

ОДНОМЕРНАЯ МОДЕЛЬ СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО ХеСl* -ЛАЗЕРА

Одномерная модель, использующая описание плазмы разряда как серии параллельных сопротивлений, была применена для изучения влияния неоднородной предыонизации активной среды на характеристики разряда накачки стабилизированного электроразрядного ХеСl* -лазера. Особая техника иницирования разряда основана на применении предварительного слабotoчного разряда для достижения однородности плазмы разряда. Разработанная модель включает нестационарное уравнение Больцмана для описания электронной кинетики, учитывающее электрон-электронные соударения, достаточно полную кинетическую схему, содержащую кинетику активных частиц плазмы и фотонов, и систему уравнений для описания электрической цепи накачки разряда. Исследования показали, что наличие в разряде областей с повышенной начальной концентрацией электронов приводит к развитию неоднородностей в плазме разряда и нарушению пространственной однородности излучения. Также приводится обсуждение результатов влияния пространственного распределения электронов предыонизации, содержания донора галогена HCl в смеси и предварительного слабotoчного разряда на характеристики сильного разряда.

Введение

Однородность разряда накачки играет важную роль в достижении высоких выходных характеристик эксимерных лазеров. Многочисленные экспериментальные исследования показывают, что разряды в эксимерных смесях, в частности в активной среде ХеСl* -лазера, имеют тенденцию переходить из первоначально пространственно однородного состояния в такое состояние, когда на фоне однородного свечения наблюдается совокупность нитевидных каналов с повышенной плотностью тока. Развитие неоднородностей в разряде приводит к существенному уменьшению КПД лазера и к ухудшению качества излучения.

Недавно был предложен новый метод формирования стабильного и однородного разряда накачки широкоапертурных эксимерных лазеров [1]. Пространственная однородность обеспечивалась применением специальной техники инициации разряда, основанной на использовании предварительного стабилизирующего слабotoчного разряда. В настоящей работе приводятся результаты изучения влияния неоднородной предыонизации на развитие данного типа разряда. В статье также рассматриваются вопросы влияния пространственного распределения электронов предыонизации, парциального давления донора галогена HCl на развитие неоднородного разряда.

Описание модели

Для исследований была разработана модель, использующая описание плазмы разряда как серии параллельных сопротивлений. В данном типе модели, впервые предложенном в [2], весь объем разряда разбивается на N областей, расположенных параллельно направлению протекания тока и оптической оси резонатора. Каждая область i характеризуется площадью сечения A_i и начальной концентрацией электронов $n_{ei}(t=0)$. Для самосогласованного моделирования разряда накачки эксимерного лазера,

предложенного в [1], необходимо совместное решение системы уравнений для описания электрической цепи, системы уравнений баланса для различных тяжелых частиц и фотонов, а также нестационарного уравнения Больцмана для определения электронной кинетики для каждой области разряда. Отличительными качествами разработанной модели являются использование достаточно полной кинетической модели для тяжелых частиц (учитываются 22 различных сорта частиц и более 150 плазмохимических реакций) и решение нестационарного уравнения Больцмана для каждой области разряда. В уравнении Больцмана учитывались 12 упругих и 44 неупругих столкновительных процесса между электронами и другими частицами плазмы, 4 процесса электрон-ионной рекомбинации и 8 процессов генерации электронов в столкновениях между частицами плазмы, а также электрон-электронные соударения.

Рис. 1 показывает эквивалентную электрическую схему установки, использованную в расчетах. Здесь $C_0 = C_1 = 200$ нФ, $C_2 = 1,8$ нФ, $C_3 = 0,85$ нФ, $L_0 = 2,2$ мГн, $L_1 = L_2 = 40$ нГн, $L_3 = 0,5$ нГн и $R_c = 0,01$ Ом. Проводимость плазмы разряда R_d^{-1} определяется как сумма проводимостей R_i^{-1} областей разряда i .

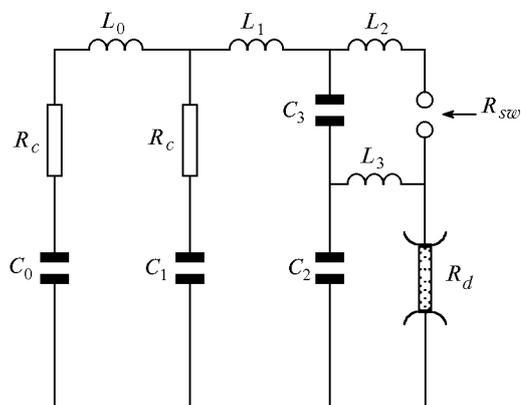


Рис. 1. Эквивалентная схема электрической цепи

Включение в схему емкостного делителя C_2/C_3 позволяет получить разряд накачки в виде последовательности слабotoчного и сильноточного разрядов. Переход между указанными стадиями разряда осуществлялся посредством запуска разрядника, сопротивление которого R_{sw} учитывалось в модели как заданная функция времени.

Результаты и обсуждение

Расчеты проводились для разряда накачки XeCl^* -лазера в смеси Ne/Xe/HeCl с полным давлением 3 атм и температурой газа 293 К. Расстояние между плоскопараллельными электродами составляло 8 см, длина разряда 60 см и ширина разряда 5 см. Первичная емкость C_0 заряжалась до напряжения 39 кВ (см. рис. 1). В качестве стандарта был принят состав смеси $\text{Ne/Xe/HeCl} = 1000/8/0,8$. При условии однородности разряда накачки выходная энергия излучения составляла 1,4 Дж и КПД 1%.

Результаты моделирования неоднородного разряда представлены для случая, когда весь объем разряда разбивался на 2 области $i = 1, 2$ с различной начальной концентрацией электронов $n_{ei}(t=0)$. Пространственное распределение электронов предыонизации определялось площадью сечения областей A_i . Область 2 с повышенной начальной концентрацией электронов отождествлялась с совокупностью всех неоднородностей в плазме разряда.

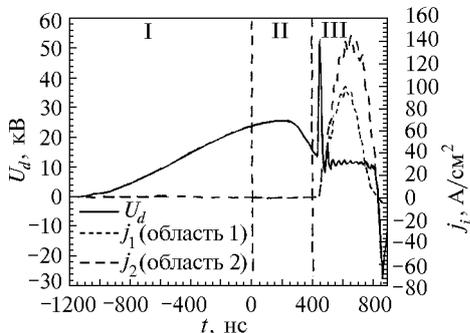


Рис. 2. Временные зависимости напряжения на плазме U_d и плотностей тока j_i в отдельных областях разряда i . I – стадия перезарядки, II – слабotoчная, III – сильноточная стадии

На рис. 2 представлены формы импульсов напряжения на плазме U_d и плотностей токов разряда j_i в обеих рассматриваемых областях для случая $n_{e1}(t=0) = 5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$, $n_{e2}(t=0) = 1,05 \cdot n_{e1}(t=0)$ и $A_1 = A_2$. Импульс разряда можно разбить на три стадии: стадию перезарядки I, слабotoчную стадию II и сильноточную стадию III. Стадия перезарядки характеризуется монотонным возрастанием напряжения на плазме до уровня 23 кВ. Предыонизация активной среды в момент времени $t = 0$ соответствует началу слабotoчной стадии. Плотность тока разряда в данной стадии не превышает 10 А/см^2 при длительности около 400 нс. Затем начинается сильноточная стадия. Как видно из приведенных временных зависимостей

плотностей токов, расчет предсказывает развитие неоднородностей, несмотря на применение стабилизирующего предварительного разряда. В течение сильноточной стадии разница между плотностями тока в областях 1 и 2 увеличивается. Плотность тока разряда в области 2 существенно выше и достигает максимального значения позже, чем плотность тока в области 1. Длительность сильноточного импульса в области 1 короче, чем в области 2.

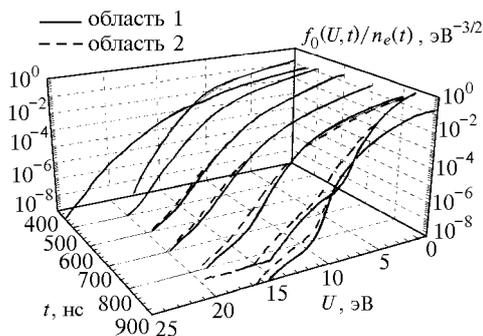


Рис. 3. Временное развитие изотропной части функции распределения электронов по скоростям

Рис. 3 показывает временное развитие изотропной части функции распределения электронов по скоростям $f_0(U, t)/n_e(t)$, нормированной на концентрацию электронов $n_e(t)$ для областей $i = 1, 2$. Во время слабotoчной и в начале сильноточной стадии функции распределения в обеих областях разряда практически совпадают. В ходе дальнейшего развития разряда заселенность области высоких энергий электронов понижается в области 1 по сравнению с областью 2. Различное временное развитие функций распределения сопровождается различным развитием соответствующих транспортных коэффициентов и коэффициентов скоростей процессов столкновений между электронами и тяжелыми частицами в рассматриваемых областях разряда. Таким образом, упрощенное рассмотрение кинетики процессов, когда соответствующие коэффициенты табулируются как функции напряженности электрического поля либо средней энергии электронов, может привести к неверным результатам.

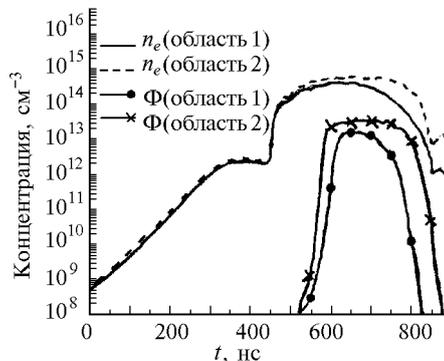


Рис. 4. Зависимости концентрации электронов $n_e(t)$ и концентрации фотонов $\Phi(t)$ для областей разряда $i = 1, 2$

На рис. 4 представлены зависимости концентраций электронов и фотонов в обеих областях разряда. Первоначальная 5% разница в концентрациях электронов возрастает к моменту максимума тока ($t = 600$ нс) до 35% и достигает одного порядка по величине к концу импульса тока. В области 2 концентрация фотонов достигает больших значений и длительность импульса излучения превышает соответствующую длительность в области 1.

Анализ развития концентраций $\text{HCl}(v)$, $v = 0, 1, 2, 3$, показывает, что во время протекания слаботочной стадии концентрация невозбужденных молекул $\text{HCl}(v = 0)$ остается практически неизменной. Концентрации колебательно возбужденных молекул $\text{HCl}(v = 1, 2, 3)$ в данной стадии экспоненциально нарастают в обеих областях разряда. После инициирования сильноточной стадии разряда концентрация $\text{HCl}(v = 0)$ понижается при сохранении дальнейшего роста концентраций колебательно возбужденных молекул. По достижении момента $t = 600$ нс концентрации $\text{HCl}(v = 1, 2, 3)$ в первой области разряда остаются неизменными во времени, в то время как соответствующие концентрации во второй области разряда уменьшаются. Таким образом, повышенная начальная концентрация электронов в области 2 ведет к усиленному выгоранию донора галогена в этой области разряда.

С помощью разработанной модели проводилось изучение влияния неоднородной предьонизации активной среды и содержания HCl в смеси на свойства плазмы разряда и выходные характеристики лазера. Для анализа использовались данные о максимальной плотности тока, длительности сильноточного импульса, степени выгорания донора галогена HCl , максимальной концентрации фотонов и плотности энергии излучения.

Расчеты для случая однородной предьонизации активной среды показали незначительное изменение указанных параметров при вариации начальной концентрации электронов. Однако в случае даже слабой неоднородности предьонизации модель предсказывает стягивание разрядного тока в области с первоначально повышенной концентрацией электронов. Так, увеличение разницы между начальными концентрациями электронов в областях разряда от 0 до 25% при одинаковых площадях областей приводит к существенному уменьшению максимальной плотности тока и длительности сильноточного импульса в области 1 по сравнению с областью 2. При начальной разнице в концентрациях электронов 10% максимальная концентрация фотонов и плотность энергии излучения в области 1 становятся пренебрежимо малыми по сравнению с соответствующими характеристиками для области 2. Таким образом, развитие неоднородностей в плазме разряда обуславливает неоднородность излучения.

Аналогичные тенденции были получены для случая, когда при неизменном соотношении на-

чальных концентраций электронов уменьшалась площадь, занимаемая областью с повышенной концентрацией электронов.

Исследования подтвердили, что неоднородное выгорание донора галогена способствует развитию неоднородностей в разряде. Выгорание происходит быстрее в областях с повышенной концентрацией электронов. Увеличение содержания донора галогена в смеси ведет к ускорению развития неоднородностей в плазме разряда. Таким образом, с точки зрения достижения наилучшей однородности разряда необходимо уменьшать парциальное давление HCl .

Экспериментально обнаружено, что применение специальной техники инициирования разряда [1] обеспечивает стабильность и высокую однородность разряда. Тем не менее результаты численных расчетов указывают на развитие неоднородностей в плазме разряда в случае проведения неоднородной предьонизации активной среды. Для изучения влияния слаботочной стадии на характеристики разряда были проведены расчеты с различной длительностью данной стадии ($0 \div 1600$ нс). Различия между максимальными плотностями тока, длительностями сильноточного импульса, степенями выгорания донора галогена, максимальными концентрациями фотонов, плотностями энергии излучения уменьшаются при применении слаботочного разряда длительностью $400 \div 600$ нс. Тем не менее стабилизирующее действие предварительного слаботочного разряда не нашло объяснения в рамках построенной модели.

Заключение

В данной статье представлены результаты численного моделирования стабилизированного электро-разрядного XeCl^* -лазера. Особенности разработанной модели являются: 1) самосогласованное решение систем уравнений для электрической цепи, системы уравнений баланса для тяжелых частиц и фотонов и нестационарного уравнения Больцмана для описания электронной кинетики; 2) использование достаточно полной кинетической модели для тяжелых частиц и электронов.

Расчеты показали, что наличие в разряде области с повышенной начальной концентрацией электронов ведет к стягиванию полного тока разряда в данную область.

Увеличение степени неоднородности или содержания донора галогена HCl в смеси, либо уменьшение площади сечения области с повышенной концентрацией электронов ведут к ускорению развития неоднородностей в плазме разряда.

В рамках данной модели стабилизирующее действие предварительного слаботочного разряда не нашло объяснения. Для исследования стабилизирующего эффекта необходимы двух- либо трехмерные модели.

1. *Bychkov Yu, Kostyrya I., Makarov M., Suslov A., Yastremsky A.* // Rev. Sci. Instrum. 1994. V. 65. P. 793.

2. *Kushner M.J., Pindroh A.L., Fisher C.H., Znotins T.A., Eving J.J.* // J. Appl. Phys. 1985. V. 57. P. 2406.

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия
Институт физики нетермической плазмы, г. Грайфсвальд, Германия

Поступила в редакцию
9 октября 1997 г.

R. Winkler, S.L. Gorchakov, D.Loffhagen. **The One-Dimensional Model of the Stabilized Discharge Pumped XeCl*-Laser.**

A spatially one-dimensional model including a parallel resistor description of the discharge plasma is used to study the effect of an inhomogeneous preionization on the improved discharge-pumped XeCl* laser arrangement. The special pumping technique of this laser discharge is based on the additional use of a stabilizing low-current preliminary discharge. The model takes into account the time-dependent electron Boltzmann equation including electron-electron interaction for the determination of the electron kinetics, an extensive reaction kinetics involving various particles and photons, and the relevant electrical circuit equations. The study has shown that density perturbations of preionization electrons lead to the inhomogeneity of the discharge plasma and the laser output. Furthermore, the impact of the spatial distribution of preionization electrons, of the HCl portion of the gas mixture, and of a low-current preliminary discharge for the discharge operation is discussed.