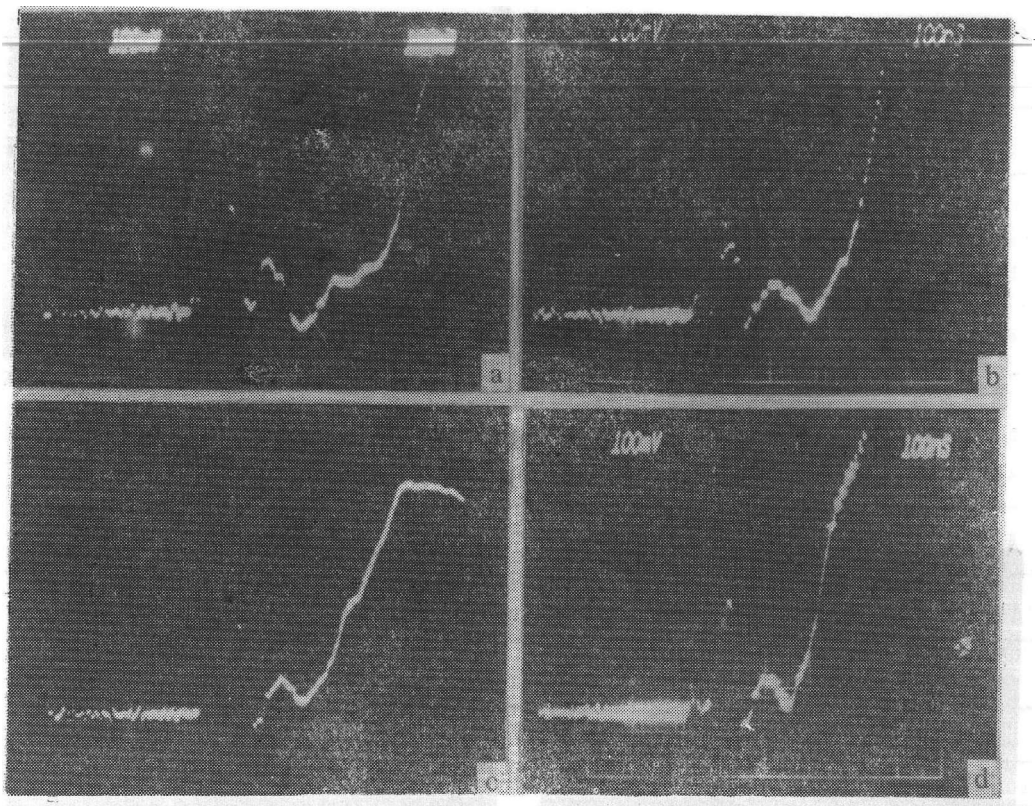


图 2　快离子信号

(a——实验编号 105，b——实验编号 108，c——实验编号 103，d——实验编号 113)

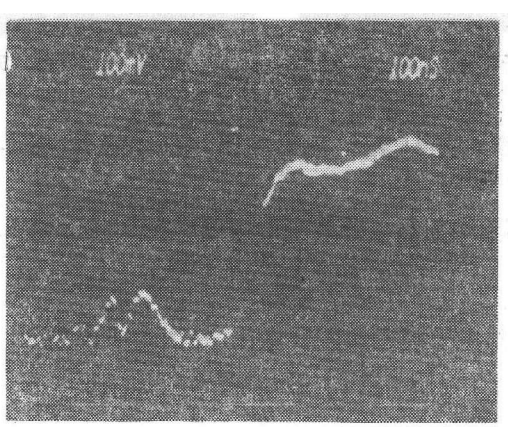


图 3　快离子信号

(实验编号 109)

$$v_c = \frac{18}{t_0} = \frac{2m_D v_1}{m_D + m_C} = \frac{2}{7}\frac{18}{t_1},\quad t_0/t_1 = 3.5. \tag{7}$$

用(7)式检验表 1 中打 CD_2 靶的 t_0，t_1，我们看到 $t_0/t_1 = 3$—4．基本与(7)式相符．但宽带打靶数据的相符情况，要比窄带好些．对打 Al 靶的实验编号 77，$t_0/t_1 = 1.8$．一个可能的碰撞

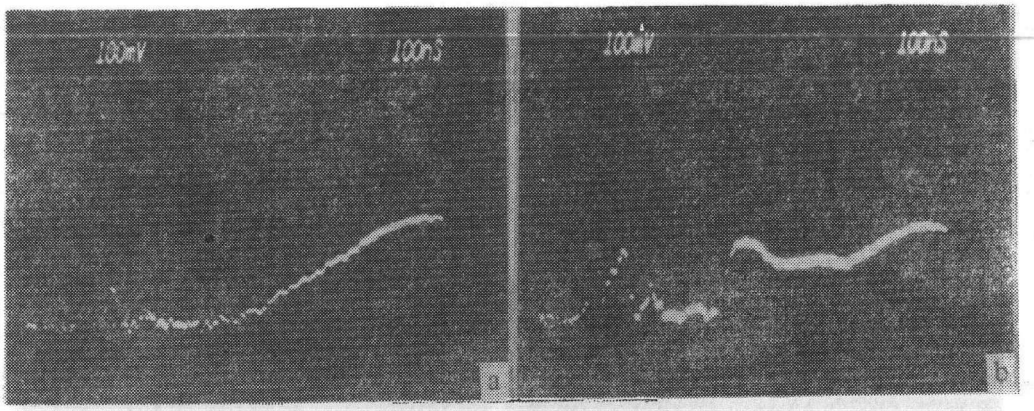
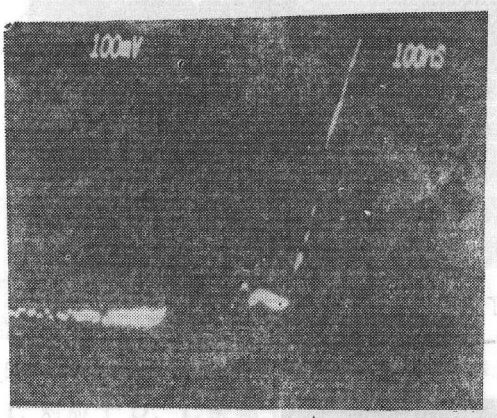


图 4 快离子信号
(a——实验编号 110, b——实验编号 111)



5 快离子信号
(实验编号 77)



图 6 快离子信号
(实验编号 97)

是一个快 Al 离子与两个静止的 Al 离子相碰,给出 $t_0/t_1 = 1.5$, 与 1.8 较接近.

3. 快离子的温度

在引言中已阐明快离子的加热主要是靠与高速或超热电子相碰. 取 $T_e = 10^3$eV,库仑对数 $\Lambda = 6.38$, 得 $\tau_{eD} = \left(3.2 \times 10^{-9} \frac{m_D}{m_p} \frac{1}{n\Lambda} T_e^{3/2}\right)^{-1} = 3.2$ns 比激光脉冲宽度稍大些. 在 τ_{eD} 时间内处于温度 T_H^0 的超热电子经碰撞使D热化,并达到(6)式给出的平衡温度

$$T_{eq} = \left(1 + \frac{n_D}{n_e}\right)^{-1} T_H^0 = 0.8 T_H^0,$$

而 T_H^0 按定标律及实验曲线[5]可定出. 当 $\phi = 0.8 \sim 4 \times 10^{14}$W/cm^2, $\lambda = 1\mu$ 时, $T_H^0 = 1 \sim 4$keV, $T_{eq} = 0.8 \sim 3.2$keV. 这与表中D的温度 T_1 大致相符.

上面讨论了快离子的平动能,激光频宽对平动能的影响,慢离子峰的起始时间及快离子的温度等. 其中重要的是激光频带加宽会使快离子的平动能下降. 如果加宽到 100 Å, 则会下降 $\left(\frac{200}{100}\right)^2 = 4$ 倍. 那么对电子的温度影响又是怎样的呢? 就在同一轮实验中, 我们用 K 边

表 1

实验编号（靶材）	频宽（偏振）	能量 E(J)	t_1 (KE_1)	Δt_1 (T_1)	t_2 (KE_2)	Δt_2 (T_2)	t_0
105 (CD_2)	宽带 (p)	6.3	0.78 (40)	0.20 (2.6)	1.86 (42)	0.31 (1.2)	2.5
108 (CD_2)	宽带 (p)	6.5	0.71 (48)	0.18 (3.1)	1.86 (42)	0.30 (1.2)	2.5
103 (CD_2)	宽带 (p)	5.0	0.71 (48)	0.20 (3.8)	1.71 (50)	0.30 (1.5)	2.1
113 (CD_2)	宽带 (p)	8.7	0.71 (48)	0.20 (3.8)	1.78 (46)	0.31 (1.4)	2.1
109 (CD_2)	窄带 (p)	6.0	0.57 (75)	0.14 (4.5)	1.43 (72)	0.28 (2.8)	2.6
110 (CD_2)	窄带 (s)	2.3	0.64 (59)	0.15 (3.2)	1.57 (60)	0.22 (1.2)	2.6
111 (CD_2)	窄带 (s)	6.8	0.71 (48)	0.14 (1.9)	1.64 (54)	0.14 (0.4)	2.6
77 (Al)	宽带 (s)	6.4	1.43 (162)	0.21 (3.5)			2.6
97 (Ta)	宽带 (s)	6.2					

表 2　Al 靶的电子温度和超热电子温度

实验编号	能量 (J)	频　宽	偏　振	T_e(eV)	T_{hot}(keV)
25	6.5	窄带	45°	440	3.3
28	6.2	窄带	s	430	2.8
35	7.5	窄带	p	430	3.9
68	7.0	窄带	p	430	3.9
69	7.2	窄带	p	440	3.7
75	10.1	窄带	s	430	3.3
53	6.6	宽带	p	440	2.8
54	4.5	宽带	s	430	2.9
67	8.9	宽带	p	490	3.3
77	6.4	宽带	s	450	2.9

表 3　Ta 靶的电子温度和超热电子温度

实验编号	能量 (J)	频　宽	偏　振	T_e(eV)	T_{hot}(keV)
81	8.1	窄带	s	520	3.1
82	7.6	窄带	p	510	3.7
92	3.5	窄带	p	510	3.7
96	5.8	窄带	p	500	3.9
98	4.9	窄带	p	500	3.7
100	7.2	窄带	p	460	3.7
90	4.9	宽带	p	490	3.6
91	3.2	宽带	p	440	2.7
97	6.2	宽带	s	510	2.4
99	7.7	宽带	p	500	2.4

多道方法测定了超热电子的温度(详细在另一文[1]中报道)结果是用宽频带、窄频带激光打 Al, Ta 靶,宽带激光打靶产生的超热电子温度要比窄带激光打靶的为低. 如表 2,3 所示. 因而采用宽带激光打靶,对降低快离子的平动能,对降低超热电子、快离子的温度都是有好处的. 由表中还可看出,当带宽相同时,s 偏振激光打靶的超热电子温度 T_{hot} 比 p 偏振打靶的低;而热电子温度 T_e 则相同,这又表明共振吸收对超热电子温度的重要贡献.

作者向参加本工作的毕无忌、何兴法、王笑琴等同志和六路实验室全体工作人员一并致谢.

参 考 文 献

[1] 谭维翰、林尊琪等, 中国科学A辑, 1985, 2: 171.
[2] 谭维翰、张燕珍等, 科学通报 **31**(1986), 6: 471.
[3] David, F., Mora, P. and Pellet, R., *Phys. Fluids*, **26**(1983), 747.
[4] Crow, J. E., Auer, P. L. and Allen, J. E., *J. Plasma Phyeics*., **14**(1975), 65—76.
[5] Motz, H., *The Physics of Laser Fusion*., Academic Press Inc., London, 1979, 159—272.
[6] Thomson, J. J. and Karush, I., *Phys. Fluids*., **17**(1974), 1608.
[7] Haken, H., Handbuch der Physik, Band XXV/2c Licht and Materie Ic, Springer-verlag, Berlin, 1970, 130—132.

1) 郭永明、倪元龙等,宽带与窄带激光打靶的电子温度,中国激光(待发表).