

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВОГО РАЗРЯДА ПРИ РАБОТЕ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКИ

В.А. Тутык

Национальная металлургическая академия Украины, Днепрпетровск, Украина

E-mail: tutykva@ua.fm

Приведены результаты экспериментальных исследований низковакуумной газоразрядной электронной пушки (НГЭП) с полым анодом на основе высоковольтного тлеющего разряда в режиме плазменно-пучкового разряда (ППР) в диапазоне давлений гелия 10...130 Па. Найдены границы существования ППР и их зависимости от параметров электронного пучка (ЭП). Показано, что повышение давления приводит к необходимости увеличения плотности электронов $n_b \sim 6 \cdot 10^7 \dots 8 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ и мощности ЭП при зажигании ППР. Обнаружено влияние ППР на параметры НГЭП, приводящее к лавинообразному росту тока ЭП и горению ППР во всем внутреннем объеме вакуумной камеры. Генерация большого объема плазмы при работе НГЭП в режиме ППР делает его перспективным для реализации различных CVD- и PCVD-технологий в среде реакционного газа.

ВВЕДЕНИЕ

Перспективность использования пучково-плазменного разряда (ППР) в области создания новых электронно-лучевых и плазменно-химических технологий определяется высокой эффективностью преобразования кинетической энергии электронов пучка в энергию ВЧ-полей и частиц плазмы [1-3]. Явление пучковой неустойчивости, состоящее в эффективном возбуждении колебаний и волн в плазме электронным пучком, возникшее после основополагающих работ Ахиезера и Файнберга, Бома и Гросса, нашло применение при решении задач научного и прикладного назначения при исследованиях проблем управляемого термоядерного синтеза, новых методов ускорения плазмы, плазменной электроники, активных экспериментов в космосе и ряда других [4-6].

Большой практический интерес представляет использование ППР в области создания плазменно-химических реакторов получения химически чистых веществ, реализации на их основе CVD- и PCVD-технологий получения покрытий и выращивания кристаллов в среде реакционного газа [4]. Для реализации этих технологий с использованием ППР целесообразно работать в области промежуточного и низкого вакуума. Возможность зажигания ППР при давлениях нейтрального газа, достигающих значений порядка 6650 Па теоретически доказана в работе [4]. В известных экспериментальных работах по исследованию ППР без магнитного поля диапазон давлений нейтрального газа лежал в области $\sim 0,05 \dots 10$ Па [7-9]. В связи с этим практический, научный и технический интерес представляют исследования ППР в области низких давлений. Для работы в этом диапазоне созданы низковакуумные газоразрядные электронные пушки (НГЭП) с полым анодом на основе высоковольтного тлеющего разряда (ВТР), используемые для реализации различных электронно-лучевых технологий [10-12].

Целью настоящей работы является исследование особенностей ППР, образованного электронным пучком, инжестируемым низковакуумной

газоразрядной электронной пушкой в области низких давлений $P \approx 10 \dots 133$ Па нейтрального газа.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования ППР, созданного НГЭП, проводились на установке, схема которой приведена на Рис.1.

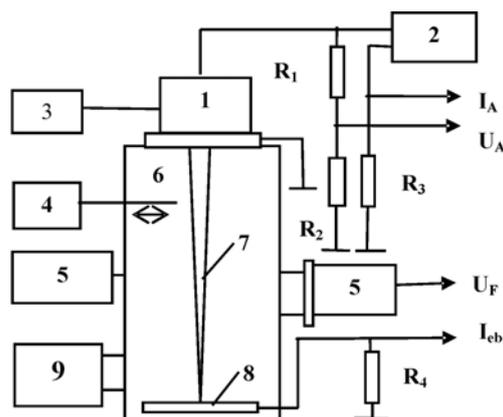


Рис.1. Схема экспериментальной установки

НГЭП 1 запитывалась от высоковольтного источника питания 2. В качестве последнего использовался постоянный высоковольтный источник питания мощностью 5 кВт, с ускоряющим напряжением 0...20 кВ и высоковольтный импульсный генератор, формирующий импульсы напряжения с амплитудой 1...40 кВ, длительностью ~ 10 мкс и частотой следования 50...100 Гц. Высокое напряжение отрицательной полярности подавался на холодный алюминиевый катод НГЭП, а анод (из нержавеющей стали) заземлялся на корпус вакуумной камеры 6. Измерение анодного тока I_A проводилось с помощью резистора R_3 . Ток электронного пучка I_{eb} , попадающий на коллектор 8, снимался с резистора R_4 . Высокое напряжение на катоде измерялось с помощью делителя напряжения R_1R_2 . НГЭП размещалась на диэлектрическом фланце. Внутри вакуумной камеры 6 поддерживался динамический вакуум. Разрежение создавалось

форвакуумным насосом 9, а из системы поддува 3 в область формирования ВТР-пушки непрерывно поддувался рабочий газ – гелий. Исследования проводились в диапазоне давлений гелия ~10...133 Па. Измерение распределения тока ЭП по сечению осуществлялось с использованием «дырочной камеры» (экранированного цилиндра Фарадея). Параметры плазмы измерялись двойным электрическим зондом, который мог перемещаться в поперечном сечении вакуумной камеры. При работе в импульсном режиме параметры ЭП: ток, ускоряющее напряжение, форма импульса и т.п. измерялись осциллографическим методом. Световое излучение из области взаимодействия ЭП с нейтральным газом и плазмой фиксировалось с применением фотоэлектронного умножителя типа ФЭУ-19.

В экспериментальных исследованиях использовалась низковакуумная газоразрядная пушка с полым анодом и холодным катодом типа ЭПП-9 (Рис.2) [12], которая включала следующие основные элементы: катодный водоохлаждаемый узел – 1, высоковольтный керамический изолятор – 2, полый анодный блок – 3, элементы системы поддува газа – 4, сменный анод – 5.

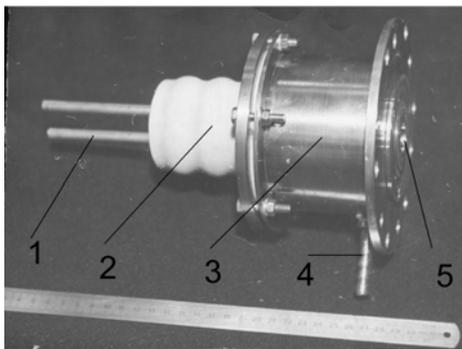


Рис.2. Общий вид НГЭП типа ЭПП-9

Принцип работы НГЭП заключается в следующем. После подачи высокого ускоряющего напряжения U_A на электроды НГЭП зажигается ВТР вдоль осевой линии анодного отверстия (Рис.3).

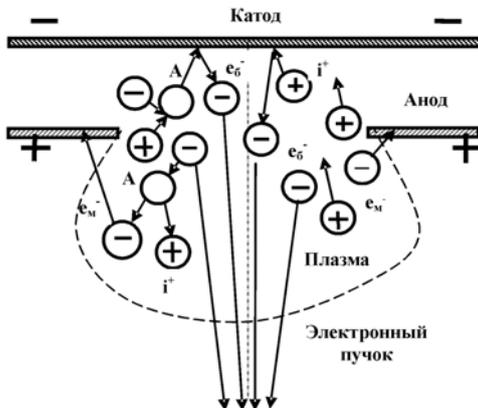


Рис.3. Схема работы НГЭП

Образовавшиеся ионы i^+ начинают бомбардировать холодный катод и в результате γ -процессов образуются быстрые электроны пучка e_{β}^- . Последние при своем движении образуют в результате столкновений с нейтральными частицами

$A = i^+ + e_m^-$ новые ионы i^+ и медленные электроны e_m^- . Одна часть возникших ионов захватывается электрическим полем и движется к катоду. На своем пути некоторые из них испытывают перезарядку, в результате которой образуются быстрые нейтральные частицы A движущиеся к катоду. Вследствие бомбардировки катода ионами i^+ и быстрыми частицами A возникают новые быстрые электроны e_{β}^- , и процесс повторяется.

На выходе из плазмы ВТР образуется ЭП. Другая часть ионов притягивается к ЭП и осуществляет его ионную фокусировку. Медленные электроны e_m^- притягиваются к аноду и компенсируют заряд ушедших из НГЭП быстрых электронов e_{β}^- пучка, позволяя работать пушке без коллектора электронов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные исследования показали, что для НГЭП характерны следующие два режима работы: 1) режим ионной фокусировки (Рис.4,а,б); 2) режим плазменно-пучкового разряда (Рис.4,в,г).

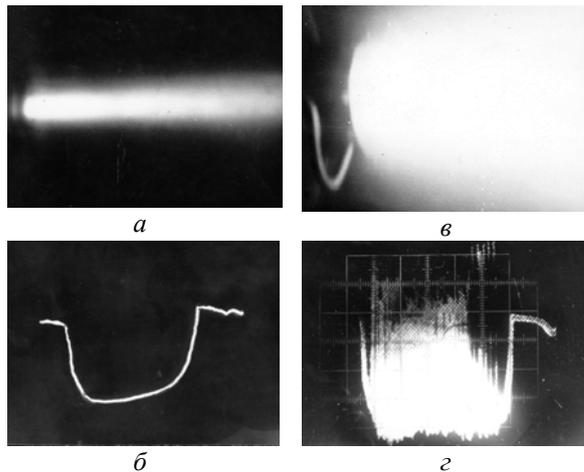


Рис.4. Режимы работы НГЭП

При малых токах наблюдается режим ионной фокусировки (см. Рис.4,а), для которого характерно наличие сфокусированного ЭП ионами, созданными в результате ударной ионизации. Свечение продольного кроссовера ЭП в гелии голубое, что может быть связано с высокой энергией электронов пучка ($U_A \sim 1...10$ кВ), позволяющей возбуждать самые высокие уровни атомов и ионов гелия. Форма импульса тока (см. Рис.4,б), указывает на отсутствие колебаний в системе. Увеличение тока ЭП выше предельного (при $P = const$) приводит к зажиганию ППР (см. Рис.4,в). При этом плазма с розовым свечением заполняет все внутреннее пространство вакуумной камеры. Смещение цвета свечения в сторону более длинных волн указывает на значительное снижение энергии электронов, участвующих в возбуждении и ионизации атомов нейтрального газа. Зажигание ППР в импульсном

режиме (см. Рис.4,г) приводит к образованию на вершине импульса тока ВЧ-колебаний.

Как показали исследования, для ППР, наблюдаемого при работе НГЭП, характерно зажигание разряда во всей внутренней полости вакуумной камеры, в то время как при зажигании ППР без магнитного поля с использованием термоэлектронных пушек [7, 9] в подобном режиме характерно на некотором расстоянии от коллектора плазменное образование, локализованное вокруг электронного пучка. Это существенное отличие связано со следующей причиной. Электронный пучок, инжектируемый НГЭП, взаимодействует как с плазмой, созданной им в результате ударной ионизации, так и с плазмой ВТР, формирующей этот пучок. Исходя из анализа результатов исследований механизм образования ППР при работе НГЭП возможно представить следующим образом. При определенных параметрах ЭП и давлении нейтрального газа концентрация плазмы n_e ВТР и концентрация электронов в пучке n_b достигают значений, необходимых для развития плазменно-пучковой неустойчивости и зажиганию ППР. Однако зажигание ППР приводит к возрастанию плотности плазмы в ВТР за счет дополнительной ионизации атомов нейтрального газа ВЧ электрическими полями плазменных колебаний. При этом возрастает поток ионов, бомбардирующих катод. Происходит лавинообразное возрастание тока ЭП. Процессы интенсифицируются, и ППР заполняет всю внутреннюю полость вакуумной камеры, куда инжектируется ЭП. Это наиболее вероятно связано с возникновением положительной обратной связи между ЭП и ППР, которая интенсифицирует процессы трансформации энергии ЭП в энергию ППР. Таким образом, НГЭП благодаря наличию обратной связи создает в режиме ППР плазменное образование, значительно превышающее по своим размерам подобное образование, созданное термоэлектронными пушками, так как заполняет весь технологический объем вакуумной камеры.

Экспериментально исследованы границы области зажигания ППР при различных давлениях P в зависимости от тока $I_A = f(P)$ (Рис.5) и мощности $N = \theta(P)$ (Рис.6) ЭП при различных диаметрах анодного отверстия d_A . При этом на графиках кривые 1 измерены при $d_{A1} = 10$ мм, а кривые 2 – $d_{A2} = 8$ мм. Повышение давления рабочего газа приводит к возрастанию тока и мощности ЭП, необходимых для зажигания ППР. Эту закономерность возможно объяснить следующим образом.

Как известно [4], необходимыми условиями для развития пучковой неустойчивости являются: 1) размер плазмы d не должен превышать длины свободного пробега электронов λ_b пучка в газе:

$$d \leq \lambda_b; \quad (1)$$

2) энергия электронного пучка должна эффективно передаваться электронам плазмы, когда

$$\delta = \omega_{pe} \left(\frac{n_b}{n_e} \right)^{1/3} > 5 \cdot \nu_{en}, \quad (2)$$

где ν_{en} – частота столкновений электронов плазмы с нейтралами; $\omega_{pe} = 5 \cdot 10^4 n_e^{1/2}$ – ленгмюровская электронная частота плазмы. Это связано с тем, что ППР в определенном смысле является аналогом классического ВЧ-разряда в котором ВЧ-волны ($\omega \gg \nu_{en}$) возбуждаются электронным пучком [6].

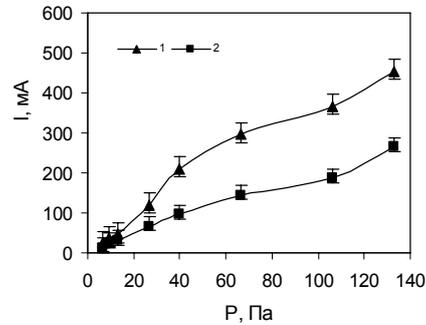


Рис.5. Зависимость граничного тока ЭП зажигания ППР от давления гелия

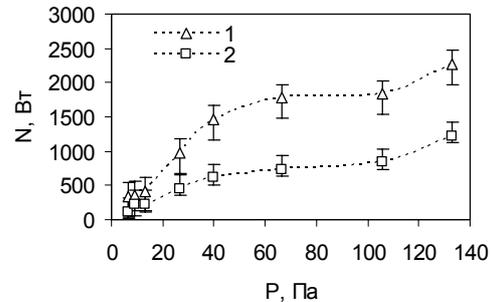


Рис.6. Зависимость граничной мощности ЭП, необходимой для зажигания ППР, от давления гелия

Возрастание давления приводит к росту концентрации нейтральных частиц $n_n = P/kT$ (k – постоянная Больцмана; T – температура газа). Это вызывает возрастание частоты столкновений электронов плазмы с нейтралами $\nu_{en} = 3,4 \cdot 10^7 \cdot a^2 \sqrt{T} \cdot n_n \text{ c}^{-1}$ [8], где n_n – концентрация атомов нейтрального газа, см^{-3} ; $a = 0,95 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ – эффективный радиус атома гелия; T – температура электронов плазмы или энергия электронов, эВ, и условие (2) зажигания ППР нарушается, так как возрастает ν_{en} . Для его восстановления необходимо увеличить ток и мощность ЭП.

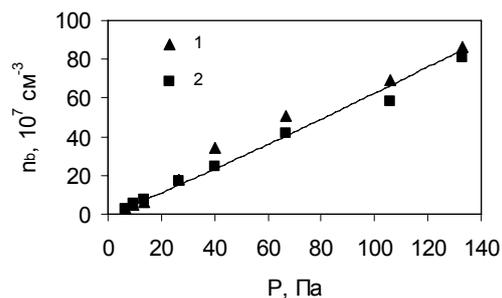


Рис.7. Зависимости критической концентрации ЭП при зажигании ППР от давления гелия

Основное влияние на зажигание ППР оказывает не величина тока и мощности ЭП, а значение плотности электронов n_b . На Рис.7 приведены зависимости критической концентрации ЭП при зажигании ППР от давления гелия для различных диаметров $d_{A1}=10$ мм и $d_{A2}=8$ мм. Уменьшение диаметра пучка при постоянном токе за счет снижения диаметра анодного отверстия увеличивает концентрацию электронов в пучке и, как видно из Рис.5-7, снижает ток и мощность ЭП, необходимые для зажигания ППР.

Оценим соответствие экспериментально полученных условий зажигания ППР теоретическим. Согласно проведенным оптическим измерениям путем фотографирования области горения ВТР вблизи анодного отверстия показано выполнение условия (1) во всем диапазоне рабочих давлений НГЭП. Так, например, для ЭП с $U_A=5000$ В при $P_1=13$ Па измеренные величины $d_1 \sim 8$ см, $\lambda_{b1} \geq 73$ см; при $P_2=100$ Па – $d_2 \sim 3$ см, $\lambda_{b1} \approx 36$ см и соответственно в обоих случаях $d < \lambda_b$. Далее оценим выполнение условия зажигания ППР по формуле (2). Для $P_1=13$ Па, $I_{b1}=0,1$ А, $U_{A1}=5000$ В значение $v_{en1} \sim 10^7$ с⁻¹; измеренная двойным зондом концентрация электронов плазмы $n_{e1} \approx 10^{10}$ см⁻³, тогда электронная ленгмюровская частота плазмы $\omega_{e1} \approx 5,64 \cdot 10^4 \sqrt{n_{e1}} \approx 6 \cdot 10^9$ с⁻¹. Величина $n_{b1} \approx 2 \cdot 10^8$ см⁻³ (для анодного отверстия $d_A=10$ мм). Значение инкремента пучковой неустойчивости $\delta_1 \approx \omega_{e1} (n_{b1}/n_{e1})^{1/3} \sim 2 \cdot 10^9$ с⁻¹. Условие (2), как видим, выполняется, что указывает на возможность зажигания при этих параметрах ППР. Рассмотрим случай более высоких давлений, когда $P_2=133$ Па, $I_{b2}=0,5$ А, $U_{A2}=5000$ В, тогда значение $v_{en2} \sim 10^8$ с⁻¹; концентрация электронов пучка $n_{b2} \approx 7 \cdot 10^8$ см⁻³; концентрация электронов плазмы составляла $n_{e2} \approx 3 \cdot 10^{11}$ см⁻³; электронная ленгмюровская частота плазмы $\omega_{e2} \approx 3 \cdot 10^{10}$ с⁻¹. Учитывая приведенные параметры, величина $\delta_2 \approx \omega_{e2} (n_{b2}/n_{e2})^{1/3} \sim 10^{11}$ с⁻¹. Условие (2) для этого случая также выполняется и ППР загорается, что соответствует экспериментальным измерениям.

Результаты работы показали возможность получения ППР с использованием НГЭП в диапазоне давлений $P \approx 10 \dots 133$ Па с плазменным образованием с концентрацией электронов $n_e \approx 10^{10} \dots 10^{11}$ см⁻³, занимающим весь технологический объем вакуумной камеры. Наличие ЭП, ВЧ-полей, плазмы большого объема, низкий вакуум открывают возможности реализации на этой

основе новых CVD- и PCVD-технологий в среде реакционного газа получения покрытий, выращивания кристаллов и различных технологий плазмохимии.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально доказано наличие в диапазоне давлений $P \approx 10 \dots 133$ Па двух режимов работы НГЭП: ионной фокусировки и плазменно-пучкового разряда. Переход из одного режима в другой определялся параметрами электронного пучка и давлением газа.

2. Определены области зажигания ППР с ростом давления гелия ($P \approx 10 \dots 133$ Па) в зависимости от тока, мощности и концентрации электронов в ЭП. Показано, что рост давления приводит к необходимости увеличения тока и мощности ЭП для зажигания ППР. Однако определяющим фактором является повышение концентрации электронов в ЭП, которая изменялась в диапазоне $n_b \approx 10^7 \dots 8 \cdot 10^8$ см⁻³.

3. Обнаружено влияние ППР на работу НГЭП, приводящее к лавинообразному возрастанию тока ЭП и зажиганию ППР во всем объеме вакуумной камеры, куда инжектируется ЭП. Измеренная концентрация электронов плазмы ППР с ростом давления лежала в диапазоне $n_e \approx 10^{10} \dots 10^{11}$ см⁻³.

4. Генерация плазмы большого объема при работе НГЭП в режиме ППР делает его перспективным для реализации различных CVD- и PCVD-технологий в среде реакционного газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. М.А. Завьялов, Ю.Е. Крейндел, А.А. Новиков, Л.П. Шантурин. *Плазменные процессы в технологических электронных пушках*. М.: «Энергоатомиздат», 1989.
2. *Пучково-плазменные процессы в электронно-лучевой аппаратуре промышленного применения* // Сб. науч. тр. ВЭИ / Под ред. В. И. Переводчикова. М.: ВЭИ, 1994.
3. А.И. Ахизер, И.А. Ахизер, Р.В. Половин, А.Г. Ситенко, К.Н. Степанов. *Электродинамика плазмы*, М.: «Наука», 1974, 719 с.
4. А.А.Иванов, В.Г. Лейман. О зажигании плазменно-пучкового разряда мощным электронным пучком в газе большой плотности // *Физика плазмы*. 1977, т.3, в.4, с.780-785.
5. *Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза* // Республ. межведомст. сб. / Под ред. В.Т. Толока. Киев: «Наукова думка», 1971, 294 с.
6. В.Е. Мишин, Ю.А. Ружин, В.А. Телегин. *Взаимодействие электронных потоков с ионосферной плазмой*. Л.: «Гидрометеиздат», 1989, 265 с.
7. В.П. Попович, И.Ф. Харченко, Е.Г. Шустин. Пучково-плазменный разряд без магнитного поля // *Радиотехника и электроника*. 1973, т.18, №3, с.649-651.
8. Е.А. Корнилов, О.А. Металлов, О.К. Назаренко, С.К. Пацьора. Потери энергии сварочного пучка

- в парогазовом канале // *Физика и химия обработки материалов*. 1975, №2, с.20-23.
9. В.П. Попович, Т.А. Новскова, И.Ф. Харченко, Е.Г. Шустин. Исследование условий образования плазменно-пучкового разряда без магнитного поля // *Радиофизика*. 1973, т.16, №6, с.1109-1117.
 10. В.А. Тутык. Эффект убегания электронов в электронных газоразрядных пушках с полым анодом // *Вакуумная наука и техника: Материалы X Научно-технической конференции в 2-х томах*. М.: МИЭМ, 2003, с.458-463.
 11. Yu.Ya. Ruzhin, V.N. Oraevsky, V.A. Tutyck. The active experiments in the stratosphere with the electron beams injection // *Adv. Space Res.* 1993, v.13, №10, p.(10)117-(10)122.
 12. В.А. Тутык. Газоразрядные электронные пушки для аэродинамических исследований // *Харьковская нанотехнологическая ассамблея. Т.1. Вакуумные нанотехнологии и оборудование: Сборник докладов 7-й Международной конференции «Вакуумные нанотехнологии и оборудование»*. Харьков: ННЦ ХФТИ, «Константа», 2006, с.50-54.

Статья поступила в редакцию 14.05.2008 г.

RESEARCH OF MODE PLASMA-BEAM DISCHARGE BY OPERATION OF THE GAS-DISCHARGE ELECTRONIC GUN

V.A. Tutyk

Results of experimental researches low-vacuum gas-discharge electron gun (LGEG) with the hollow anode on the basis of a high-voltage glow discharge in a mode plasma-beam discharge (PBD) in a gamut of pressures of helium 10...130 Pa are given. Boundaries of existence PBD and their dependences on parameters of an electron beam (EB) are found. It is shown, that pinch of pressure leads to necessity of magnification of density of electrons $n_b \sim 6 \cdot 10^7 \dots 8 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$ and powers EB at ignition PBD. Influence PBD on parameters LGEG, leading avalanche growth of current EB and burning PBD in all interior volume of the vacuum camera is revealed. Oscillation of great volume of plasma by operation LGEG in mode PBD does its perspective for embodying various CVD and PCVD technologies in medium of reactionary gas.

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМУ ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВОГО РОЗРЯДУ ПРИ РОБОТІ ГАЗОРОЗРЯДНОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ ГАРМАТИ

В.А. Тутик

Наведено результати експериментальних досліджень низьковакуумної газорозрядної електронної гармати (НГЕП) з порожнім анодом на основі високовольтного тліючого розряду в режимі плазменно-пучкового розряду (ППР) у діапазоні тисків гелію 10...130 Па. Знайдено границі існування ППР і їхньої залежності від параметрів електронного пучка (ЕП). Показано, що підвищення тиску приводить до необхідності збільшення щільності електронів $n_b \sim 6 \cdot 10^7 \dots 8 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ і потужності ЕП при запалюванні ППР. Виявлено вплив ППР на параметри НГЕП, що приводить до лавинообразного росту струму ЕП і горінню ППР у всьому внутрішньому об'ємі вакуумної камери. Генерація великого об'єму плазми при роботі НГЕП у режимі ППР робить його перспективним для реалізації різних CVD- і PCVD-технологій у середовищі реакційного газу.