

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

531/82

1/2-82

9-81-703

С.А.Коренев

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ДИОДА
ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

1981

Исследование диода с плазменным катодом во внешнем продольном магнитном поле было вызвано необходимостью иметь физическое представление о влиянии магнитного поля на характеристики самого диода и электронного пучка при его инжекции в плазменный электропровод через магнитную линзу, в поле которой попадает и промежуток между анодом и катодом. Кроме того, этот вопрос представляет интерес в связи с прикладным применением диодов для генерации СВЧ колебаний, ускорения ионов и т.п.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Диод помещен в постоянное продольное магнитное поле, создаваемое короткой магнитной линзой. Трансмиссионный анод выполнен из бериллиевой фольги толщиной 150 мкм. Катодная плазма формируется на основе незавершенного разряда по поверхности диэлектрика. Катод состоит из металлического стержня /2/, диэлектрической вставки /3/ толщиной 3 мм из винипласта и металлической сетки /4/ с ячейкой размером 1,5x1,5 мм² и диаметром проволок 0,1 мм. Материал металлической сетки - нержавеющая сталь. Диод запитывается от промышленного генератора импульсного напряжения типа генератора Аркадьева-Маркса ГИН-500^{1/}. Напряжение на диоде измеряется высоковольтным делителем напряжения /ВД/, а электронный ток - цилиндром Фарадея /5/, установленным за анодом. Распределение плотности тока определяется при помощи секционированного цилиндра Фарадея. Сигналы с датчиков поступают на широкополосный шестилучевой наносекундный регистратор БЛОР-04.

Давление остаточного газа в диоде $P \approx 10^{-5}$ Торр. Откачка проводится паромасляным агрегатом ВА-0,5 с вымораживанием паров масла. Величина напряженности продольного магнитного поля, формируемого линзой, $H_z = 500 \div 2000$ Э. Магнитная линза запитывается от источника постоянного тока.

В результате обработки синхронных осциллограмм импульсов напряжения и электронного тока построена вольтамперная характеристика /ВАХ/ диода /рис. 2/ при фиксированных значениях напряженности магнитного поля на оси и в середине линзы. Анализ экспериментальных графиков показывает, что при небольших γ / γ - релятивистский фактор, $\gamma = 1 + U/510$, где U - напряжение на диоде /кВ// магнитное поле позволяет увеличить величину электронного тока благодаря его фокусирующему действию. При увеличении γ рост электронного тока незначителен, в то время как без магнитного поля ток при увеличении γ растет по экспоненте.

В работе^{2/} получена формула для определения плотности электронного тока диода, помещенного во внешнее продольное магнитное поле:

$$j_e = \frac{mc^3 \cdot 0,3(\gamma - 1)^{3/2} H_z}{e \cdot 2\pi d^2 (H_z^2 + H_\phi^2)^{1/2}},$$

/1/

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БИБЛИОТЕКА

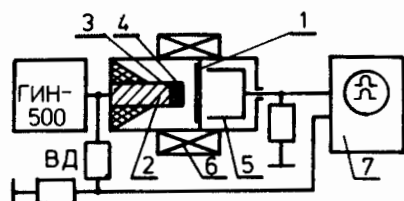


Рис.1. Схема экспериментальной установки: 1 - анод; 2 - металлический стержень; 3 - диэлектрическая вставка; 4 - металлическая сетка; 5 - цилиндр Фарадея; 6 - магнитная линза; 7 - осциллограф; ВД - высокоомный делитель напряжения.

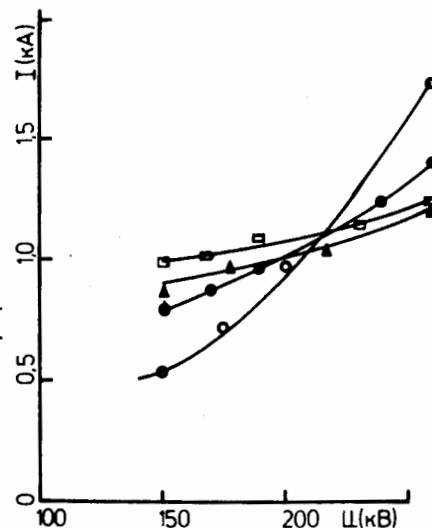


Рис.2. Вольтамперная характеристика диода при зазоре между анодом и катодом 1 см и площади катода 7 см²: о - H_z=0 Э; ● - H_z=500 Э; ▲ - H_z=1000 Э; □ - H_z=2000 Э.

где d - зазор между анодом и катодом; e, m - заряд, масса электрона; H_z - внешнее магнитное поле; H_φ - собственное азимутальное магнитное поле электронного пучка.

При сравнении экспериментальных значений j_e с расчетными видно их различие. Это связано с тем, что формула /1/ выводилась для диода, у которого катод имеет неограниченную эмиссионную способность. В исследуемом случае эмиссионная способность катода ограничена плотностью электронов в плазме и их температурой.

Эмиссионная формула плазменного диода при отсутствии внешнего магнитного поля приведена в /3/:

$$j_e = en_{ep} \int_{\sqrt{2W/m}}^{\infty} v_z f(v_z) dv_z, \quad /2/$$

где n_{ep} - плотность электронов плазмы; W, m - потенциальная энергия и масса электрона; v_z - составляющая скорости электронов в продольном направлении; f(v_z) - функция распределения электронов по скоростям. Составляющую скорости v_z определим из выражения /1/:

$$v_z = c(1 - \frac{1}{\gamma^2})^{1/2} \cdot \frac{H_z}{(H_z^2 + H_\phi^2)^{1/2}}, \quad /3/$$

где c - скорость света.

Для плазменного диода, как следует из работы /3/, катодная плазма в термодинамическом отношении ведет себя как идеальный газ и электроны подчиняются статистике Максвелла-Больцмана.

Подставляя в /2/ v_z, функцию распределения Максвелла-Больцмана f(v_z) и производя интегрирование, при $\sqrt{2W/m} \rightarrow 0$ получаем эмиссионную формулу плазменного диода, помещенного во внешнее продольное поле:

$$j_e = en_{ep} \cdot \frac{H_z \cdot c(1 - \frac{1}{\gamma^2})^{1/2}}{(H_z^2 + H_\phi^2)^{1/2}} \cdot \left[\frac{kT_{ep}}{2\pi m} \right]^{1/2}, \quad /4/$$

где n_{ep}, T_{ep} - концентрация и температура плазменных электронов.

При измеренных значениях /1/ концентрации электронной компоненты n_{ep} ~ 10¹² см⁻³, температуре T_{ep} ~ 1400 К и величине магнитного поля H_z = 500 ÷ 2000 Э получаем сравнимые с экспериментальными значения плотности тока ~ 100 ÷ 300 А/см².

Микроструктура электронного пучка определяется обработкой осциллограмм с секционированного цилиндра Фарадея из 9 коллекторов диаметром 5 мм, перед которым устанавливается поглотитель электронов с коллимирующими отверстиями. Коллимирующие отверстия располагаются на одной оси с коллекторами. Диаметры коллимирующих отверстий составляют 0,5; 1; 2 и 3 мм. Измерения проведены на расстоянии 1 см от анода. В результате анализа полученных экспериментальных данных установлено, что осциллограммы токов с коллекторов имеют форму, подобную форме импульса тока электронов с цилиндра Фарадея. Флуктуации амплитуды тока от импульса к импульсу составляют 20%. При уменьшении диаметра коллимирующих отверстий до ~1 мм флуктуации амплитуды тока возрастают до 35% при H_z ≥ 800 Э. При снятии магнитного поля они уменьшаются до 20%. Это означает, что катодная плазма однородна по своей плотности на масштабном уровне ~1 мм, что почти соответствует размеру ячейки металлической сетки плазменного катода. При его изменении масштабный уровень также изменяется и, как показывают эксперименты, соответствует размеру ячейки сетки. Из этого можно сделать вывод, что наличие металлической сетки влияет на однородность электронного пучка и чем меньше размер ячейки этой сетки, тем меньше масштабный размер неоднородности плотности тока.

Энергетический спектр электронного пучка измеряется спектрометром с частичным поглощением электронов в алюминиевой фольге толщиной 50 мкм. Попадающий и прошедший через фольгу токи измеряются интегрирующими поясами Роговского. На рис.3 приведены гистограммы энергетического спектра электронного пучка, фор-

мируемого в диоде при $H_z = 0$ и $H_z = 1000$ Э. Видно, что при $H_z = 1000$ Э характер энергетического спектра отличен от спектра при $H_z = 0$ в области низкоэнергетичных электронов. Если сравнить функцию $E(t)$ энергетического спектра с формой импульса ускоряющего напряжения, то видно, что низкоэнергетичные электроны появляются на заднем фронте /рис.4/. При $H_z = 0$ функция $E(t)$ энергетического спектра полностью повторяет форму импульса ускоряющего напряжения.

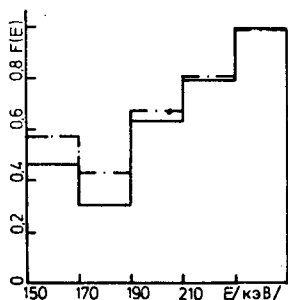


Рис.3. Энергетический спектр электронного пучка: — — $H_z = 0$ Э; - - - $H_z = 1000$ Э.

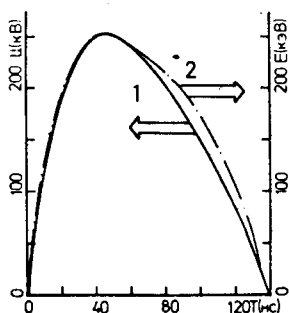


Рис.4. Форма импульса ускоряющего напряжения на диоде /кривая 1/ и функция $E(t)$ энергетического спектра электронного пучка /кривая 2/.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- магнитное продольное поле влияет на характер вольтамперной характеристики диода: при увеличении напряженности поля и ускоряющего напряжения на диоде рост тока уменьшается;
- получено выражение для определения плотности электронного тока, формируемого диодом при наличии внешнего продольного магнитного поля;
- с увеличением магнитного поля $H_z \geq 800$ Э при питающих напряжениях на диоде 150-250 кВ флуктуации плотности тока составляют 35% на масштабном уровне, примерно соответствующем размеру ячейки металлической сетки плазменного катода.

В заключение автор выражает благодарность Н.Б.Рубину и К.В.Ходатаеву за полезные обсуждения и интерес к данной работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корнев С.А. ОИЯИ, 9-81-573, Дубна, 1981.
2. Брейзман Б.Н. и др. Изв. ВУЗов, физика, 1979, №10, с.7.
3. Крейнделъ Ю.Е. Плазменные источники электронов. Атомиздат, М., 1977.

Рукопись поступила в издательский отдел
10 ноября 1981 года.