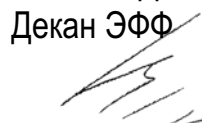


УТВЕРЖДАЮ

Декан ЭФФ



Г.С. Евтушенко

« 19 » ноября 2008 г.

В.В. Рыжов, В.А. Шкляев

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Методические указания к выполнению лабораторных работ
по курсу «Физика пучков заряженных частиц» для магистрантов,
обучающихся по магистерской программе 210102
«Микроволновая электроника» направления 210100
«Электроника и микроэлектроника»

Издательство
Томского политехнического университета
2008

УДК 539.121.4(07)
ББК 22.383.5я73
Р93

Рыжов В.В.


Р93 Моделирование формирования и транспортировки пучков заряженных частиц: методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Физика пучков заряженных частиц» для магистрантов, обучающихся по магистерской программе 210102 «Микроволновая электроника» направления 210100 «Электроника и микроэлектроника» / В.В. Рыжов, В.А. Шкляев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 29 с.

ISBN 98298-369-1


УДК 539.121.4(07)
ББК 22.383.5я73

Методические указания рассмотрены
и рекомендованы к изданию методическим семинаром
кафедры сильноточной электроники ЭФФ
« 12 » ноября 2007 г.

Зав. кафедрой СЭ
член-корреспондент РАН

 Н.А. Ратахин

Председатель учебно-методической
комиссии ЭФФ

 А.Н. Гормаков

Рецензент

Доктор физико-математических наук,
заведующий кафедрой физики плазмы ТГУ

А.В. Козырев

ISBN 98298-369-1

© Рыжов В.В., Шкляев В.А., 2008
© Томский политехнический университет, 2008
© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2008

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. PIC-код, как метод исследования	4
Описание взаимодействия частиц и полей	6
Описание программы TRACKS (ES-1D).....	8
2. Закон Чайльда-Ленгмюра («Закон $3/2$ »)	10
3. Биполярный вакуумный диод	15
4. Транспортировка пучка заряженных частиц.....	20
Моделирование, нестационарный виртуальный катод.....	22
Моделирование, стационарный виртуальный катод.....	24
Список литературы	28

Цель данных лабораторных работ это закрепление материала, полученного на лекциях по курсу «Физика пучков заряженных частиц» и знакомство с одним из основных методов моделирования в физике плазмы – методом крупных частиц.

ВВЕДЕНИЕ

Сильноточный пучок можно рассматривать как упорядоченный поток заряженных частиц, на эволюцию которого определяющее влияние оказывают собственные электрические и магнитные поля. Благодаря бурному развитию (начиная с 60-х гг.) мощной высоковольтной импульсной техники были разработаны методы генерации сильноточных импульсных пучков электронов и ионов с кинетической энергией частиц от 100 кэВ до ≥ 10 МэВ. Современные исследования генерации сильноточных импульсных пучков электронов и ионов включают в себя теорию, эксперимент и численное моделирование, которое даёт результаты, весьма полезные в теории и эксперименте и позволяет экономить много времени. Моделирование с помощью PIC (particle-in-cell) метода или метода крупных частиц прошло путь от искусства к науке и сейчас используется во всем мире. По мере улучшения параметров компьютеров затраты времени на моделирование снижались, и сейчас такие программы можно использовать на персональных компьютерах или же очень быстро получать результаты на больших компьютерах. Теперь моделирование с помощью метода крупных частиц используется не только в больших лабораториях, но и небольшими группами исследователей в университетах.

1. PIC-КОД, КАК МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Численное моделирование служит методом познания, дополняющим чисто теоретические, аналитические или экспериментальные исследования, и позволяет исследовать новые физические явления или же дать более точное описание тех процессов, которые уже были предсказаны теоретически или исследованы экспериментальным путем.

Тесная связь моделирования с теорией и экспериментом дает наилучшие результаты в работе. На протяжении 50-х годов было выполнено много работ по моделированию электронных пучков в вакуумных приборах с помощью метода крупных частиц (англ.: particle-in-cell). Идеи

использования этого метода принадлежат многим ученым: Хонки, Бунеман, Даусон, Байерс и др. [1–3].

Для того чтобы приступить к выполнению лабораторных работ, необходимо познакомиться с основами метода крупных частиц и изучить устройство программы, основанной на данном методе.

Общие представления о PIC-методе

Модель крупных частиц представляет собой набор заряженных частиц конечных размеров, которые движутся без столкновений, свободно проникая друг в друга.

Движение частиц происходит под действием сил, приложенных со стороны внешних и собственных электрических и магнитных полей. Поля определяются в узлах сетки, которая накладывается на расчетную область пространства. Каждая частица представляет собой облако пространственного заряда, линейные размеры которого совпадают с размерами ячейки сетки (рис. 1.1).

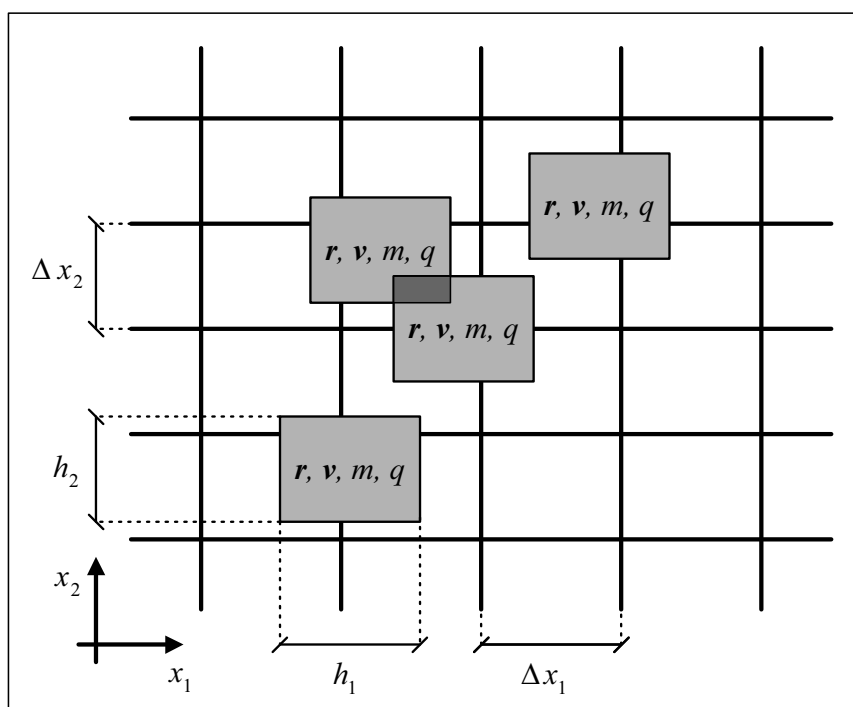


Рис. 1.1. Двумерный вариант модели крупных частиц, размеры частицы h_1 и h_2 совпадают с размерами ячейки сетки Δx_1 и Δx_2 соответственно

Основным преимуществом этого метода является временная зависимость. Однако существуют недостатки метода крупных частиц: при решении простейших задач могут появляться эффекты, связанные с на-

коплением ошибок в вычислительном цикле; вычислительный процесс данным методом требует большого количества времени.

Описание взаимодействия частиц и полей

Описание взаимодействия частиц и полей разбивается на два этапа:

- 1) Расчет полей, которые создаются частицами и внешними источниками.

Поля находятся из решения уравнений Максвелла (либо уравнения Пуассона) по известным координатам и скоростям частиц.

$$\nabla \vec{E} = 4\pi\rho, \quad (1.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \vec{j}, \quad (1.2)$$

$$\nabla \vec{H} = 0, \quad (1.3)$$

$$\nabla \times \vec{E} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad (1.4)$$

где ρ – плотность заряда, которая зависит от координат частиц; \vec{j} – вектор плотности тока; который зависит от скоростей и координат частиц; H, E – напряженности магнитного и электрического полей; c – скорость света.

- 2) Определение движения частиц под действием приложенных сил по решению уравнений движения:

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = v_i,$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} = F_i / m,$$

где $i=1, 2, 3$ и соответствует номерам координат.

Вычислительный цикл состоит из попеременного решения этих двух задач. На каждом шаге по времени Δt в методе крупных частиц вычисляются значения полей при известном расположении частиц, а затем вычисляются новые координаты и скорости частиц.

Цикл начинается в момент времени $t = 0$ с заданными начальными и граничными условиями для координат и скоростей частиц. Компьютер выполняет расчеты в течение заданного числа временных шагов. Результаты формируются или в виде мгновенного снимка в определенные моменты времени, или представляют собой временные зависимости.

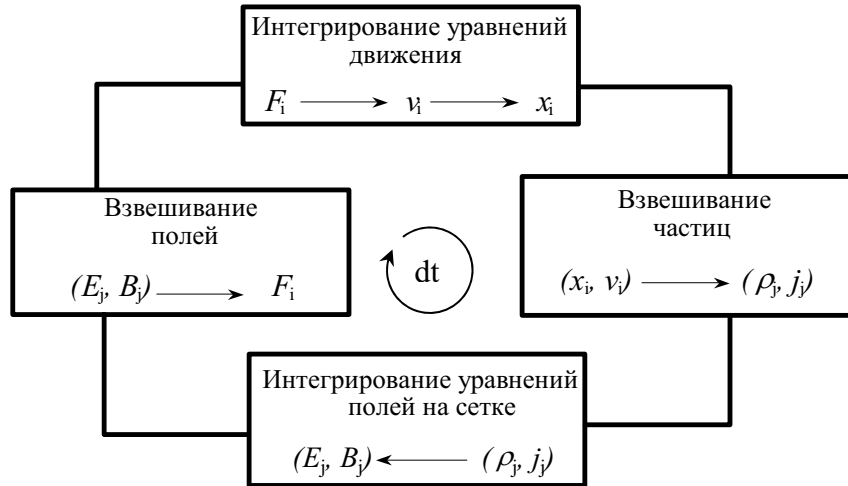


Рис. 1.2. Вычислительный цикл (один шаг по времени) в программе моделирования методом крупных частиц

Проследим за ходом вычислительного цикла, показанного на рис. 1.2, начиная от исходных значений координат и скоростей частиц. Необходимо помнить, что в процессе участвуют сотни и тысячи частиц. Величины, описывающие частицы, такие как скорости и координаты, известны при $t = 0$ и, можно вычислить все величины в пространстве v_i и x_i , которое называется фазовым пространством. Связи между координатами и скоростями частиц и полевыми величинами устанавливаются при первом вычислении плотности заряда и тока на сетке; на этом шаге мы должны знать, как вычислять плотности по координатам и скоростям частиц. Процесс вычисления зарядов и токов предполагает «взвешивание» этих величин по узлам сетки, которое зависит от координат частиц.

Под «взвешиванием» понимается определение величины заряда, находящегося в ячейке сетки, по координатам частиц.

После того как плотности заряда и тока на сетке определены, мы можем использовать различные методы определения электрических и магнитных полей. Так как поля известны только в узлах сетки, а частицы распределены по всему пространству внутри сетки, то необходимо снова выполнять «взвешивание», то есть для получения силы, действующей на частицы, проводить интерполяцию поля по его узловым значениям.

Существуют различные методы решения уравнений для напряженности полей. Одним из наиболее распространенных методов решения уравнения Пуассона в одномерной геометрии является метод прогонки.

Дифференциальное уравнение второго порядка после представления в конечно-разностном виде может быть записано следующим образом

$$A_i y_{i-1} - C_i y_i + B_i y_{i+1} = -F_i. \quad (1.5)$$

Для решения уравнения вида (5) предполагается наличие рекуррентного соотношения вида (6), а коэффициенты α_{i+1} и β_{i+1} вычисляются по формулам (7) и (8).

$$y_i = \alpha_{i+1}y_{i+1} + \beta_{i+1}, \quad (1.6)$$

$$\alpha_{i+1} = \frac{B_i}{C_i - \alpha_i A_i}, \quad (1.7)$$

$$\beta_{i+1} = \frac{A_i \beta_i + F_i}{C_i - \alpha_i A_i}. \quad (1.8)$$

Отметим, что метод прогонки не требует зарядовой квазинейтральности всей системы и не периодичности решений.

Описание программы TRACKS (ES-1D).

Существует множество программ, использующих данный вычислительный цикл (KARAT, OOPIC, Magic). Одной из таких программ является одномерная электростатическая программа TRACKS (ES-1D), разработанная в теоретической лаборатории Института сильноточной электроники СО РАН. Устройство программы во многом соответствует схеме, приведенной выше.

В программе используются следующие основные входные параметры, которые характеризуют свойства пучка заряженных частиц, геометрию пространства и модель:

Таблица 1

Входные параметры

Вкладка	Параметр	Расшифровка	Е.И.
Diod	Length	длина зазора	см
	Voltage	напряжение	В
	Number of Cell	количество ячеек на которые разбивается сетка	
	Timestep	шаг по времени	с
	End Time	конечное время расчета	с
Electrons и Ions	Current	плотность тока инжектируемого пучка	А/см ²
	Energy	энергия частиц	эВ
	QEPT	количество крупных частиц инжектируемых с электродов в каждый момент времени	
Output	Save Results in	Выбор директории для сохранения результатов расчета	
	Data Output	Выбор выводимых результатов	

Вывод формируется в виде файлов с соответствующим именем. Каждый файл содержит таблицу данных. Описание файлов вывода смотрите в табл. 2.

Таблица 2

Вывод

Название файла	Колонки	Расшифровка	Е.И.
Динамические результаты – отображающие развитие параметров во времени			
Cur.dat ICur.dat	time	Время	с
	In	Инжектируемый ток	А/см ²
	Left	Ток на левый электрод	
	Right	Ток на правый электрод	
Статические – мгновенные фотографии состояния системы			
Ro.dat	x	Координата	м
	Ro	Распределение заряда	Кл/м
	Fi	Распределение потенциала	В
	Ef	Распределение напряженности электрического поля	В/м
Phase.dat IPhase.dat	x	Координата частицы	м
	v	Скорость частицы	м/с

Эти характеристики дают далеко не полную физическую картину, но достаточны для понимания тех процессов, которые протекают в плоском вакуумном диоде.

Вопросы

1. В чем заключается суть метода крупных частиц?
2. Что включает вычислительная операция «взвешивание частиц» и «взвешивание полей»?
3. На какое количество этапов вычислений разделяется один шаг по времени в методе крупных частиц?
4. Основные преимущества и недостатки метода крупных частиц.

2. ЗАКОН ЧАЙЛЬДА-ЛЕНГМЮРА («ЗАКОН 3/2»)

Теория

Рассмотрим вакуумный промежуток, ограниченный двумя плоскими бесконечными параллельно расположенными проводящими электродами (рис. 2.1), к которому приложено напряжение U . Расстояние между электродами d . Будем считать, что один из электродов, например, катод, работает в режиме неограниченной эмиссионной способности. Понятно, что в данном случае ток электронов будет ограничен пространственным зарядом.

Режим неограниченной эмиссионной способности катода означает, что эмиссионная способность катода может поддерживать любой ток диода.

Рассмотрим случай, когда эмитирующим электродом является катод, а заряженные частицы, которые мы рассматриваем – электроны. Потенциал на катоде равен $\varphi_k = 0$, а на аноде – $\varphi_a = U$. Отрицательно заряженные электроны, эмитированные с катода с нулевой энергией, летят, ускоряясь, к положительно заряженному аноду. Так как катод работает в режиме неограниченной эмиссионной способности, напряженность электрического поля вблизи катода $E(z=0) = 0$.

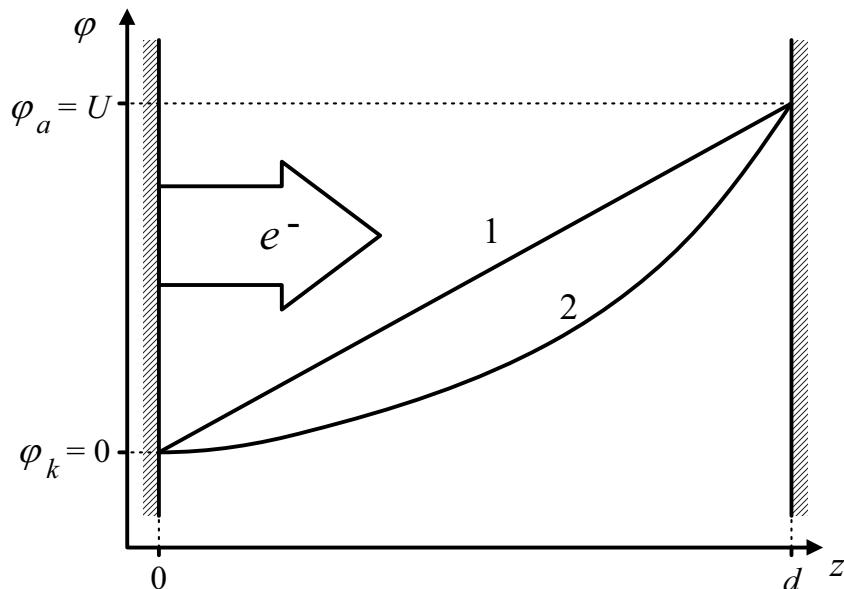


Рис. 2.1. Схема плоского вакуумного диода:
кривые 1 и 2 – распределение потенциала в зазоре без объемного заряда
и с объемным зарядом соответственно

Найдем плотность тока пучка, ограниченного объемным зарядом, в таком диоде, полагая, что катод работает в режиме неограниченной эмиссионной способности, а анод не эмитирует заряженные частицы. Рассмотрим нерелятивистский случай (то есть скорость движения электронов много меньше скорости света) и пренебрежем краевыми эффектами и собственным магнитным полем пучка, то есть будем считать, что электроны летят строго по нормали к поверхности электродов. Тогда, уравнение Пуассона, описывающее распределение электростатического потенциала φ в зазоре, запишется в виде:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = -4\pi\rho, \quad (2.1)$$

где ρ – плотность объемного заряда электронов.

! Отметим, что все вычисления выполняются в системе СГС.

Известно, что $\rho = j/v$, где j – плотность тока пучка, а v – скорость движения электронов. Поскольку энергия электронов $\frac{mv^2}{2} = e\varphi$, где e – величина заряда электрона, то уравнение Пуассона запишется следующим образом:

$$\frac{d^2 \varphi}{dz^2} = 4\pi j \left(\frac{m}{2e} \right)^{1/2} \frac{1}{(\varphi)^{1/2}}. \quad (2.2)$$

Умножим уравнение (2.2) слева и справа на $d\varphi/dz$ и проинтегрируем.

Получим:

$$\frac{1}{2} \left(\frac{d\varphi}{dz} \right)^2 = 4\pi j \left(\frac{m}{2e} \right)^{1/2} 2(\varphi)^{1/2} + C_1. \quad (2.3)$$

Константа интегрирования $C_1 = 0$, так как на катоде (т.е. при $z=0$) $\varphi = 0$ и $E = 0$. Тогда из уравнения (2.3) получаем:

$$\frac{d\varphi}{\varphi^{1/4}} = \left[16\pi j \sqrt{\frac{m}{2e}} \right]^{1/2} dz. \quad (2.4)$$

Проинтегрировав уравнение (2.4), имеем:

$$\frac{4}{3} \varphi^{3/4} = \left[16\pi j \sqrt{\frac{m}{2e}} \right]^{1/2} z + C_2. \quad (2.5)$$

Константа $C_2 = 0$, так как на катоде (т.е. при $z=0$) $\varphi = 0$.

Накладывая граничные условия на выражение (2.5), получим зависимость плотности тока пучка от напряжения и длины зазора:

$$j_{CL} = \frac{1}{9\pi} \left(\frac{2e}{m} \right)^{1/2} \frac{U^{3/2}}{d^2}. \quad (2.6)$$

Это соотношение называется *законом Чайльда-Ленгмюра* или “*Законом 3/2*”. Выражение (2.6) выполняется, если катод работает в режиме неограниченной эмиссионной способности.

Подставив все постоянные величины ($e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, $m = m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$) в уравнение (2.6), получим формулу для оценки плотности тока электронного пучка:

$$j_{CL} \left[\frac{\text{мкА}}{\text{см}^2} \right] = 2,33 \frac{U^{3/2} [В]}{d^2 [\text{см}]}. \quad (2.7)$$

Рассмотрим случай, когда с анода эмитируются ионы, а катод не эмитирует заряженные частицы. Пусть анод работает в режиме неограниченной эмиссионной способности. Тогда, подставив постоянные величины в (2.6), найдем формулу для оценки плотности тока ионного пучка:

$$j_{CL} \left[\frac{\text{мА}}{\text{см}^2} \right] = 1,72 \left(\frac{z}{A} \right)^{1/2} \frac{U^{3/2} [\text{кВ}]}{d^2 [\text{см}]}. \quad (2.8)$$

где z – зарядовое состояние иона, A – масса иона в а.е.м.

Вопросы

1. Какой катод является катодом с «неограниченной эмиссионной способностью»?
2. Запишите общий вид «закона 3/2».
3. Запишите и запомните формулы для оценки плотности электронного или ионного тока в диоде.

Задания

Цель данной лабораторной работы – на основе компьютерного моделирования изучить процессы, происходящие при формировании пучков заряженных частиц в одномерной геометрии.

1. Провести серию численных экспериментов с помощью программы TRACKS(ES1D) и построить график зависимости плотности тока пучка электронов от напряжения на диоде при длине зазора 1 см. Напряжение изменять в пределах от 1 кВ до 100 кВ и от 1 МВ до 20 МВ.
2. Сравнить полученную зависимость с формулой (2.6) и объяснить различия.
3. Построить график зависимости плотности тока пучка электронов от длины зазора при напряжении на диоде равном 100 кВ. Длину зазора изменять в пределах от 0.1 мм до 5 см.
4. Сравнить полученную зависимость с формулой (2.6).
5. Построить графики распределения потенциала и напряженности электрического поля в зазоре.

F.A.Q. (руководство пользователя по Tracks)

При выполнении лабораторной работы необходимо учитывать то, что значение плотности тока необходимо брать после установления стационарного состояния в диоде. Характерная осциллограмма тока пучка электронов приведена на рис 2.2.

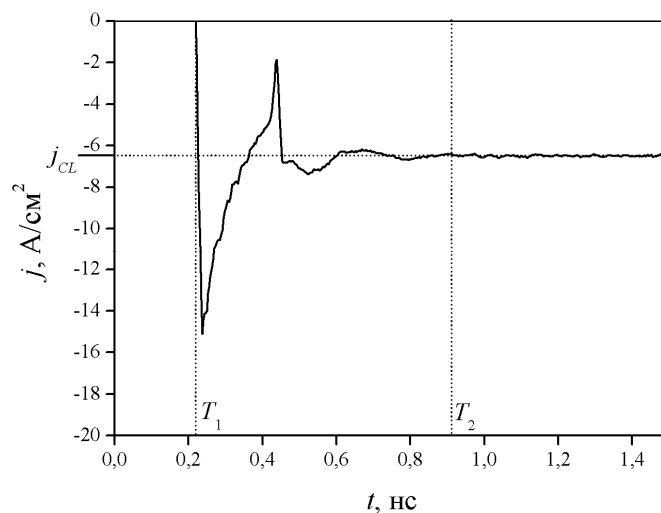


Рис. 2.2. Осциллограмма плотности тока пучка в вакуумном диоде, полученная при расчете методом крупных частиц. Параметры моделирования: длина зазора 1 см, напряжение 20 кВ. j_{CL} – значение плотности тока, полученное из формулы (2.6), T_1 и T_2 – время прихода первого электрона на анод, и время установления стационарного состояния соответственно

Для выполнения лабораторной работы потребуются задать следующие входные параметры:

Вкладка	Параметр	Расшифровка	Е.И.
Diod	Length	длина зазора	см
	Voltage	напряжение	В
	Number of Cell	количество ячеек, на которые разбивается зазор	
	Timestep	шаг по времени	с
	End Time	конечное время расчета <i>! результаты расчета необходимо снимать только после установления стационарного состояния</i>	с
Electrons и Ions	Current	плотность тока инжектируемого пучка <i>! для того чтобы катод работал в режиме неограниченной эмиссионной способности необходимо, чтобы плотность тока инжектируемого пучка была много больше плотности тока Чайльда-Ленгмюра</i>	А/см ²
	Energy	энергия частиц <i>! как было рассмотрено выше, энергия инжектируемых частиц равна нулю</i>	эВ
	QEPT	количество крупных частиц инжектируемых с электродов в каждый момент времени <i>! чем больше крупных частиц, тем точнее результат расчета расчет, но тем больше времени требуется для расчета. Чем меньше частиц, тем менее точен результат расчета, но тем меньше времени требуется для расчета</i>	

3. БИПОЛЯРНЫЙ ВАКУУМНЫЙ ДИОД

В сильноточных диодах нагрев анода падающими на него сфокусированным электронным пучком приводит к быстрому формированию анодной плазмы и, следовательно, к генерации интенсивных ионных потоков, направленных в сторону катода. В таком биполярном вакуумном диоде происходит частичная компенсация объемного заряда электронов зарядом ионов, что приводит к увеличению плотности тока диода, даваемого законом Чайльда–Ленгмюра.

Теория

Рассмотрим вакуумный промежуток, ограниченный двумя плоскими бесконечными параллельно расположенными проводящими электродами, к которому приложено напряжение U . Расстояние между электродами d . Пусть с катода эмитируются электроны, а с анода – ионы с нулевой начальной энергией (рис. 3.1).

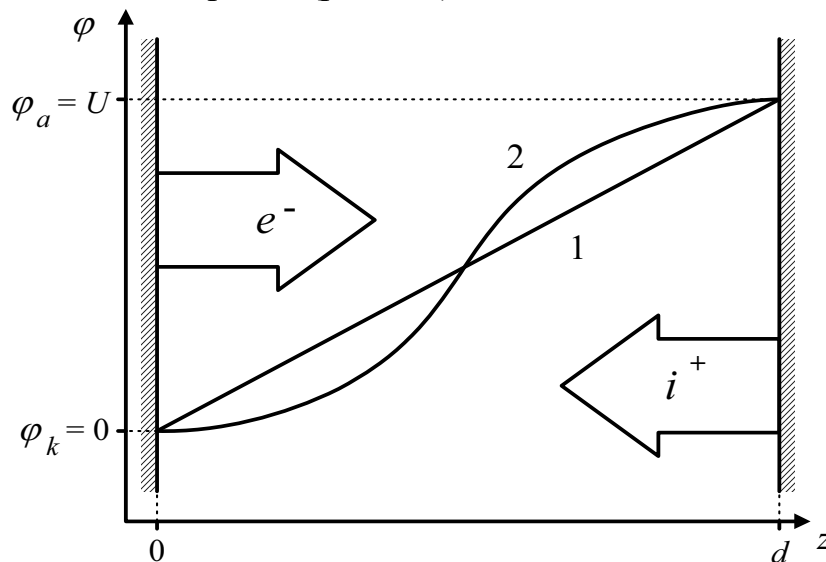


Рис. 3.1. Схема плоского вакуумного биполярного диода: кривые 1 и 2 – распределение потенциала в зазоре без объемного заряда и с объемным зарядом, соответственно

Режим работы диода, когда имеется два встречных потока частиц разных зарядов, называется биполярным. В этом случае и катод, и анод работают в режиме неограниченной эмиссионной способности.

Если электроны и ионы эмитируются с нулевыми скоростями, то закон сохранения энергии для электронов и ионов запишется в виде:

$$\frac{1}{2} m_e v_e^2 = e\varphi, \quad (3.1)$$

$$\frac{1}{2} m_i v_i^2 = e(\varphi_0 - \varphi), \quad (3.2)$$

где m_e и v_e – масса и скорость электронов, а m_i и v_i – масса и скорость ионов, φ – электростатический потенциал.

В этом случае уравнение Пуассона имеет вид:

$$\frac{d^2 \varphi}{dz^2} = 4\pi(\rho_e - \rho_i), \quad (3.3)$$

где ρ_e – плотность заряда электронов, ρ_i – плотность заряда ионов.

Из условия сохранения электронного и ионного зарядов имеем

$$j_e = e\rho_e v_e = \text{const}, \quad (3.4)$$

$$j_i = e\rho_i v_i = \text{const}, \quad (3.5)$$

где j_e – плотность тока электронного пучка, j_i – плотность тока ионного пучка.

Подставляя выражения (3.1), (3.2), (3.4) и (3.5) в уравнение Пуассона (3.3) и вводя коэффициент α , определяемый выражением

$$\alpha = \frac{j_i}{j_e} \left(\frac{m_i}{m_e} \right)^{1/2}, \quad (3.6)$$

находим

$$\frac{d^2 \varphi}{dz^2} = 4\pi j_e \left(\frac{m_e}{2e} \right)^{1/2} \left[\varphi^{-1/2} - \alpha(\varphi_0 - \varphi)^{-1/2} \right]. \quad (3.7)$$

Введем безразмерные переменные ψ и x :

$$\psi = \varphi / \varphi_0, \quad (3.8)$$

$$x = z / d. \quad (3.9)$$

В этих переменных уравнение (3.7) принимает вид:

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} = \frac{4}{9} \left(\frac{j_e}{j_{CL}} \right) \left[\psi^{-1/2} - \alpha(1 - \psi)^{-1/2} \right], \quad (3.10)$$

где j_{CL} – плотность тока Чайлда–Ленгмюра, определяемая по формуле

$$j_{CL} = \frac{1}{9\pi} \left(\frac{2e}{m} \right)^{1/2} \frac{U^{3/2}}{d^2}.$$

Произведем замену $y = d\psi / dx$. Замечая, что $d^2\psi / dx^2 = y dy / dx$, и интегрируя уравнение (3.10), получим:

$$\left(\frac{d\psi}{dx} \right)^2 = \frac{16}{9} \left(\frac{j_e}{j_{CL}} \right) \left[\psi^{1/2} + \alpha(1 - \psi)^{1/2} \right] - C_1. \quad (3.11)$$

Здесь C_1 – константа интегрирования. Если токи электронов и ионов ограничены только объемным зарядом, то напряженность электрического поля, как на катоде, так и на аноде равна нулю. Следовательно,

$$C_1 = \frac{16}{9} \left(\frac{j_e}{j_{CL}} \right), \quad (3.12)$$

$$\alpha = \frac{j_i}{j_e} \left(\frac{m_i}{m_e} \right)^{1/2} = 1. \quad (3.13)$$

Выражение (3.13) выполняется только для однозарядных ионов ($z=1$).

Повторное интегрирование уравнения (3.11) дает

$$\left(\frac{j_e}{j_{CL}} \right)^{1/2} = \frac{3}{4} \int_0^1 d\psi \left[\psi^{1/2} - 1 + (1-\psi)^{1/2} \right]^{-1/2}. \quad (3.14)$$

Вычисляя этот интеграл, получаем плотность тока для электронного и ионного пучка:

$$j_e = 1,86 j_{CL}, \quad (3.15)$$

$$j_i = 1,86 j_{CL} \sqrt{\frac{m_e}{m_i}}. \quad (3.16)$$

Так как заряды электронных и ионных пучков частично компенсируют друг друга, это приводит к увеличению плотности тока электронного и ионного пучка. Плотность тока электронного пучка в биполярном нерелятивистском диоде на 86 % больше плотности тока Чайльда-Ленгмюра.

Из выражения (3.15) и (3.16) следует, что j_e не зависит от параметров ионов, а плотность ионного тока в $\sqrt{\frac{m_e}{m_i}}$ раз меньше электронного.

Вопросы

1. Какой режим работы диода называется биполярным?
2. Какой вид принимает уравнение Пуассона в случае биполярного вакуумного диода?
3. Запишите формулу для нахождения плотности тока электронного пучка биполярного вакуумного диода.
4. Запишите формулу для нахождения плотности тока ионного пучка биполярного вакуумного диода.
5. Почему для ионов с большей массой плотность тока ионов биполярного вакуумного диода уменьшается?

6. Почему плотность тока электронного пучка в биполярном вакуумном диоде больше плотности тока в плоском вакуумном диоде?

Задания

Цель данной работы на основе компьютерного моделирования изучить процессы, происходящие в биполярном вакуумном диоде в одномерной геометрии.

1. Провести серию численных экспериментов с помощью программы TRACKS и построить графики зависимостей плотности тока пучка электронов и ионов от массы иона при длине зазора 1 см и напряжении на диоде 10 кВ. Массу ионов изменять в пределах от массы позитрона до массы протона (1.67×10^{-27} кг).
2. Сравнить полученную зависимость с формулами 2.6, 3.15 и 3.16
3. Построить графики распределения потенциала и напряженности электрического поля в зазоре.

F.A.Q. (руководство пользователя по Tracks)

При выполнении лабораторной работы необходимо учитывать то, что значение плотности тока необходимо брать после установления стационарного состояния в диоде. Характерная осциллограмма токов пучка электронов и ионов приведена на рис 2.2.

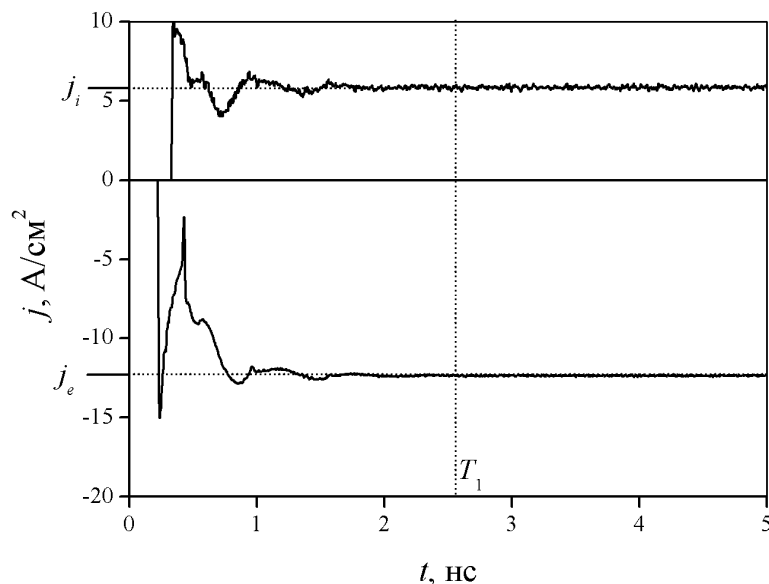


Рис. 3.2. Осциллограмма плотности токов пучка в вакуумном диоде, полученная при расчете методом крупных частиц. Параметры моделирования: длина зазора 1 см, напряжение 20 кВ, масса ионов 0.005 а.е.м. j_e , j_i — значение плотностей тока электронов и ионов, полученное из формул (3.15) и (3.16), T_1 — время установления стационарного состояния

Для выполнения лабораторной работы потребуются следующие входные параметры:

Вкладка	Параметр	Расшифровка	Е.И.
Diod	Length	длина зазора	см
	Voltage	напряжение	В
	Number of Cell	количество ячеек, на которые разбивается зазор	
	Timestep	шаг по времени	с
	End Time	конечное время расчета <i>! результаты расчета берутся только после установления стационарного состояния</i>	с
Electrons и Ions	Current	плотность тока инжектируемого пучка <i>! для того чтобы катод работал в режиме неограниченной эмиссионной способности необходимо, чтобы плотность тока инжектируемого пучка была много больше плотности тока Чайлда-Ленгмюра</i>	А/см ²
	Energy	энергия частиц <i>! как было рассмотрено выше, энергия инжектируемых частиц равна нулю</i>	эВ
	IonsMass	Масса ионов <i>! так как масса ионов больше массы электронов, то для того чтобы ионы пролетели через зазор необходимо большое количество времени. Чтобы сократить время расчета программы, возьмите массу иона порядка массы электрона, такую частицу называют позитроном ($A \sim 0.0005$ а.е.м.).</i>	а.е.м.
	QEPT	количество крупных частиц инжектируемых с электродов в каждый момент времени <i>! чем больше крупных частиц, тем точнее результат расчета расчет, но тем больше времени требуется для расчета. Чем меньше частиц, тем менее точен результат расчета, но тем меньше времени требуется для расчета</i>	

4. ТРАНСПОРТИРОВКА ПУЧКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Помимо формирования одной из основных задач физики пучков заряженных частиц является их транспортировка.

Теория

Рассмотрим пучок электронов, который инжектируется в область, ограниченную двумя бесконечными плоскостями, находящимися под одинаковым потенциалом и расположенными перпендикулярно к оси z на расстоянии d друг от друга. Электроны инжектируются в зазор с левой границы (рис. 4.1) и с некоторой кинетической энергией ε (в эВ), а плотность тока инжектируемого пучка $-j_{in}$.

Пока плотность тока j_{in} инжектируемого пучка электронов меньше некоторого критического значения j_{cr2} все электроны проходят через зазор, создавая в середине зазора провисание потенциала. При $j_{in} > j_{cr2}$ провисание потенциала становится таковым, что электроны, инжектированные с катода, теряют всю свою энергию и останавливаются в точке минимума потенциала (z_0 на рис. 4.1), который соответствует кинетической энергии инжектируемых электронов. Эту точку и называют «виртуальным катодом».

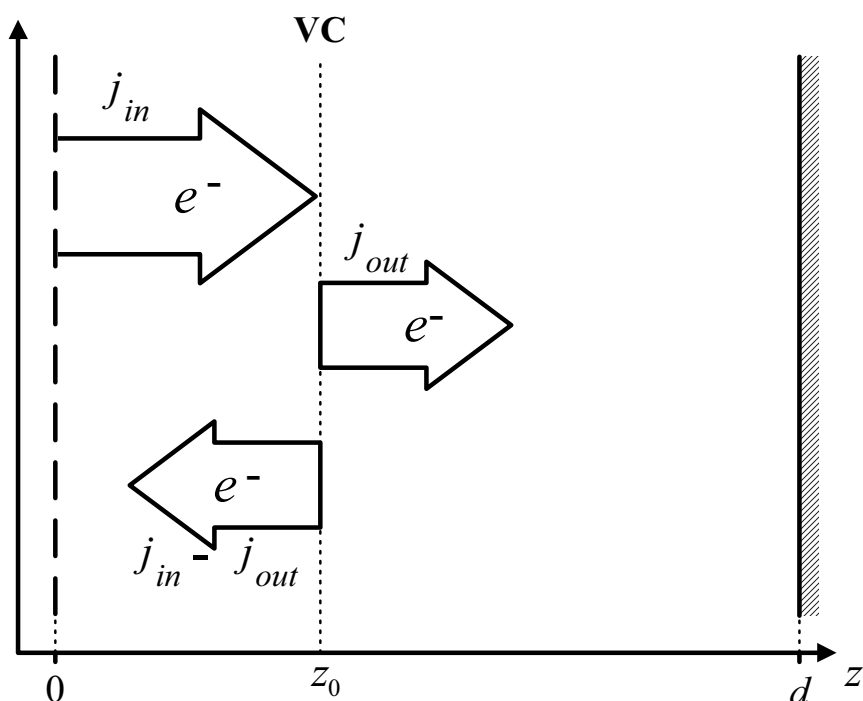


Рис. 4.1. Схема вакуумного диода с виртуальным катодом:

z_0 – положение виртуального катода.

Стрелками обозначено направление движения электронов в зазоре

Поскольку электронный пучок распределен по энергии, то электроны с высокой энергией беспрепятственно пересекут эту точку и начнут ускоряться в сторону от виртуального катода (j_{out} на рис. 4.1). Низкоэнергетические электроны отразятся от виртуального катода в сторону плоскости инъекции ($j_{in} - j_{out}$ на рис. 4.1).

Значения первого и второго критических токов находятся из закона сохранения энергии в одномерной геометрии

$$j_{cr1} = \frac{1}{9\pi} \left(\frac{2e}{m} \right)^{1/2} \frac{\varepsilon^{3/2}}{(d/2)^2} . \quad (4.1)$$

$$j_{cr2} = 2j_{cr1} . \quad (4.2)$$

Плотность тока пучка электронов, прошедших за виртуальный катод, можно определить из следующих соображений. Поскольку справа от виртуального катода находится плоский вакуумный зазор, к которому приложено некоторое напряжение ε , то плотность тока пучка в таком диоде должна удовлетворять «закону 3/2».

$$j_{out} = \frac{1}{9\pi} \left(\frac{2e}{m} \right)^{1/2} \frac{\varepsilon^{3/2}}{(d - z_0)^2} . \quad (4.3)$$

Слева от виртуального катода имеется два встречных потока электронов с плотностями тока j_{in} и $j_{in} - j_{out}$, соответственно. Для них выражение (4.3) запишется в виде:

$$j_{in} + (j_{in} - j_{out}) = \frac{1}{9\pi} \left(\frac{2e}{m} \right)^{1/2} \frac{\varepsilon^{3/2}}{(z_0)^2} . \quad (4.4)$$

Выразив z_0 из (4.4) и подставив в (4.3), получим выражение, связывающее плотность тока пучка электронов, прошедшего через зазор, и плотность тока инжектируемого пучка.

$$\frac{1}{(2j_{in} - j_{out})^{1/2}} + \frac{1}{(j_{out})^{1/2}} = \frac{2}{(j_{cr1})^{1/2}} . \quad (4.5)$$

Положение виртуального катода определяется по формуле

$$z_0 = d \left[1 - \frac{1}{2} (j_{cr1} / j_{out})^{1/2} \right] . \quad (4.6)$$

Из выражений (4.5) и (4.6) видно, что при увеличении плотности тока инжектируемого пучка j_{in} , плотность тока пучка, прошедшего через зазор, стремится к значению $0,25 j_{cr2}$, а сам виртуальный катод «прижимается» к плоскости инъекции, т.е. z_0 стремится к 0.

Всё выше сказанное можно представить графически на зависимости плотности тока пучка электронов, прошедшего через зазор, от плотности тока инъекции (рис. 4.2)

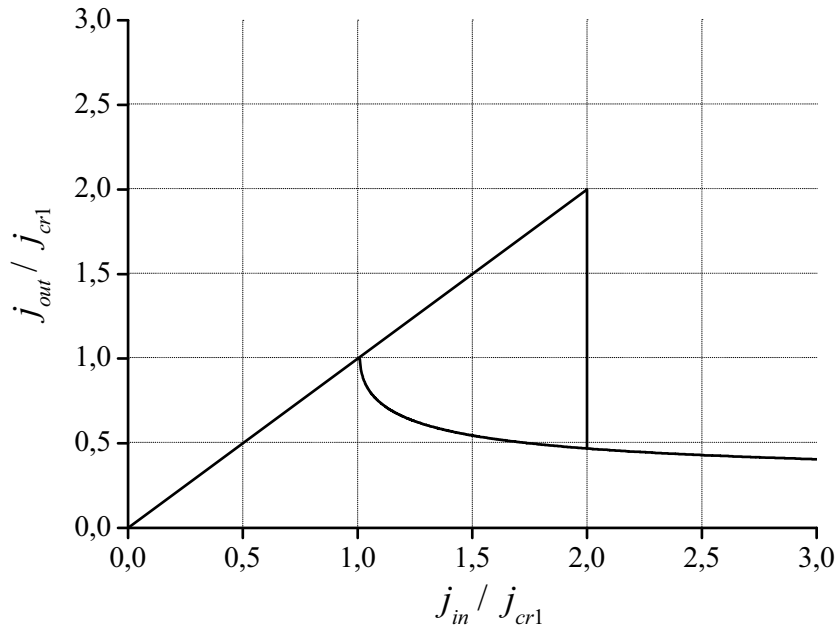


Рис. 4.2. Зависимость тока электронного пучка прошедшего на анод от плотности тока инжектируемого пучка

Моделирование, нестационарный виртуальный катод

Однако эти простые аналитические выражения получены для стационарного случая. При моделировании методом крупных частиц подобных решений добиться довольно сложно.

Поскольку метод крупных частиц является временным методом, т.е. решение заведомо не стационарное и при расчете транспортировки моноэнергетического пучка электронов через плоский эквипотенциальный зазор чаще всего формируется нестационарный виртуальный катод, который существенно изменяет плотность тока пучка, прошедшего через зазор. Колебания виртуального катода вызывают сильные колебания плотности тока пучка, прошедшего через зазор. Частота этих колебаний связана со временем пролёта электронов, отразившихся от виртуального катода, до плоскости инжекции. Полученное в моделировании значение плотности тока пучка, прошедшего через зазор, в несколько раз может отличаться от значения, полученного из выражения (4.5). Колебания виртуального катода в PIC-модели связывают с тем, что в моноэнергетическом пучке электронов невозможно разделить частицы на первые, которые пройдут за виртуальный катод, и вторые, которые отразятся.

На рис. 4.3 приведен характерный фазовый портрет электронного пучка, с нестационарным виртуальным катодом в некоторый момент времени.

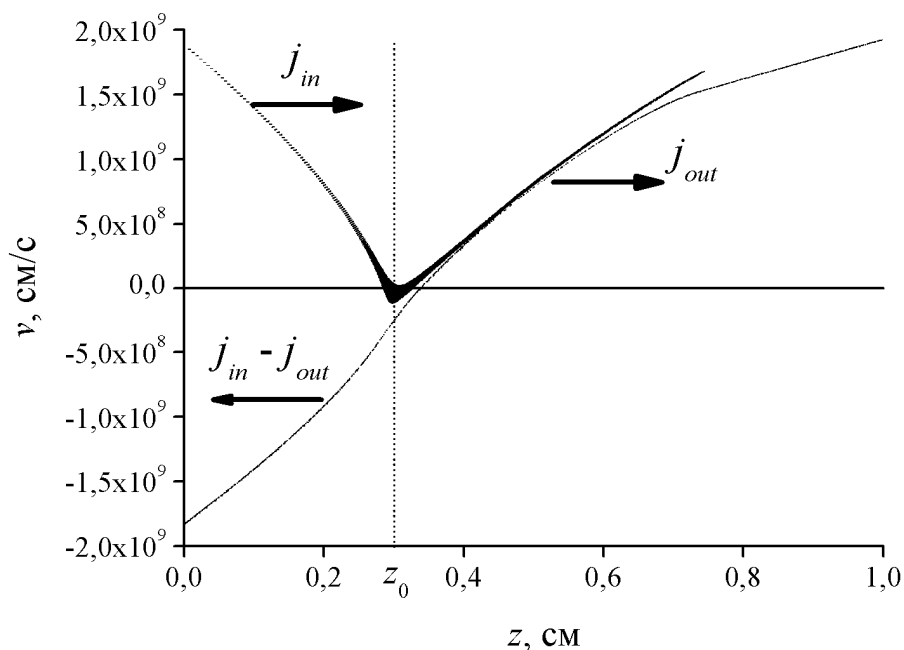


Рис. 4.3. Фазовый портрет пучка электронного электронов в эквипотенциальном зазоре. Стрелками указаны направления движения электронов и значения плотностей токов

Характерная осциллограмма тока в таком режиме приведена на рис. 4.4. Видно, что время ~ 4 нс необходимо для формирования виртуального катода, а среднее значение плотности тока пучка, прошедшего через зазор, полученное в моделировании, не соответствует аналитическому решению. Период колебаний виртуального катода в этом случае составляет $\sim 1,5$ нс.

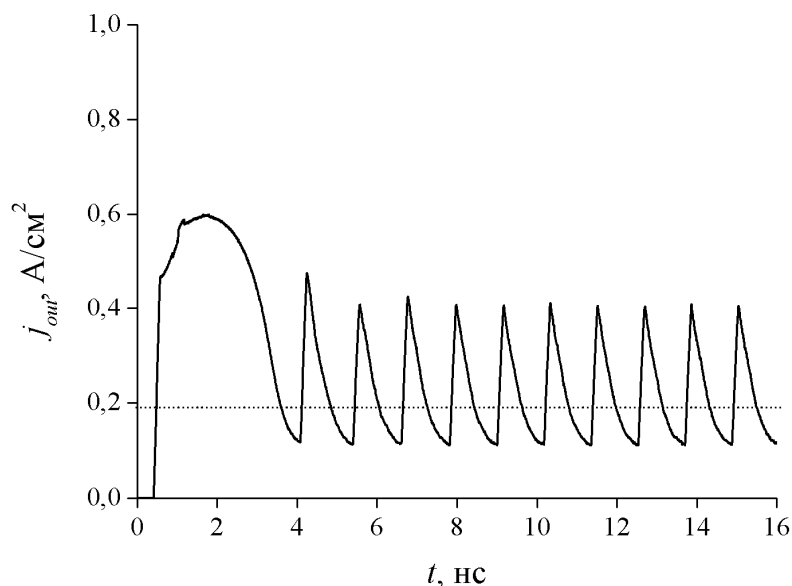


Рис. 4.4. осциллограмма плотности тока j_{out} .
Пунктирная линия – аналитическое значение для j_{out} полученное из (4,5).
Параметры моделирования: длина зазора 1 см, энергия электронов 1 кэВ,
плотность тока инжекции $0,7 \text{ A/cm}^2$

Вопросы

1. Что представляет собой «виртуальный катод»?
2. Запишите выражение, связывающее плотность тока инъекции и плотность тока пучка, прошедшего через зазор.
3. Какие проблемы встречаются при моделировании транспортировки моноэнергетического пучка электронов через эквипотенциальный зазор?
4. Как оценить частоту колебаний виртуального катода?

Задания

Цель данной работы на основе компьютерного моделирования изучить процессы, происходящие при транспортировке моноэнергетического пучка электронов через эквипотенциальный вакуумный зазор.

1. Провести серию численных экспериментов с помощью программы TRACKS и построить графики зависимостей максимального и минимального значений плотности тока пучка, прошедшего через зазор от плотности тока инжектируемого пучка электронов. Для моделирования использовать следующие параметры: длина зазора 1 см, энергия электронов инжектируемого пучка 1 кэВ, плотность тока инжектируемого пучка необходимо варьировать в пределах от $2 j_{cr1}$ до $5 j_{cr1}$
2. Сравнить полученную зависимость с зависимостью на рис 4.2.
3. Построить графики распределения потенциала и напряженности электрического поля в зазоре.

Моделирование, стационарный виртуальный катод

Избавиться от колебаний виртуального катода при моделировании методом крупных частиц задачи о транспортировке пучка заряженных частиц через эквипотенциальный зазор можно двумя способами. Первый способ заключается в том, что необходимо очень медленно, за время много большее времени пролета электроном всего зазора, наращивать плотность тока инжектируемого пучка. Этот способ требует много расчетного времени и не подходит для того, чтобы воспроизвести его в данном курсе лабораторных работ. Второй способ менее затратный в плане временных и машинных ресурсов. Заключается он в том, что электроны инжектируемого пучка должны быть распределены по энер-

гии. В этом случае электроны с большей энергией пройдут за виртуальный катод, электроны с меньшей энергией – отразятся. Существует и третий способ, который сочетает в себе оба первых.

Характерный фазовый портрет электронного пучка со стационарным виртуальным катодом показан на рис. 4.5. Параметры моделирования: длина зазора 1 см, средняя энергия электронов инжектируемого пучка 1 кэВ, ширина распределения по энергии 100 эВ, плотность тока инжектируемого пучка $0,7 \text{ А/см}^2$, время нарастания тока пучка до максимального значения 100 нс. Однако плотность тока пучка электронов прошедшего через зазор, полученная в моделировании существенно отличается от плотности тока, которое дается выражением (4.5). На осциллограмме (рис. 4.6) плотности тока пучка, прошедшего за виртуальный катод, полученной в моделировании методом крупных частиц, видно, что виртуальный катод сформировался спустя $\sim 75 \text{ нс}$ после начала расчета. Плотность тока инжектируемого пучка за это время выросла до $\sim 0,6 \text{ А/см}^2$. Формирование виртуального катода характеризуется на осциллограмме резким спадом плотности тока.

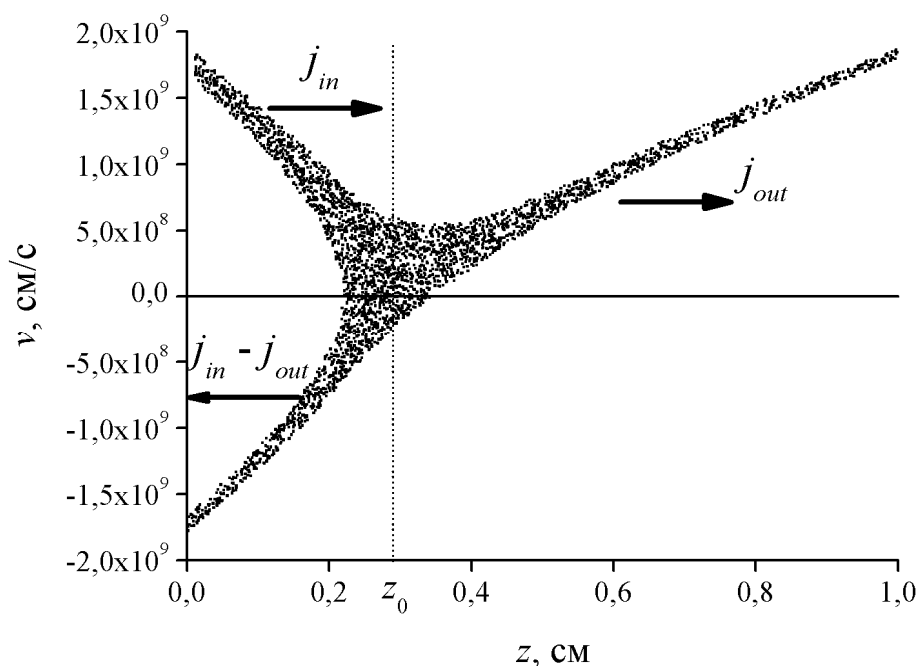
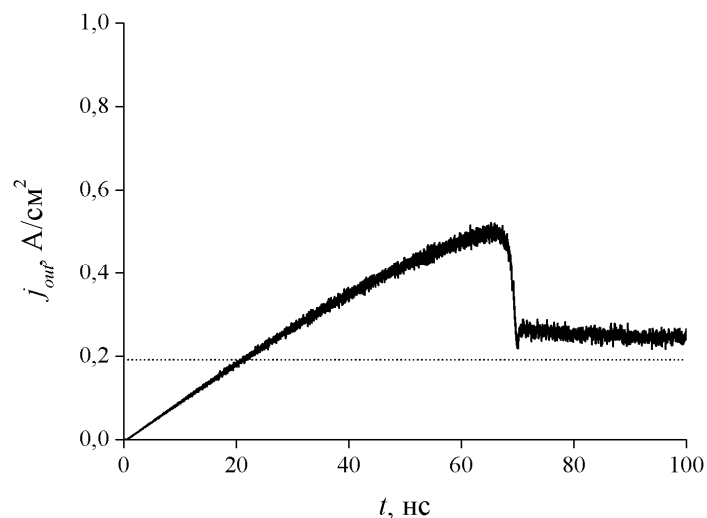


Рис. 4.5. Фазовый портрет пучка электронного электронов в эквипотенциальном зазоре.

Стрелками указаны направления движения электронов и значения плотностей токов. Параметры моделирования указаны в тексте



*Рис. 4.6. Осциллограмма плотности тока j_{out} .
Пунктирная линия – аналитическое значение для j_{out} полученное из (4.5).
Параметры моделирования указаны в тексте*

Задания

Цель данной работы на основе компьютерного моделирования изучить процессы, происходящие при транспортировке моноэнергетического пучка электронов через эквипотенциальный вакуумный зазор.

1. Провести серию численных экспериментов с помощью программы TRACKS и построить график зависимости плотности тока пучка прошедшего через зазор от плотности тока инжектируемого пучка электронов. Для моделирования использовать следующие параметры: длина зазора 1 см, энергия электронов инжектируемого пучка 1 кэВ, ширина энергетического распределения электронов инжектируемого пучка 100 эВ, плотность тока инжектируемого пучка необходимо варьировать в пределах от $2 j_{cr1}$ до $5 j_{cr1}$.
2. Сравнить полученную зависимость с зависимостью на рис 4.2.
3. Провести серию численных расчетов и построить график зависимости плотности тока пучка, прошедшего через зазор, от ширины энергетического распределения электронов инжектируемого пучка. Для моделирования использовать следующие параметры: длина зазора 1 см, энергия электронов инжектируемого пучка 1 кэВ, плотность тока инжектируемого пучка $4 j_{cr1}$, ширину энергетического распределения электронов инжектируемого пучка изменять в пределах от 10 эВ до 100 эВ. При необходимости увеличить время нарастания плотности тока инжектируемого пучка.
4. Построить графики распределения потенциала и напряженности электрического поля в зазоре.

F.A.Q. (руководство пользователя по Tracks)

Для выполнения лабораторной работы потребуются следующие входные параметры:

Вкладка	Параметр	Расшифровка	Е.И.
Diod	Length	длина зазора	см
	Voltage	напряжение <i>! в данном случае $U = 0$</i>	В
	Number of Cell	количество ячеек, на которые разбивается зазор	
	Timestep	шаг по времени	с
	End Time	конечное время расчета <i>! результаты расчета берутся только после установления стационарного состояния</i>	с
Electrons	Current	плотность тока инжектируемого пучка	А/см ²
	Energy Distribution	Ширина энергетического распределения <i>! берется из задания. Использовать равномерное энергетическое распределение ('Uniform')</i>	эВ
	Energy	Средняя энергия частиц <i>! берется из задания</i>	эВ
	QEPT	количество крупных частиц инжектируемых с электродов в каждый момент времени	

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Моделирование

1. Бэдсел Ч., Ленгдон А. Физика плазмы и численное моделирование. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 452 с.
2. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц: пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 640 с.
3. Tarakanov V.P. Users's manual for code KARAT (ver. 7.03, May 97), Berkley Research Associates, Inc.

Физика пучков заряженных частиц

4. Миллер Р. Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц: пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 432 с.
5. Беломытцев С.Я., Пегель И.В. Физика сильноточных пучков заряженных частиц: курс лекций. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008.

Учебное издание

РЫЖОВ Виктор Васильевич
ШКЛЯЕВ Валерий Александрович

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Методические указания к выполнению лабораторных работ
по курсу «Физика пучков заряженных частиц» для магистрантов,
обучающихся по магистерской программе 210102
«Микроволновая электроника» направления 210100
«Электроника и микроэлектроника»

Верстка

В.П. Аршинова

Дизайн обложки

О.Ю. Аршинова

О.А. Дмитриев

Подписано к печати 20.11.2008. Формат 60х84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл. печ. л. 1,69. Уч.-изд. л. 1,52.

Заказ 866. Тираж 100 экз.



Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО



ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.