

Отчет от пользователя alexandrov, e-mail: a\_alex@itam.nsc.ru

Александров А.Л., с.н.с. Института Теоретической и Прикладной Механики СОРАН (ИТПМ СО РАН)

I. *Тема работы:* PIC-MCC Моделирование низкотемпературной плазмы при наносекундном пробое в гелии.

II. *Состав коллектива:* с.н.с. Александров А.Л., в.н.с. Швейгерт И.В., м.н.с. Арискин Д.А. (все из ИТПМ СОРАН).

III. *Научное содержание работы:*

1. Электрический разряд в перенапряженных промежутках при низком давлении в гелии применяется для быстрой коммутации импульсов высокой мощности. В данной работе проводилось моделирование электрического пробоя в симметричной "сэндвич-конструкции, между плоскими катодами из карбида титана и расположенным между ними сетчатым анодом с высокой прозрачностью (так называемый открытый разряд). Давление гелия составляло 6-10 Торр, напряжение на катоде 10-20 киловольт, межэлектродное расстояние 3 мм. Электрический пробой развивался через несколько десятков наносекунд после приложения напряжения, далее ток возрастал экспоненциально с характерным временем 0.5 - 1 нс (время коммутации) до значений 100-200 А/см<sup>2</sup>.

Для моделирования процессов в плазме развивающегося пробоя применялся метод частиц в ячейках со столкновениями по Монте-Карло (Particles in Cells - Monte Carlo Collisions, PIC-MCC), в котором функции распределения для образующих плазму частиц находятся путем траекторного моделирования движения частиц.

2. Механизм пробоя в гелии в течение многих лет представляет фундаментальный интерес вследствие аномальной формы кривой Пашена. Детальное объяснение этому феномену было получено в недавних работах (например, Hartmann et al., Plasma Sources Sci. Technol., 2000, v.9, p.183), в которых было показано, что развитие пробоя при низких давлениях во многом определяется катодной эмиссией за счет быстрых атомов гелия, образующихся при резонансной перезарядке ионов. Кроме этого, в ряде работ отмечалась важная роль фотоэмиссии с катода жестким ультрафиолетовым излучением резонансной линии гелия (58 нм). Поэтому, для моделирования субнаносекундного пробоя необходима разработка модели, учитывающей кинетику и перенос быстрых атомов гелия и фотоэмиссию резонансным излучением.

3. Модель наносекундного разряда в гелии, предложенная в настоящей работе, вклю-

чает кинетику электронов, ионов, быстрых атомов гелия, рождающихся при перезарядке ионов на буферном газе, и генерацию резонансных квантов при возбуждении атомов гелия. Для моделирования кинетики используется метод PIC-MCC. Уравнения движения модельных частиц интегрируются по времени, при этом на каждом временном шаге методом Монте-Карло разыгрывается вероятность того или иного вида столкновений с буферным газом (перенос момента, возбуждение атома гелия, ионизация гелия; для ионов отдельно рассматривается резонансная перезарядка) в соответствии с известными сечениями каждого типа столкновений. Рассматривается большой ансамбль модельных частиц, каждая из которых, в свою очередь, представляет большое количество электронов, ионов или быстрых атомов. Макроскопические параметры плазмы получаются усреднением характеристик модельных частиц в каждой ячейке расчетной сетки. Электрическое поле получается из решения уравнения Пуассона. Электронная эмиссия с катода учтена в модели с использованием эмпирических коэффициентов эмиссии для бомбардировки катода ионами или быстрыми атомами.

Фотоэмиссия за счет резонансного излучения учитывается с помощью расчета объемной скорости возбуждения атомов гелия, приводящего к быстрому последующему излучению резонансных квантов. Но, поскольку резонансное излучение тепловых атомов захватывается буферным газом, его вклад в механизм наносекундного пробоя пренебрежимо мал. Поэтому в фотоэмиссии учитываются только реакции возбуждения с участием быстрых атомов гелия, излучение которых имеет доплеровский сдвиг и поэтому попадает на поверхность катода практически без задержки.

Рассматриваемая модель одномерна в пространстве (что допустимо вследствие плоской геометрии разряда) и трехмерна по скоростям частиц. Алгоритм моделирования по методу PIC-MCC следующий:

- 1) Задается некоторое начальное распределение модельных частиц по координате и скоростям;
- 2) Решается уравнение движения для каждой частицы с учетом электрического поля, при этом на каждом временном шаге разыгрывается то или иное событие столкновения по заданному в зависимости от энергии частицы набору сечений;
- 3) В соответствии с типом столкновения, пересчитывается энергия и направление скорости частицы, а также рождается новая частица (ион при ионизации или быстрый атом при перезарядке иона; при реакции возбуждения с участием быстрого атома

или иона на катоде рождается фотоэмиттированный электрон с вероятностью, равной коэффициенту фотоэмиссии).

4) При падении частицы на поверхность катода происходит поглощение частицы с рождением эмиттированного электрона (также в соответствии с коэффициентом эмиссии); на катоде происходит поглощение частиц с вероятностью, связанной с прозрачностью анодной сетки.

5) После каждого временного шага по методу частиц в ячейках пересчитываются макроскопические параметры плазмы (плотности электронов, ионов и быстрых атомов, их средняя энергия, ток), а также решается уравнение Пуассона для нахождения электрического поля.

6) Повторяются этапы 2) - 5) на следующем временном шаге.

4. Моделирование электрического пробоя позволило выяснить следующий механизм субнаносекундного экспоненциального возрастания тока. На начальном этапе развития пробоя электроны, пролетая сквозь прозрачную анодную решетку, совершают осцилляции между катодами. При этом нарабатывается плотность плазмы и накапливаются быстрые атомы. По мере нарастания их количества возрастает фотоэмиссионный ток с катода. Это вызывает дальнейшее увеличение плотности плазмы, и ток разряда нарастает экспоненциально. Когда плотность плазмы достигает  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$ , становится также значим эмиссионный ток за счет бомбардировки катода тяжелыми частицами (ионами и быстрыми атомами).

На следующем этапе развития пробоя наблюдается экспоненциальный рост величины тока с еще меньшей постоянной времени. Здесь основной вклад в ток вносит эмиссия тяжелыми частицами. Наконец, на финальном этапе, когда плотность быстрых атомов челика, снова главную роль играет фотоэмиссия (так как за счет резонансного обмена возбуждением между тепловыми и быстрыми атомами вклад доплеровски сдвинутых резонансных фотонов возрастает).

На рисунке приведены графики роста эмиссионных токов по мере развитии пробоя.

IV. Использование кластера НГУ позволило существенно ускорить расчеты по применяемой модели. С помощью распараллеливания (использовался язык программирования OpenMP Fortran) был оптимизирован расчет траекторий модельных частиц в методе PIC-MCC. Использование четырех потоков вычисления сократило время расчета каждой конфигурации разряда более чем в два раза.

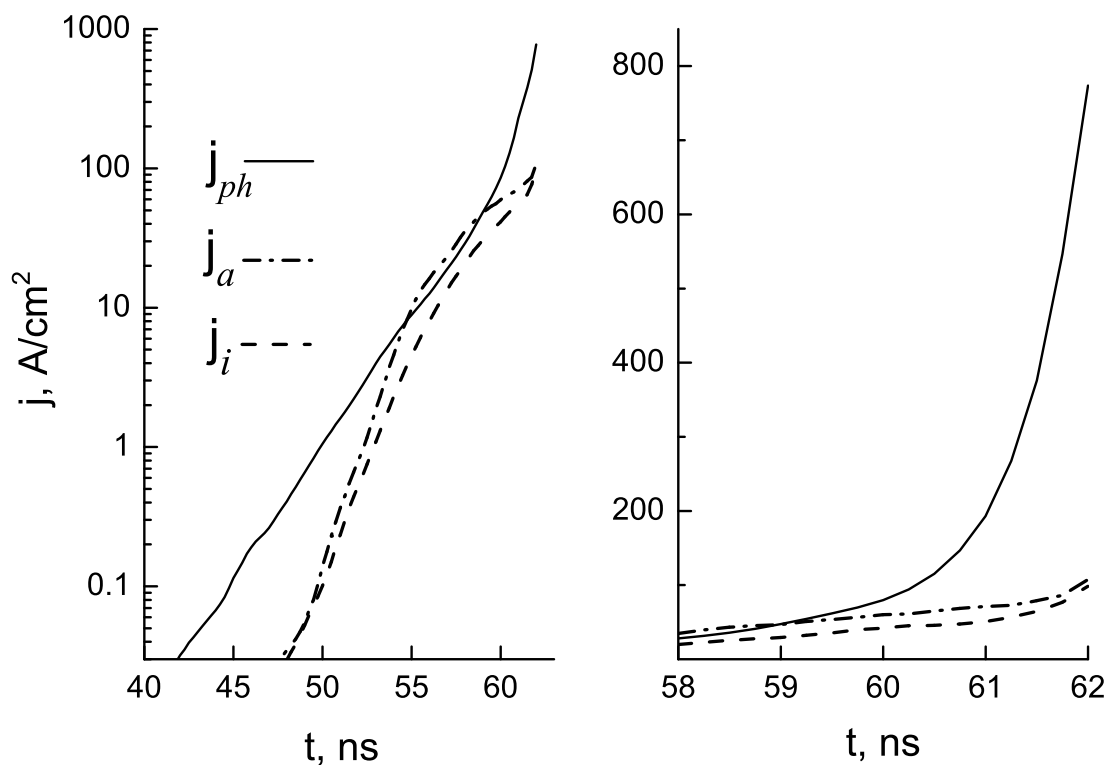


Рис. 1: Зависимость от времени токов эмиссии с катода, вызванных фотоэмиссией ( $j_{ph}$ ), бомбардировкой быстрыми атомами ( $j_a$ ) и ионами ( $j_i$ ).

#### V. Публикации:

I.V. Schweigert, A.L. Alexandrov, P. A. Bokhan, and Dm. E. Zakrevsky. "Mechanism of Formation of Subnanosecond Current Front in High-Voltage Pulse Open Discharge". Physical Review E, 2014 (принято в печать).

A.L. Alexandrov, I.V. Schweigert, P. A. Bokhan, and Dm. E. Zakrevsky. "Breakdown development in helium in high voltage open discharge with subnanosecond current front". Plasma Sources Science and Technology (подано в печать).

VI. Наш коллектив хотел бы выразить благодарность всем работникам ИВЦ НГУ. Впечатления очень хорошие и мы получили существенную помощь в работе.