

УДК 537.527

Ю.И. Бычков, А.Г. Ястремский

## РАЗВИТИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ В РАЗРЯДЕ НАКАЧКИ ХеСІ-ЛАЗЕРА

Путем компьютерного моделирования исследуется развитие неоднородности электронной плотности и напряженности электрического поля в разряде накачки ХеСІ-лазера.

Разработана двумерная модель, включающая уравнение Лапласа для потенциала электрического поля, уравнения внешней электрической цепи и основные процессы кинетики.

Показано, что неоднородность электронной плотности в начальный момент времени приводит к неоднородному распределению электрического поля. В центре неоднородности, в области повышенной плотности электронов, напряженность электрического поля понижена. Максимальное значение поле имеет на оси, на границе неоднородности.

В стадии формирования неоднородности плотности электронов уменьшается. Распределение электрического поля выравнивается. В стадии ступенчатой ионизации разряд становится неустойчивым. Скорость ионизации увеличивается в областях с большей концентрацией электронов.

### Введение

Развитие техники эксимерных лазеров привело к тому, что в настоящее время эффективность таких лазеров определяется в основном однородностью разряда накачки. Поэтому очевидно, что дальнейший прогресс в этой области связан прежде всего с улучшением однородности разряда.

Первые попытки моделирования разряда с учетом неоднородности были сделаны на основе 1 *D*- (одномерных) моделей. Это были так называемые модели параллельно (последовательно) включенных сопротивлений [1–3].

2 *D*- (двухмерное) моделирование начальной стадии разряда накачки ХеСІ-лазера в цилиндрическом объеме газа между электродами, имеющими профиль Чанга, было впервые выполнено в [4]. В этой работе моделировался разряд в малом диапазоне концентрации электронов до  $1,7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

В данной статье рассмотрено временное и пространственное развитие начальной, локальной неоднородности, находящейся в объеме однородной плазмы разряда в смеси газов Ne–Xe–HCl, при изменении концентрации электронов в диапазоне от  $n_0(0, x, y) = 10^8 \text{ см}^{-3}$  до  $n_0(t, x, y) = 6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  с учетом основных кинетических процессов.

### Начальные условия

Электрическая схема включала в себя источник питания постоянного напряжения  $U_0 = 28 \text{ кВ}$ , индуктивность  $L = 60 \text{ нГ}$ , дополнительное сопротивление  $R_d = 2 \text{ Ом}$ . Рассматривался газовый промежуток цилиндрической формы радиусом  $R = 3 \text{ см}$  и высотой (расстояние между электродами)  $d = 8 \text{ см}$ . Искажение электрического поля на краю электрода не учитывалось, поэтому предполагалось, что радиус электродов  $r \gg R$ . Состав газовой смеси Ne: Хе: HCl = 1000: 10: 1 выбран типичным для разряда накачки ХеСІ-лазера. Давление смеси  $P = 2 \text{ атм}$ .

Начальная концентрация электронов составляла  $n_0 = 10^8 \text{ см}^{-3}$  и была однородна. В центре промежутка ( $x = 0 \text{ см}$  и  $y = 4 \text{ см}$ ) создавалась неоднородность плотности электронов в виде сферы радиусом  $R_0 = 3,0 \cdot 10^{-1} \text{ см}$ .

Концентрация частиц плазмы в центре сферы составляла  $n_0 = 10^9 \text{ см}^{-3}$  и спадала к границе неоднородности до  $n_0 = 10^8 \text{ см}^{-3}$ .

### Физическая модель разряда

Модель включает уравнение, описывающее изменение потенциала электрического поля, и уравнения, описывающие внешнюю электрическую цепь и кинетику плазмохимических реакций.

Мы учитывали только основные процессы, влияющие на характеристики плазмы. Для расчета поведения констант этих процессов при изменении плотности электронов и напряженности электрического поля использовалась полная 0 *D*- модель, в которой уравнение Больцмана для ФРЭЭ с учетом более 300 процессов кинетики решалось методом взвешенных невязок [5].

Потенциал электрического поля  $\Phi(t, x, y)$  находился в результате решения уравнения Лапласа

$$\nabla \mathbf{j}(t, x, y) = \nabla \sigma(t, x, y) \mathbf{E}(t, x, y) = -\nabla \sigma \nabla \Phi(t, x, y) = 0 \quad (1)$$

с граничными условиями:

$$\frac{\partial}{\partial x} \Phi(t, 0, y) = 0, \quad \frac{\partial}{\partial x} \Phi(t, 3, y) = 0,$$

$$\Phi(t, x, 0) = 0, \quad \Phi(0, x, 8) = 28 \text{ кВ}.$$

Здесь  $\mathbf{j}(t, x, y)$  – плотность электрического тока;  $\sigma(t, x, y)$  – проводимость плазмы;  $\Phi(t, x, y)$  – потенциал электрического поля;  $\mathbf{E}(t, x, y)$  – напряженность электрического поля. В задаче рассматривались распределения концентраций частиц и потенциала электрического поля, симметричные относительно азиму-

тального угла. Поэтому задача сводится к двумерной, и далее везде речь идет о радиальных распределениях в координатах  $x$  – радиус,  $y$  – расстояние от катода.

Уравнение (1) справедливо для электронейтральной плазмы, в которой локальные электрические поля, вызванные разделением зарядов, малы. Критерием электронейтральности плазмы является соотношение

$$d^2/(\Lambda R_0) \approx \delta n/n_e \ll 1, \quad (2)$$

где

$$\Lambda = \bar{\varepsilon}/(e E).$$

Здесь  $d$  – дебаевский радиус;  $\Lambda$  – длина релаксации энергии;  $E$  – напряженность электрического поля;  $\bar{\varepsilon}$  – средняя энергия электронов;  $e$  – элементарный заряд электронов;  $R_0$  – характерный размер неоднородности;  $\delta n$  – концентрация нескомпенсированного заряда. При характерном значении поля  $E \sim 3,0 \cdot 10^3$  В/см и  $R_0 = 3,0 \cdot 10^{-1}$  см уже при  $n_e \sim 10^{10}$  см<sup>-3</sup> критерий (2) выполняется.

Уравнение (1) решалось методом взвешенных невязок, построенном на основе методов Галеркина [6]. Расчеты проводились на криволинейных четырехугольных сетках с использованием изопараметрического преобразования [5]. В данном расчете использовались сетки размерностью  $60 \times 60$ . Точность получаемых решений контролировалась по относительной разности максимального и минимального значений полного тока, протекающего через поперечные сечения разряда. В расчете эта величина не превышала 3%.

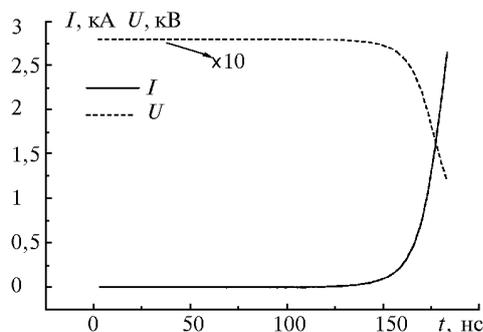


Рис. 1. Оциллограммы тока  $I(t)$  и напряжения  $U(t)$ , рассчитанные по 2D-модели

### Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены оциллограммы тока и напряжения на плазме, полученные путем 2D-моделирования. На рис. 2 приведено распределение концентрации электронов и напряженности электрического поля в начальный момент времени. Характерно, что максимальная величина электрического поля, равная  $E = 4,8$  кВ/см, располагается на оси разряда, на границе неоднородности. В центре неодно-

родности, вследствие повышенной концентрации электронов, напряженность поля примерно в 2 раза ниже среднего уровня.

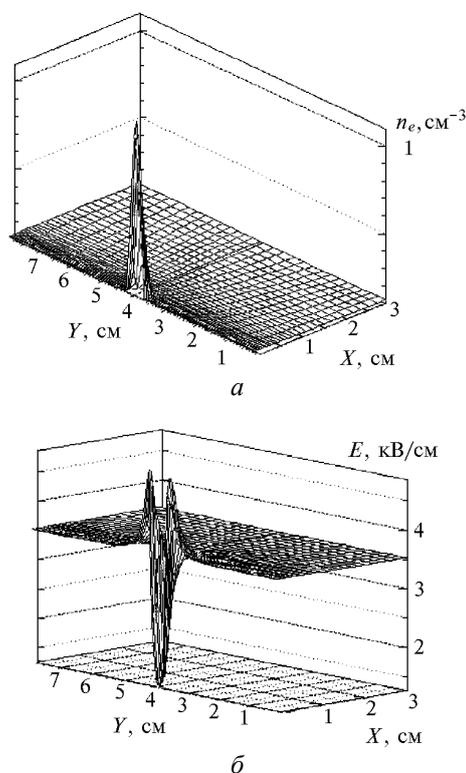


Рис. 2. Распределение концентрации электронов  $n(0, x, y)$  (а) и напряженности электрического поля  $|E(0, x, y)|$  (б) при  $t = 0$  нс

На рис. 3 представлены зависимости  $n(t, x, y)$  в пяти точках на оси разряда, соответственно в центре неоднородности  $y = 4,0$ , вблизи неоднородности  $y = 4,5$  и в остальной части объема при  $y = 5,0$ ;  $5,5$  и  $7,0$  см, а также для точки  $x = 3$  см и  $y = 8$  см, находящейся на удалении от оси разряда.

В начальной стадии разряда увеличение электронной плотности происходит по экспоненциальному закону с константой времени  $\tau = 1/(\alpha v_-)$ , где  $\alpha$  – первый коэффициент Таунсенда и  $v_-$  – скорость дрейфа электронов. Коэффициент ионизации Таунсенда сильно зависит от поля. Поэтому скорость роста концентрации электронов в центре неоднородности ниже. Максимальное же значение она имеет на границе неоднородности, в области максимального поля (рис. 3,а, кривая 3). Поэтому происходит сглаживание начальной неоднородности плотности электронов и поля. Затем в интервале времени от  $t = 50 \div 150$  нс для всех отмеченных точек рост  $n(t, x, y)$  происходит примерно с одной и той же скоростью.

При увеличении концентрации электронов до  $n_e \approx 10^{13}$  см<sup>-3</sup> начинается процесс ступенчатой ионизации, что увеличивает  $\partial n_e(t, x, y)/\partial t$  в точках с большой плотностью электронов.

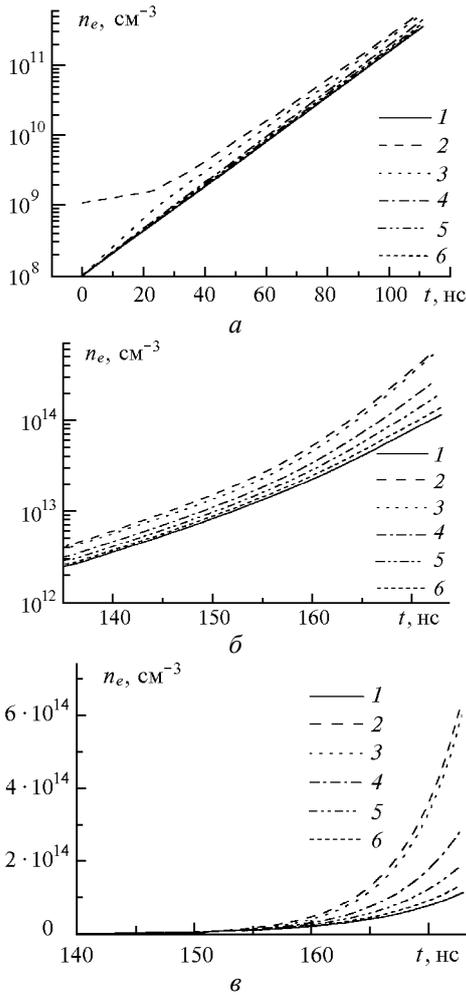


Рис. 3. Зависимости  $n(t, x, y)$  для точек: 1 –  $x=3$  и  $y=8$  см; 2 –  $x=0$  и  $y=4$  см; 3 –  $x=0$  и  $y=4,5$  см; 4 –  $x=0$  и  $y=5$  см; 5 –  $x=0$  и  $y=5,5$  см; 6 –  $x=0$  и  $y=7$  см на стадии прямой ионизации  $t=0 \div 110$  нс (а), при  $t=110 \div 160$  нс (б) и на стадии ступенчатой ионизации  $t > 160$  нс (в)

На рис. 4 представлены зависимости  $|E(t, x, y)|$  на оси разряда для  $t=0$ ; 144 и 184 нс. Максимальное искажение поля наблюдается при  $t=0$  нс. В интервале времени  $t=0 \div 144$  нс поле выравнивается и при  $t=144$  нс становится почти однородным. В интервале времени  $t=144 \div 184$  нс неоднородность поля увеличивается, но абсолютные значения неоднородности остаются малыми, в пределах 5%.

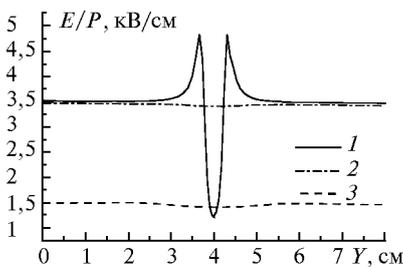


Рис. 4. Распределение напряженности электрического поля  $|E(t, 0, y)|$  по оси симметрии разряда для моментов времени  $t$ , нс: 1 – 0; 2 – 144; 3 – 184

## Распределение электрического поля

Рассмотрим характер распределения электрического поля  $E(0, x, y)$  при наличии в разряде неоднородности  $n(0, x, y)$  для начального момента времени. Из уравнения (1) получаем следующее выражение:

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial n(x, y)}{\partial x} \frac{E_x}{n(x, y)} + \frac{\partial n(x, y)}{\partial y} \frac{E_x}{n(x, y)} = 0, \quad (3)$$

где  $E_x$  и  $E_y$  – составляющие поля по координатам  $x$  и  $y$ . На оси симметрии разряда (это ось  $Y$ )  $E_x = 0$ . Учитывая знаки производных, а также принимая положительное направление поля от анода к катоду, при  $X=0$  получим выражение

$$\frac{\partial n(0, y)}{\partial y} \frac{E_x}{n(0, y)} - \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} = 0. \quad (4)$$

В окрестности точки  $x=0$  и  $y=y_0 \pm \delta y$  (центр неоднородности) имеем  $E_x = 0$  и  $\partial E_x / \partial x \approx 0$ , поле оказывается почти однородным, и согласно (5) для области  $x=0$  и  $y=y \pm \delta y$  получим выражение

$$n(0, y_0 \pm \delta y) |E(0, y_0 \pm \delta y)| \approx \text{const}$$

или

$$n(0, y_0) |E(0, y_0)| = \text{const}.$$

В центре неоднородности величина  $n(t, 0, y_0)$  больше, чем  $n(t, x, y)$  в остальной части объема, поэтому поле  $|E(0, y_0)|$  оказывается минимальным.

Максимальное значение  $E_y^m$  находится из (6) с учетом того, что  $\partial E_y / \partial y = 0$ :

$$E_y^m = \frac{\partial E_x}{\partial x} \frac{n(0, y)}{\partial n(0, y) / \partial y}. \quad (5)$$

Условие  $\partial E_y / \partial y = 0$  выполняется в интервале  $y_0 + R_0 > y > y_0 + 0,5 R_0$ , так как в этом интервале  $\partial E_x / \partial x$  увеличивается, а  $\partial n(0, y) / \partial y$  уменьшается. Расчетное значение максимального поля  $E_y^m$  (рис. 4) достигается при  $y = y_0 + 0,9 R_0$ .

Физический смысл зависимости  $E_y$ , представленной на рис. 4, состоит в том, что поток электронов в электрическом поле выбирает путь с максимальной проводимостью. В области  $y = y_0 - R_0$  происходит стягивание тока к оси разряда, поэтому  $E_y$  имеет максимальное значение. В области  $y = y_0$  концентрация заряда и плотность тока максимальны и поле  $E_y$  становится минимальным. В области  $y = y_0 + R_0$  происходит растекание тока от оси и поле  $E_y$  максимально.

Следует обратить внимание на то, что если попытаться использовать одномерную модель, в рамках которой всегда  $\partial E_x / \partial dx = 0$ , то повышение поля на границе неоднородности исчезает и характер распределения поля существенно изменяется.

### Развитие разряда на стадии прямой ионизации

В рассматриваемой газовой смеси Ne – Xe – HCl при концентрациях  $n \leq 10^{13} \text{ см}^{-3}$  рождение электронов происходит в результате ионизации атомов Xe прямым электронным ударом, а их гибель связана с диссоциативным прилипанием к молекулам HCl<sub>(0)</sub> в основном состоянии. Скорость ионизации равна:

$$\partial n(t, x, y) / (\partial t) = n(t, x, y) (\alpha - \beta) v_-, \quad (6)$$

где  $\beta$  – коэффициент прилипания. Значение  $\alpha v_-$  сильно зависит от  $|\mathbf{E}(t, x, y)|$ , это ведет к уменьшению градиента  $\nabla n(t, x, y)$ , выравниванию поля  $|\mathbf{E}(t, x, y)|/P$  и частичному выравниванию  $n(t, x, y)$ . Из рис. 2,а видно, что за первые 50 нс происходит значительное выравнивание  $n(t, 0, y)$  на оси разряда, а в интервале времени  $t = 50 \div 150$  нс (см. рис. 2) скорость ионизации  $\partial n(t, 0, y) / \partial t$  становится почти одинаковой для точек с разными значениями координат. Равенство скоростей ионизации означает выравнивание поля  $\mathbf{E}(t, x, y)$  по всему объему. Однако при почти полном выравнивании поля остается неоднородность по  $n(t, x, y)$ .

Выравнивание поля и существенное уменьшение градиента концентрации электронов в стадии действия прямой ионизации показаны на рис. 3 и 4.

Таким образом, анализ результатов показывает, что прямая ионизация электронным ударом ведет к существенному сглаживанию концентрации  $n(t, x, y)$  и выравниванию напряженности поля в объеме разряда. С точки зрения устойчивости разряда это означает, что электронейтральная плазма газового разряда, в стадии прямой ионизации электронным ударом, является устойчивой относительно случайных локальных неоднородностей концентрации  $n(t, x, y)$ .

### Развитие разряда на стадии ступенчатой ионизации

Ситуация существенно меняется при  $n > 1,0 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . С увеличением  $n(t, x, y)$  повышается

роль ступенчатой ионизации, а при  $n(t, x, y) > 10^{14} \text{ см}^{-3}$  ступенчатая ионизация становится доминирующей.

Скорость ступенчатой ионизации зависит в большей степени от концентрации электронов, чем от напряженности поля. Это ведет к увеличению градиента  $\nabla n(t, x, y)$  и соответствующему перераспределению напряженности поля  $\mathbf{E}(t, x, y)$ .

Из рис. 3,б,в следует, что в интервале времени  $t = 144 \div 184$  нс из-за ступенчатой ионизации происходит заметное увеличение разницы между максимальным и минимальным значениями  $n(t, x, y)$ .

### Выводы

1. Неоднородность электронной плотности в начальный момент времени приводит к неоднородному распределению электрического поля. В центре неоднородности, в области повышенной плотности электронов, напряженность электрического поля понижена. Максимальное значение поле имеет на оси, на границах неоднородности.

2. Показано, что в стадии прямой ионизации в диапазоне  $n(t) = (10^8 \div 10^{13}) \text{ см}^{-3}$  уменьшается градиент  $n^{-1} \nabla n(t, x, y)$ , почти полностью выравнивается электрическое поле  $E(t, x, y)$  и существенно сглаживается распределение концентраций  $n(t, x, y)$ . Электрический разряд в этой стадии устойчив к локальным неоднородностям электронной плотности  $\pm \delta n(t, x, y)$ .

3. В стадии ступенчатой ионизации  $n(t) > 10^{14} \text{ см}^{-3}$  разряд становится неустойчивым. Скорость ионизации увеличивается в областях с большей плотностью электронов.

1. Kushner M.J., Pindroh A.L., Fisher C.H., Znotins T.A., and Ewing J.J. // J. Appl. Phys. 1985. V. 57. P. 2406.
2. Krause V. // J. Appl. Phys. 1992. V. 72. N 4. P. 1237.
3. Dem'yanov A.V., Kotchetov I.V., Napartovitch A.P. // Proc. SPIE. 1994. V. 2206. P. 338.
4. Simon G., and Botticher W. // J. Appl. Phys. 1994. V. 76. N 9. P. 5036.
5. Флетчер К. Численные методы на основе метода Галеркина. М.: Мир, 1988. 348 с.
6. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкости. Т. 1 – 2. М.: Мир, 1991.

Институт сильноточной электроники СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
20 октября 1997 г.

*Yu.I. Bychkov, A.G. Yastremskii. Development of Inhomogeneity in XeCl-laser Discharge.*

Inhomogeneity of the electron density and the electric field strength in pumping discharge of XeCl-lasers has been analyzed by means of computer simulation. The two-dimensional model includes Laplace equation for potential of an electrical field, equation of an external electrical circuit and main processes of kinetics.

It is shown that inhomogeneity of electron density in the initial instant leads to inhomogeneous distribution of electrical field. In the center of inhomogeneity, in the region of high electron density, the electric field strength is lowered. The maximum value of the electric field is allocated on the axis, on the inhomogeneity borders.

In a stage of Townsend ionization, the inhomogeneity of electron density decreases. The inhomogeneity of an electrical field is smoothing. In a stage of step ionization the discharge becomes unstable. The speed of ionization is increased in the range of high electron density.