

超短超强脉冲激光产生的电离通道的存活性态分析^{*}

唐荣荣^{1,2)†}

1) 湖州师范学院理学院, 湖州 313000)

2) 上海高等院校计算科学 E-研究院, 上海交通大学研究所, 上海 200240)

(2005 年 4 月 18 日收到, 2005 年 6 月 29 日收到修改稿)

用摄动理论对超短超强脉冲激光产生的电离通道进行了研究, 得出了在复合、吸附、退吸附作用影响下, 电离通道在不同演化时期, 各种带电粒子密度的渐近表达式, 揭示了各种作用对通道存活性态的影响.

关键词: 密度, 激光脉冲, 等离子体通道, 摄动

PACC: 0290

1. 引言

近年来, 随着超短超强脉冲激光技术的迅猛发展以及应用的日益广泛, 有关这方面的研究已成为学术界的一个热点研究方向^[1-4].

由于超短超强脉冲激光在时间和空间上的变化都很剧烈, 因此它在介质中传播时会发生一系列新的物理现象. 其中之一是经长焦距透镜聚焦后容易产生长距离的稳定的成丝, 形成具有较高电导率的电离通道. 由于在激光引雷、激光天线等许多实际应用中, 均要求电离通道在形成以后还能存活一定的时间, 因此电离通道中的各类带电粒子的密度随时间的变化状况引起了人们充分的关注^[5-7].

超短超强脉冲激光入射后在介质中产生的电离通道是一个由自由电子、正离子、负离子和中性分子组成并变化着的系统. 其中主要物理过程包括自由电子和正离子的复合, 正负离子的复合, 自由电子吸附在中性分子上形成负离子. 在外加的静电场作用下, 自由电子因被静电场加速获得足够的动能而引起空气分子的碰撞电离. 吸附了自由电子的空气分子在外加激光场的作用下又会发生退吸附作用, 释放出自由电子. 由于一般介质对超短超强脉冲激光的响应是非线性的, 故在电离通道的不同演化时期,

复合、吸附以及退吸附过程对各种带电粒子的密度所起的作用是复杂的. 为揭示电离通道存活的本质, 人们对通道随时间的演化过程进行了一些模拟实验^[8,9], 在假设没有外加静电场的情形下, 对通道随时间的演化过程进行了数值模拟和分析^[10].

为了探索电离通道在外加静电场作用下, 各种复合、吸附以及退吸附作用对通道中各种带电粒子的密度所产生的影响, 我们用摄动的渐近理论研究通道中各种带电粒子的密度随时间的变化状况, 从中分析各种因素对通道存活所起的作用. 摄动理论是一种近似解析解的理论, 近年来, 在众多领域中都有应用, 特别是对解决非线性问题往往是有效的^[11-20].

现考虑如下—类带电粒子密度的演化模型

$$\frac{dn_e}{dt} = \alpha n_e - \eta n_e - \beta_{ep} n_e n_p + \gamma n_n, \quad (1)$$

$$\frac{dn_p}{dt} = \alpha n_e - \delta_p n_p + \beta_{ep} n_e n_p - \beta_{np} n_n n_p, \quad (2)$$

$$\frac{dn_n}{dt} = \eta n_e - \delta_n n_n - \beta_{np} n_n n_p - \gamma n_n, \quad (3)$$

$$n_e(0) = n_p(0) = n^*, n_n(0) = 0, \quad (4)$$

其中 n_e 是电子密度, n_p 是正离子密度, n_n 是负离子密度, n^* 是 n_p, n_n 的初值. α 是和外加静电场有关的碰撞电离速率系数, η 是电子和氧分子的吸附

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 10471039) 浙江省自然科学基金(批准号: Y604127) 浙江省教育厅科研基金(批准号: 20030594) 和上海市教育委员会 E-研究院建设计划项目(批准号: N. E03004)资助的课题.

[†] E-mail: rrtang@hutc.zj.cn

速率系数 β_{ep} 和 β_{np} 分别是电子与正离子、正离子与负离子的复合系数, γ 是在外加激光场作用下负离子释放出电子的退吸附速率系数. δ_p 是和介质相关的正离子密度速率相对于正离子密度的变化系数, δ_n 是和介质相关的负离子密度速率相对于电子密度的变化系数, 参数 $\alpha, \eta, \gamma, \delta_p, \delta_n, \beta_{ep}$ 和 β_{np} 的具体表达式参见文献 [10].

2. 带电粒子密度的渐近估计

对于非线性系统 (1)–(3), 运用摄动理论来求渐近解.

由于 β_{ep} 和 β_{np} 的值是近似相等的小量, 记 $\beta_{ep} = \beta_{np} = \beta \ll 1$. 由实际情况, 设 $\delta_p = \delta_n = \delta, \delta > \alpha, \eta > \alpha$. 令

$$n_e = \sum_{i=0}^{\infty} n_{ei} \beta^i, n_p = \sum_{i=0}^{\infty} n_{pi} \beta^i, n_n = \sum_{i=0}^{\infty} n_{ni} \beta^i. \quad (5)$$

将 (5) 式代入 (1)–(4) 式, 比较 $\beta^i, i = 1, 2, \dots$ 的系数, 得

$$\frac{dn_{e0}}{dt} = (\alpha - \eta)n_{e0} + \gamma n_{n0}, \quad (6)$$

$$\frac{dn_{p0}}{dt} = \alpha n_{e0} - \delta n_{p0}, \quad (7)$$

$$\frac{dn_{n0}}{dt} = (\eta - \delta)n_{e0} - \gamma n_{n0}, \quad (8)$$

$$n_{e0}(0) = n_{p0}(0) = n^*, n_{n0}(0) = 0, \quad (9)$$

和

$$\begin{aligned} \frac{dn_{ei}}{dt} &= (\alpha - \eta)n_{ei} + \gamma n_{ni} \\ &\quad - \sum_{j=1}^i n_{e(j-1)} n_{p(i-j)}, \quad i = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{dn_{pi}}{dt} &= \alpha n_{ei} - \delta n_{pi} - \sum_{j=1}^i n_{e(j-1)} n_{p(i-j)} \\ &\quad - \sum_{j=1}^i n_{n(j-1)} n_{p(i-j)}, \quad i = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{dn_{ni}}{dt} &= (\eta - \delta)n_{ei} - \gamma n_{ni} \\ &\quad - \sum_{j=1}^i n_{e(j-1)} n_{p(i-j)}, \quad i = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} n_{ei}(0) &= n_{pi}(0) = 0, \\ n_{ni}(0) &= 0, \quad i = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (13)$$

由 (6)–(8) 式的特征方程

$$\begin{vmatrix} \alpha - \eta - \lambda & 0 & \gamma \\ \alpha & -\delta - \lambda & 0 \\ \eta - \delta & 0 & -\gamma - \lambda \end{vmatrix} = 0, \quad (14)$$

得特征根: $\lambda_1 = -\delta, \lambda_{2,3} = \frac{1}{2}[-(\gamma + \eta - \alpha) \pm ((\gamma + \eta - \alpha)^2 - 4\gamma(\delta - \alpha))^{\frac{1}{2}}]$.

不难得到 (6)–(8) 式的通解为

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} n_{e0}(t) \\ n_{p0}(t) \\ n_{n0}(t) \end{pmatrix} &= A_1 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} e^{\lambda_1 t} + A_2 \begin{pmatrix} 1 \\ \alpha(\delta + \lambda_2)^{-1} \\ (\eta - \delta)(\gamma + \lambda_2)^{-1} \end{pmatrix} e^{\lambda_2 t} \\ &\quad + A_3 \begin{pmatrix} 1 \\ \alpha(\delta + \lambda_3)^{-1} \\ (\eta - \delta)(\gamma + \lambda_3)^{-1} \end{pmatrix} e^{\lambda_3 t}, \quad (15) \end{aligned}$$

其中 $A_i, i = 1, 2, 3$ 为任意常数. 由初始条件 (9) 式, 得

$$A_1 = n^*, A_2 = \frac{n^*(\gamma + \lambda_2)}{\lambda_2 - \lambda_3}, A_3 = \frac{n^*(\gamma + \lambda_3)}{\lambda_3 - \lambda_2}. \quad (16)$$

将 (16) 式代入 (15) 式, 得原方程组的零阶近似解为

$$\begin{aligned} n_{e0}(t) &= \frac{n^*}{\lambda_3 - \lambda_2} [-(\gamma + \lambda_2)e^{\lambda_2 t} \\ &\quad + (\gamma + \lambda_3)e^{\lambda_3 t}], \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} n_{p0}(t) &= n^* e^{\lambda_1 t} + \frac{n^* \alpha}{\lambda_3 - \lambda_2} \left[\frac{-(\gamma + \lambda_2)}{\delta + \lambda_2} e^{\lambda_2 t} \right. \\ &\quad \left. + \frac{(\gamma + \lambda_3)}{(\delta + \lambda_3)} e^{\lambda_3 t} \right], \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} n_{n0}(t) &= \frac{n^*}{\lambda_3 - \lambda_2} [-(\eta - \delta)e^{\lambda_2 t} \\ &\quad + (\eta - \delta)e^{\lambda_3 t}]. \end{aligned} \quad (19)$$

为求得更高阶近似解, 将 (15) 式代入 (10)–(12) 式, $i = 1$, 得

$$\begin{aligned} \frac{dn_{e1}}{dt} &= (\alpha - \eta)n_{e1} + \gamma n_{n1} - [A_1 A_2 e^{(\lambda_1 + \lambda_2)t} \\ &\quad + A_1 A_3 e^{(\lambda_1 + \lambda_3)t} + (A_2)^2 \frac{\alpha}{\delta + \lambda_2} e^{2\lambda_2 t} \\ &\quad + A_2 A_3 \left(\frac{\alpha}{\delta + \lambda_2} + \frac{\alpha}{\delta + \lambda_3} \right) e^{(\lambda_2 + \lambda_3)t} \\ &\quad + (A_3)^2 \frac{\alpha}{\delta + \lambda_3} e^{2\lambda_3 t}], \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \frac{dn_{p1}}{dt} &= \alpha n_{e1} - \delta n_{p1} - \left[A_1 A_2 \left(1 + \frac{\eta - \delta}{\gamma + \lambda_2} \right) e^{(\lambda_1 + \lambda_2)t} \right. \\ &\quad + A_1 A_3 \left(1 + \frac{\eta - \delta}{\gamma + \lambda_3} \right) e^{(\lambda_1 + \lambda_3)t} \\ &\quad \left. + A_2 A_3 \left(\frac{\alpha}{\delta + \lambda_2} \left(1 + \frac{\eta - \delta}{\gamma + \lambda_3} \right) \right. \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\alpha}{\delta + \lambda_3} \left(1 + \frac{\eta - \delta}{\gamma + \lambda_2} \right) e^{(\lambda_2 + \lambda_3)t} \\
& + (A_2)^3 \frac{\alpha}{\delta + \lambda_2} \left(1 + \frac{\eta - \delta}{\gamma + \lambda_2} \right) e^{2\lambda_2 t} \\
& + (A_3)^3 \frac{\alpha}{\delta + \lambda_3} \left(1 + \frac{\eta - \delta}{\gamma + \lambda_3} \right) e^{2\lambda_3 t} \Big], \quad (21)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{dn_{nl}}{dt} = & (\eta - \delta)n_{el} - \gamma n_{nl} - \left[A_1 A_2 \frac{\eta - \delta}{\gamma + \lambda_2} e^{(\lambda_1 + \lambda_2)t} \right. \\
& + A_1 A_3 \frac{\eta - \delta}{\gamma + \lambda_3} e^{(\lambda_1 + \lambda_3)t} \\
& + (A_2)^3 \frac{\alpha(\eta - \delta)}{(\delta + \lambda_2)(\gamma + \lambda_2)} e^{2\lambda_2 t} \\
& + (A_3)^3 \frac{\alpha(\eta - \delta)}{(\delta + \lambda_3)(\gamma + \lambda_3)} e^{2\lambda_3 t} \\
& + A_2 A_3 \left(\frac{\alpha(\eta - \delta)}{(\delta + \lambda_2)(\gamma + \lambda_3)} \right. \\
& \left. \left. + \frac{\alpha(\eta - \delta)}{(\delta + \lambda_3)(\gamma + \lambda_2)} \right) e^{(\lambda_2 + \lambda_3)t} \right]. \quad (22)
\end{aligned}$$

不难看出,方程组的通解为

$$\begin{aligned}
\begin{pmatrix} n_{el}(t) \\ n_{pl}(t) \\ n_{nl}(t) \end{pmatrix} = & C_1 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} e^{\lambda_1 t} + C_2 \begin{pmatrix} 1 \\ \alpha(\delta + \lambda_2)^{-1} \\ (\eta - \delta)(\gamma + \lambda_2)^{-1} \end{pmatrix} e^{\lambda_2 t} \\
& + C_3 \begin{pmatrix} 1 \\ \alpha(\delta + \lambda_3)^{-1} \\ (\eta - \delta)(\gamma + \lambda_3)^{-1} \end{pmatrix} e^{\lambda_3 t} \\
& + \begin{pmatrix} n_{el0}(t) \\ n_{pl0}(t) \\ n_{nl0}(t) \end{pmatrix}, \quad (23)
\end{aligned}$$

其中 C_i , $i = 1, 2, 3$ 为任意常数, $n_{el0}(t)$, $n_{pl0}(t)$, $n_{nl0}(t)$ 为(20)–(22)式的一个特解.

考虑到 λ_i , $i = 1, 2, 3$ 的构成以及参数 $\alpha, \eta, \gamma, \delta$ 的数值范围,则由摄动理论知(20)–(22)式的非齐次项均不会产生长期项,因此可通过对如下类型的方程组的讨论确定其解.

1) 对于 $j = 2, 3$, 分别考虑方程组

$$\frac{dn_{el}}{dt} = (\alpha - \eta)n_{el} + \gamma n_{nl} - (A_j)^3 \frac{\alpha}{\delta + \lambda_j} e^{2\lambda_j t}, \quad (24)$$

$$\begin{aligned}
\frac{dn_{pl}}{dt} = & \alpha n_{el} - \delta n_{pl} - (A_j)^3 \frac{\alpha}{\delta + \lambda_j} \left(1 + \frac{\eta - \delta}{\gamma + \lambda_j} \right) e^{2\lambda_j t}, \quad (25)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{dn_{nl}}{dt} = & (\eta - \delta)n_{el} - \gamma n_{nl} \\
& - (A_j)^3 \frac{\alpha(\eta - \delta)}{(\delta + \lambda_j)(\gamma + \lambda_j)} e^{2\lambda_j t}. \quad (26)
\end{aligned}$$

设(24)–(26)式的解为 $n_{el(j)} = B_{1j} e^{2\lambda_j t}$, $n_{pl(j)} = B_{2j} e^{2\lambda_j t}$, $n_{nl(j)} = B_{3j} e^{2\lambda_j t}$, $j = 2, 3$, 分别代入(10)–(12)式,有

$$\begin{aligned}
& (\alpha - \eta - 2\lambda_j)B_{1j} + \gamma B_{3j} \\
= & (A_j)^3 \frac{\alpha}{\delta + \lambda_j}, \\
& \alpha B_{1j} - (\delta + 2\lambda_j)B_{2j} \\
= & (A_j)^3 \frac{\alpha}{\delta + \lambda_j} \left(1 + \frac{\eta - \delta}{\gamma + \lambda_j} \right), \\
& (\eta - \delta)B_{1j} - (\gamma + 2\lambda_j)B_{3j} \\
= & (A_j)^3 \frac{\alpha(\eta - \delta)}{(\delta + \lambda_j)(\gamma + \lambda_j)}.
\end{aligned}$$

于是得

$$B_{1j} = \frac{\Delta_{1j}}{\Delta_{0j}}, B_{2j} = \frac{\Delta_{2j}}{\Delta_{0j}}, B_{3j} = \frac{\Delta_{3j}}{\Delta_{0j}},$$

其中

$$\begin{aligned}
\Delta_{0j} = & [(\alpha - \eta - 2\lambda_j)(\gamma + 2\lambda_j) \\
& + (\eta - \delta)(\delta + 2\lambda_j)], \\
\Delta_{1j} = & (A_j)^3 \alpha [(\gamma + 2\lambda_j) + (\eta - \delta)(\gamma + \lambda_j)^{-1}(\delta + 2\lambda_j)(\delta + \lambda_j)^{-1}], \\
\Delta_{2j} = & (A_j)^3 \alpha [(\eta - \delta)(\gamma + \lambda_j)^{-1}(\alpha - \eta + \delta \\
& - (\gamma + 2\lambda_j)(\alpha - \eta - 2\lambda_j)) \\
& - (\gamma + 2\lambda_j)(2\alpha - \eta - 2\lambda_j) \\
& - (\eta - \delta)(\delta + \lambda_j)^{-1}], \\
\Delta_{3j} = & (A_j)^3 \alpha [1 - (\alpha - \eta - 2\lambda_j)(\gamma + \lambda_j)^{-1}(\eta - \delta)(\delta + 2\lambda_j)(\delta + \lambda_j)^{-1}].
\end{aligned}$$

2) 设方程组

$$\begin{aligned}
\frac{dn_{el}}{dt} = & (\alpha - \eta)n_{el} + \gamma n_{nl} \\
& - A_1 A_j e^{(\lambda_1 + \lambda_j)t}, \quad (27)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{dn_{pl}}{dt} = & \alpha n_{el} - \delta n_{pl} - A_1 A_j \left(1 + \frac{\eta - \delta}{\gamma + \lambda_j} \right) \\
& \times e^{(\lambda_1 + \lambda_j)t}, \quad (28)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{dn_{nl}}{dt} = & (\eta - \delta)n_{el} - \gamma n_{nl} - A_1 A_j \frac{\eta - \delta}{\gamma + \lambda_j} \\
& \times e^{(\lambda_1 + \lambda_j)t} \quad (29)
\end{aligned}$$

的解为 $n_{el(1j)} = B_{1(1j)} e^{(\lambda_1 + \lambda_j)t}$, $n_{pl(1j)} = B_{2(1j)} e^{(\lambda_1 + \lambda_j)t}$, $n_{nl(1j)} = B_{3(1j)} e^{(\lambda_1 + \lambda_j)t}$, $j = 2, 3$.

设方程组

$$\begin{aligned}
\frac{dn_{el}}{dt} = & (\alpha - \eta)n_{el} + \gamma n_{nl} \\
& - A_{02} A_{03} \left(\frac{\alpha}{\delta + \lambda_2} + \frac{\alpha}{\delta + \lambda_3} \right) e^{(\lambda_2 + \lambda_3)t} \quad (30)
\end{aligned}$$

$$\frac{dn_{pl}}{dt} = \alpha n_{el} - \delta n_{pl} - A_2 A_3 \left(\frac{\alpha}{\delta + \lambda_2} \left(1 + \frac{\eta - \delta}{\gamma + \lambda_3} \right) + \frac{\alpha}{\delta + \lambda_3} \left(1 + \frac{\eta - \delta}{\gamma + \lambda_2} \right) \right) e^{(\lambda_2 + \lambda_3)t}, \quad (31)$$

$$\frac{dn_{nl}}{dt} = (\eta - \delta) n_{el} - \gamma n_{nl} - A_{02} A_{03} \left(\frac{\alpha(\eta - \delta)}{(\delta + \lambda_2)(\gamma + \lambda_3)} + \frac{\alpha(\eta - \delta)}{(\delta + \lambda_3)(\gamma + \lambda_2)} \right) e^{(\lambda_2 + \lambda_3)t} \quad (32)$$

的解为 $n_{e(2,3)} = B_{(2,3)} e^{(\lambda_2 + \lambda_3)t}$, $n_{p(2,3)} = B_{(2,3)} e^{(\lambda_2 + \lambda_3)t}$, $n_{n(2,3)} = B_{(2,3)} e^{(\lambda_2 + \lambda_3)t}$, 类似 1) 的讨论, 这些解可被确定.

由 (23) 式 (24) — (32) 式, 且注意到 (13) 式, 有

$$\begin{aligned} & C_1 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + C_2 \begin{pmatrix} 1 \\ \alpha(\delta + \lambda_2)^{-1} \\ (\eta - \delta)(\gamma + \lambda_2)^{-1} \end{pmatrix} \\ & + C_3 \begin{pmatrix} 1 \\ \alpha(\delta + \lambda_3)^{-1} \\ (\eta - \delta)(\gamma + \lambda_3)^{-1} \end{pmatrix} \\ & + \begin{pmatrix} B_{(2,3)} + \sum_{j=2}^3 (B_{1j} + B_{(1,j)}) \\ B_{(2,3)} + \sum_{j=2}^3 (B_{2j} + B_{(1,j)}) \\ B_{(2,3)} + \sum_{j=2}^3 (B_{3j} + B_{(1,j)}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

从而 C_i , $i = 1, 2, 3$ 可确定.

综上所述, 最后由 (5) 式得

$$\begin{aligned} n_e(t) &= D_2 e^{\lambda_2 t} + D_3 e^{\lambda_3 t} + \beta B_{(2,3)} e^{(\lambda_2 + \lambda_3)t} \\ &+ \sum_{j=2}^3 (B_{1j} e^{2\lambda_j t} + B_{(1,j)} e^{(\lambda_1 + \lambda_j)t}) \\ &+ O(\beta^2), \quad (33) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_p(t) &= D_1 e^{\lambda_1 t} + D_2 \alpha(\delta + \lambda_2)^{-1} e^{\lambda_2 t} \\ &+ D_3 \alpha(\delta + \lambda_3)^{-1} e^{\lambda_3 t} + \beta B_{(2,3)} e^{(\lambda_2 + \lambda_3)t} \\ &+ \sum_{j=2}^3 (B_{2j} e^{2\lambda_j t} + B_{(1,j)} e^{(\lambda_1 + \lambda_j)t}) \\ &+ O(\beta^2), \quad (34) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_n(t) &= D_2 (\eta - \delta)(\gamma + \lambda_2)^{-1} e^{\lambda_2 t} \\ &+ D_3 (\eta - \delta)(\gamma + \lambda_3)^{-1} e^{\lambda_3 t} \\ &+ \beta B_{(2,3)} e^{(\lambda_2 + \lambda_3)t} + \sum_{j=2}^3 (B_{3j} e^{2\lambda_j t} \\ &+ B_{(1,j)} e^{(\lambda_1 + \lambda_j)t}) + O(\beta^2). \quad (35) \end{aligned}$$

其中 $D_i = A_i + \beta C_i$, $i = 1, 2, 3$.

3. 结 语

在激光引雷、激光天线等实际应用中, 延长电离通道的存活时间是解决问题的关键. 以下是从本文得出的带电粒子的密度渐近表达式出发进行分析, 揭示各因素对通道存活时间的影响.

1) 在电离通道处于外加静电场作用时, 在不同的演化时期, 复合、吸附以及退吸附对通道中带电粒子的密度的影响是不同的. 由密度表达式 (33) — (35) 可知, 只在通道形成的初期, 电子和正离子的复合系数 β 才对各带电粒子的密度 n_e , n_p , n_n 具有较大的影响.

且由 λ_i , $i = 1, 2, 3$ 的取值易知, 在电子密度与正离子密度的表达式中起主要作用的项分别是 $D_2 e^{\lambda_2 t}$ 和 $D_2 \alpha(\delta + \lambda_2)^{-1} e^{\lambda_2 t}$. 其他各项在量级上都为小量. 由于 $\alpha(\delta + \lambda_2) > 1$, 因此电子密度 n_e 小于正离子密度 n_p . 在退吸附激光作用下, 并且 $\gamma \gg \eta$ 时, 电子的吸附作用被极大地抑制, 由于 $\alpha(\delta + \lambda_2)$ 接近于 1, 再由 (33) (34) 式知, 此时电子密度增大并与正离子密度近似相等.

但由表达式的构成易知, 在通道演化过程中, 带电粒子的密度关于时间 t 以指数形式下降, 因此, 总的来说通道的存活时间是短暂的.

2) 由 (16) 式以及 (24) — (32) 式知, 初始电子密度只以乘积的形式影响 A_i , B_i , $i = 1, 2, 3$, 因此只能以乘积的形式影响 (33) — (35) 式中的各项. 由于表达式 (33) — (35) 式中的每一项都有一个负指数项作为乘积因子, 因此在通道演化过程的中、后期, 初始电子密度的取值对通道中电子密度的影响甚微, 故提高初始电子密度不能有效地延长电离通道的存活时间.

3) 注意到 (33) 式中, $A_2 e^{\lambda_2 t} = \frac{\gamma + \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_3} e^{\lambda_2 t}$ 是量级最大的项, 因此这一项对电子密度的演化起着决定性作用. 且不难算得 $\frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{\gamma + \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_3} e^{\lambda_2 t} \right] > 0$, 于是在同一时刻 t , 退吸附速率系数 γ 越大, 电子密度越大. 此理论分析表明: 增强退吸附作用能减缓电子密度的下降. 从而引入退吸附激光能有效地延长通道的存活时间.

以上所得结果与实验结果是相符的, 参见文献

[9]. 并且 (33)—(35)式揭示了通道随时间演化的整个演化过程. 因此, 本文的研究为解决这一类非线性

性问题提供了一种有效的方法.

- [1] Yang H , Zhang J , Yu W , Li Y J , Wei Z Y 2002 *Phys. Rev. E* **65** 016406
- [2] Sprangle P , Penano J R , Hafizi B 2002 *Phys. Rev. E* **66** 046418
- [3] Tzortzakis S , Bergé L , Couairon A , Franco M , Prade B , Mysrowicz A 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 5470
- [4] Mlejnek M , Kolesik M , Moloney J V , Wright E M 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 2938
- [5] Jones D J , Diddams S A , Ranka J K , Cundiff S T 2000 *Science* **288** 635
- [6] Zheng Z M , Zhang J , Yu W 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 125 (in Chinese) [盛政明、张 杰、余 玮 2003 物理学报 **52** 125]
- [7] Cheng C F , Wang X F , Lu B 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1826 (in Chinese) [成纯富、王晓方、鲁 波 2004 物理学报 **53** 1826]
- [8] Tzortzakis S , Prade B , Mysrowicz A 2000 *Opt Commun.* **181** 123
- [9] Lu Xin , Xi T T , Li Y J , Zhang J 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3404 (in Chinese) [鲁 欣、奚婷婷、李英竣、张 杰 2004 物理学报 **53** 3404]
- [10] Zhao X M , Diels J C , Wang C Y , Elizondo J M 1995 *IEEE J.*

Quantum Electron **31** 599

- [11] Mo J Q , Lin W T 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 996 (in Chinese) [莫嘉琪、林万涛 2004 物理学报 **53** 996]
- [12] Mo J Q , Lin W T , Zhu J 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3245 (in Chinese) [莫嘉琪、林万涛、朱 江 2004 物理学报 **53** 3245]
- [13] Han X L 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4061 (in Chinese) [韩祥临 2004 物理学报 **53** 4061]
- [14] Mo J Q , Tang R R 2004 *Appl. Math. J. Chinese Univ. Ser. B* **19** 57
- [15] Tang R R 2004 *Ann. of Diff. Eqs.* **20** 407
- [16] Tang R R 2005 *Adv. in Math.* **34** 233
- [17] Tang R R 2005 *Advances in Math.* **34** 497
- [18] Mo J Q , Lin W T 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 993 (in Chinese) [莫嘉琪、林万涛 2005 物理学报 **54** 993]
- [19] Mo J Q , Lin W T 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1081 (in Chinese) [莫嘉琪、林万涛 2005 物理学报 **54** 1081]
- [20] Mo J Q , Lin W T 2005 *Chin. Phys.* **14** 875

Analysis of evolution and life-time of the plasma channel produced by ultra-short ultra-high power laser pulse^{*}

Tang Rong-Rong^{1,2,†}

¹ *Faculty of Science, Huzhou Teachers College, Huzhou 313000, China*

² *Division of Computational Science, E-Institute of Shanghai University SJTU, Shanghai 200240, China*

(Received 18 April 2005 ; revised manuscript received 29 June 2005)

Abstract

Using the perturbed theory, the plasma channel produced by ultra-short ultra-high power laser pulses is considered. Under the actions of recombination, attachment and detachment, the perturbed asymptotic expressions of the density of each kind of charged particles in the course of evolution of the plasma channel are obtained. The influence of each action on the evolution and life-time of the channel is discussed.

Keywords: density, laser pulse, plasma channel, perturbation

PACC: 0290

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10471039), and the Natural Science Foundations of Zhejiang Province (Grant No. Y604127), the Education Bureau of Zhejiang Province (Grant No. 20030594) and in part by the E-Institutes of Shanghai Municipal Education Commission, China (Grant No. N. E03004).

[†] E-mail: rrtang@hute.zj.cn