УДК 537.333

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВОЙНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СЛОЯ В ДИОДЕ, ЗАПОЛНЕННОМ ПЛАЗМОЙ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ

В.П. Григорьев, Е.С. Вагин, В.В. Офицеров

Томский политехнический университет
E-mail: grig@am.tpu.ru

Рассмотрена задача моделирования формирования двойного электрического слоя в диоде, заполненном гелиевой или аргоновой плазмой низкой плотности. Дается описание численной модели, разработанной в среде MatLab. Приведены результаты моделирования параметров двойного слоя и напряженности электрического поля на катоде. Определено влияние различных параметров плазмы и ускоряющего напряжения на процесс формирования двойного слоя и распределение потенциала.

Ключевые слова:
Физика плазмы, электронный пучок, двойной слой, плазменный диод, инертные газы, уравнение Пуассона.

Введение

Низкоэнергетические (10...30 кэВ) сильноточные электронные пучки с высокой плотностью энергии находят широкое применение в различных технологических процессах, связанных с изменением состояния и свойств поверхности материалов. Привлекательность низкоэнергетических пучков обусловлена их способностью переносить запасенную энергию без существенных потерь на достаточно большие расстояния и эффективно передавать ее объекту воздействия [1, 2].

Обычно для получения низкоэнергетических пучков используют плазмонаполненные диоды. При этом для осуществления генерации сильноточных пучков необходимо использовать взрывоэмиссионный катод, который работает при напряженностях электрического поля порядка сотен кВ/см. Такого уровня напряженности электрического поля при низких ускоряющих напряжениях достигаются за счет образования двойного плазменного слоя вблизи катода. Поэтому важным является вопрос создания условий возбуждения взрывной электронной эмиссии в зависимости от сорта ионизованного газа, плотности плазмы и приложенного напряжения. Из работ в этом направлении следует отметить [3], где достаточно полно рассматривался вопрос эволюции электрического поля в нестационарном прикатодном слое диода, заполненного углеродной плазмой с однозарядными ионами C^+ либо водородной плазмой с ионами H^+.

В данной работе исследуется возможность создания условий для взрывной электронной эмиссии при заполнении диода плазмой с однозарядными ионами аргона или гелия. Плазма инертных газов является более предпочтительной при использовании пучков для обработки поверхности материалов, т. к. ее ионы не вступают в химические реакции с поверхностью.

Основные уравнения модели

Рассмотрим плоский диод, заполненный плазмой с однородной плотностью n_0. Считаем, что напряжение в диоде создается приложением к аноду положительного потенциала, изменяющегося во времени по закону:

$$U(t)=\begin{cases} U_0(t/\tau_\Ф) & \text{при} \quad 0<t<\tau_\Ф, \\ U_0 & \text{при} \quad t>\tau_\Ф. \end{cases} \qquad (1)$$

Здесь U_0 – амплитуда приложенного потенциала, $\tau_\Ф$ – длительность фронта импульса.

При включении импульсного напряжения в таких системах вблизи катода возникает двойной плазменный слой, параметры которого изменяются во времени. Основные особенности изменения параметров двойного слоя на этом этапе освещены в работе [4].

Для сильноточных диодов за счет проникновения электрического поля в плазму происходит ускорение плазменных электронов и ионов, которые движутся в противоположных направлениях. Ионы достаточно быстро уходят к катоду и в результате плотность плазмы вблизи катода понижается. Под действием перепада давления возникает адиабатический поток ионов, который и формирует профиль плотности плазмы на переднем фронте проникновения поля. При этом одновременно происходит перераспределение потенциала в диоде. Все электрическое поле концентрируется в прикатодном двойном слое, размеры которого значительно меньше диодного промежутка. Результатом этого является резкое повышение напряженности электрического поля на катоде (обычно выше 100 кВ/см), достаточное для возбуждения электронной взрывной эмиссии с катода.

Математическая модель, в одномерном приближении, описывающая процесс формирования двойного слоя в прикатодной области и допускающая расчет напряженности электрического поля на катоде представляет собой систему:

$$\begin{gathered} \frac{\partial n_i}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(n_i V)=0, \\ \frac{\partial V}{\partial t}+V\frac{\partial V}{\partial x}=\frac{e}{M}\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \\ \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}=-\frac{e}{\varepsilon_0}(n_i(x,t)-n_e(x,t)). \end{gathered} \qquad (2)$$

Полагая функцию распределения электронов по скоростям максвелловской, для определения плотности электронов используем следующее выражение

$$n_e(x,t) = n_0 \exp\left(-\frac{e\varphi(x,t)}{T_e}\right), \qquad (3)$$

где $n_i(x,t)$, $n_e(x,t)$, см$^{-3}$ – плотности ионов и электронов соответственно, $V(x,t)$, см/с – скорость ионов, $\varphi(x,t)$, B – потенциал, формируемый в двойном слое, e – элементарный заряд, M – масса иона, T_e – температура электронов плазмы в эВ, ε_0 – электрическая постоянная.

Граничные условия записываются по координате x в области диодного промежутка $0<x<l$, где l – координата анода, а начальные условия записываются в границах численного счета по времени $0<t<T$ и имеют соответственно вид:

$$n_i(l,t) = n_e(l,t) = n_0, \quad V(l,t) = V(x,0) = V_0,$$
$$\varphi(0,t) = 0, \quad \varphi(l,t) = U(t). \qquad (4)$$

При решении данной задачи удобно использовать разностные методы. В основе этих методов лежит сведение дифференциальной задачи к системе линейных алгебраических уравнений. При этом система уравнений (2) в разностях преобразуется к виду:

$$n_{ik}^{n+1} = n_{ik}^n - V_{ik}^n \frac{\tau}{2h}[n_{ik+1}^n - n_{ik-1}^n],$$
$$V_i^{n+1} = \frac{V_{k+1}^n + V_{k-1}^n}{2} + \tau\left[\frac{e}{M}\frac{\varphi_{k+1}^n - \varphi_{k-1}^n}{2h} - V_k^n \frac{V_{k+1}^n - V_{k-1}^n}{2h}\right], \qquad (5)$$
$$\varphi_{k+1}^{n+1} - 2\varphi_k^{n+1} + \varphi_{k-1}^{n+1} = -h^2 \frac{e}{\varepsilon_0}(n_{ik}^n - n_{ek}^n),$$

на сетке:

$$\omega_{h\tau} = \{(x_k, t_n); \quad k = 1,2,\ldots,K-1; \quad n = 0,1,\ldots,N-1\}.$$

Моделирование и анализ результатов

Моделирования формирования двойного слоя проводится путем численного решения системы конечно-разностных уравнений (5). Алгоритм решения реализован в среде MatLab.

В расчетах параметры плазмы выбирались близкими к экспериментальным по генерации сильноточных пучков в плазмонаполненных диодах [1]. А именно,

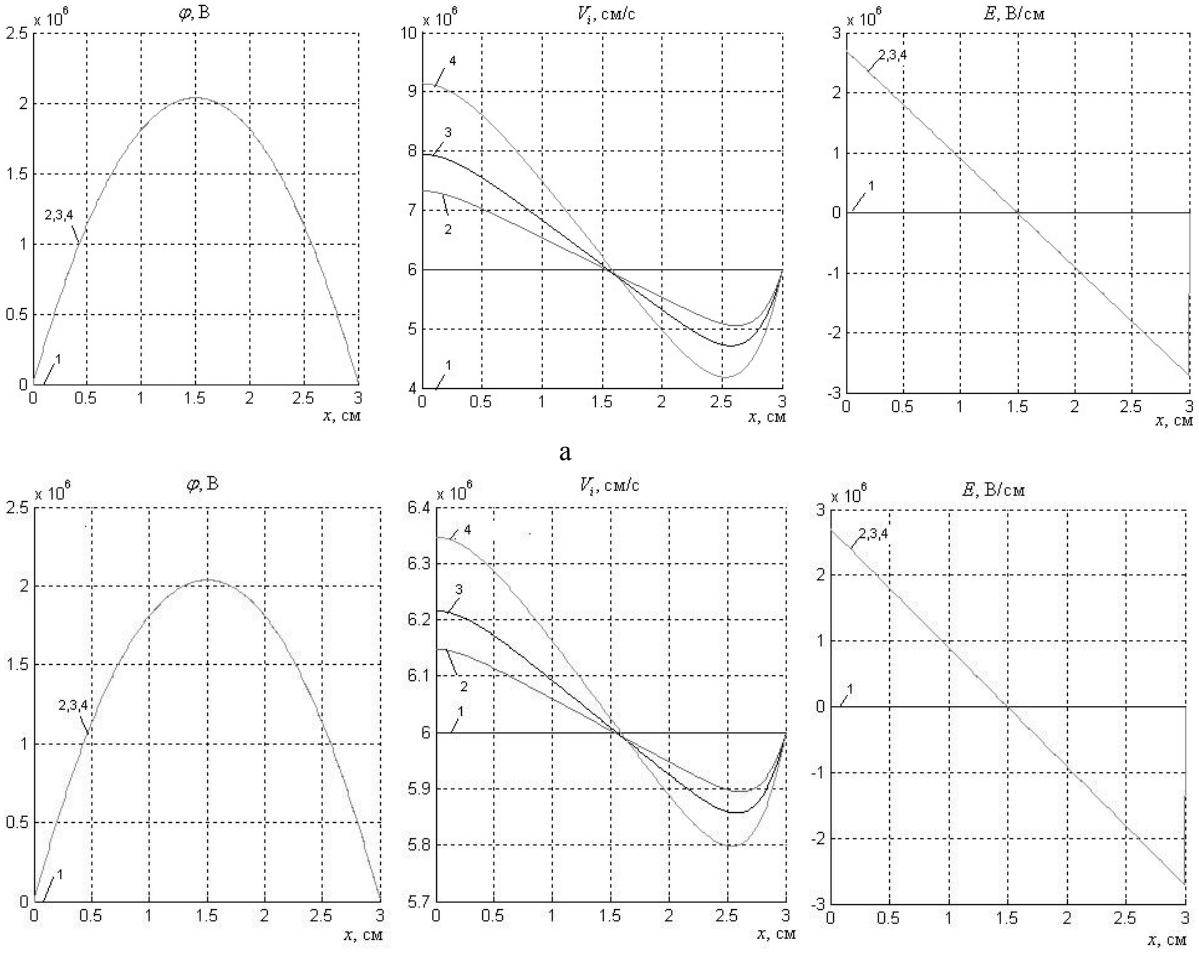

Рисунок. *Распределение потенциала φ, скорости V_i и напряженности поля E в моменты времени: 1) t=0; 2) 12; 3) 18; 4) 30 нс для газов: гелий (а), аргон (б)*

ускоряющее напряжение U_0=10⁴ В, начальная скорость ионов V_0=6·10⁶ см/с, температура электронов T_e=2 эВ, плотность ионов n_0=10¹¹...10¹³ см⁻³, диодный промежуток l=1...3 см, длительность импульса τ=30 нс.

Таблица. *Основные параметры численных расчетов и значения φ_{max}, E_{max}, V_{max}*

Газ	n_0, см$^{-3}$	l, см	$\tau_ф$, нс	φ_{max}, 10^5, В	E_{max}, 10^6, В/см	V_{max}, 10^6, см/с
He	10^{11}	1,0	6	0,3	0,1	6,1
Ar	10^{12}	1,0	6	2,5	1,0	7,2
Ar	10^{13}	1,0	6	25,0	10,0	20,0
Ar	10^{11}	1,0	6	0,3	0,1	6,0
Ar	10^{12}	1,0	6	2,5	1,0	6,1
Ar	10^{13}	1,0	6	25,0	10,0	7,3
He	10^{12}	1,0	15	2,5	1,0	6,7
Ar	10^{12}	1,0	15	2,5	1,0	6,1
He	10^{12}	1,5	15	5,1	1,5	7,3
Ar	10^{12}	1,5	15	5,1	1,5	6,2
He	10^{12}	3,0	15	21,0	3,0	9,1
Ar	10^{12}	3,0	15	21,0	3,0	6,4

Распределение потенциала и величина напряженности электрического поля на катоде рассчитывались при различных значениях этих параметров, при этом принималось, что диодный промежуток заполнен аргоновой либо гелиевой плазмой с однозарядными ионами.

Результаты численных расчетов приведены в таблице. На рисунке представлено распределение потенциала φ, скорости V_i и напряженности поля E при n_0=10¹² см⁻³, $\tau_ф$=15 нс, l=3 см, φ_0=10 кВ, T_e=2 эВ.

Из представленных результатов можно сделать вывод, что плотность n_0~10¹² см⁻³ достаточна для формирования напряженности поля E~10⁶ В/см, обеспечивающей процесс взрывной эмиссии на катоде диода. Увеличение значения плотности n_0 и длины диодного промежутка l приводит к пропорциональному росту напряженности поля.

Заключение

Использование конечно-разностных методов численного решения в среде MatLab позволяет рассчитать параметры двойного слоя и напряженности электрического поля на катоде плазмонаполненного диода, в частности, определить степень влияния на них параметров плазмы. Представленные результаты указывают на возможность возбуждения взрывной электронной эмиссии на катоде при относительно низких ускоряющих напряжениях и сравнительно невысоких плотностях наполняющей диод гелиевой или аргоновой плазмы (10¹¹...10¹³ см⁻³).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назаров Д.С., Озур Г.Е, Проскуровский Д.И. Генерация низкоэнергетичных сильноточных электронных пучков в пушке с плазменным анодом // Известия вузов. Физика. – 1994. – Т. 37. – № 3. – С. 100–114.
2. Григорьев В.П., Коваль Т.В., Кухта В.Р., Рахарджо П., Уемура К. Исследование транспортировки и фокусировки низкоэнергетического электронного пучка в ионизованном аргоне низкого давления // Журнал технической физики. – 2008. – Т. 78. – № 1. – С. 104–108.
3. Крейндель М.Ю., Литвинов Е.А., Озур Г.Е., Проскуровский Д.И. Нестационарные процессы в начальной стадии формирования сильноточного электронного пучка в плазмонаполненном диоде // Физика плазмы. – 1991. – Т. 17. – № 12. – С. 1425–1431.
4. Иваненков Г.В. Двойные слои в сильноточном плазменном диоде // Физика плазмы. – 1982. – Т. 8. – № 6. – С. 1184–1191.

Поступила 14.04.2008 г.