

## Исследование непрерывной генерации пучков электронов в газах среднего давления

© В.А. Бобров, В.С. Войтешонок, А.И. Головин, М.М. Голубев, Б.Н. Ломакин, А.В. Туркин, А.И. Шлойдо

ГНЦ ФГУП „Центр Келдыша“,  
125438 Москва, Россия  
e-mail: blackash@aha.ru

(Поступило в Редакцию 10 мая 2012 г.)

Реализованы стационарный и устойчивый открытый разряды в атмосфере воздуха, гелия и гелия с добавкой нескольких процентов воздуха. Дано описание конструкции используемого генератора электронного пучка с широким набором материалов катода и изолятора. Эксперименты проведены при давлении воздуха в сотни и гелия в тысячи Па. Приведены измерения вольт-амперных характеристик разряда и сравнение результатов по достигнутой максимальной плотности тока с данными, опубликованными в литературе.

### Введение

Применение пучков электронов часто требует их вывода в газовую среду. В качестве широко известных примеров можно привести пучковую накачку газовых лазеров [1–4], пучково-плазменное напыление и другие технологические процессы [5,6], светотехнику [7,8] квантовую и микроэлектронику [9]. Даже в том случае, когда обработка пучком осуществляется в „вакууме“, речь идет, как правило, о форвакуумной области давлений. Если же подача в вакуумную камеру материалов, подлежащих обработке пучком, осуществляется через шлюзовые камеры, имеет смысл повышать рабочее давление до максимально допустимого конкретным технологическим процессом.

При формировании пучков электронов в глубоком вакууме (порядка  $10^{-4}$  Па) проблему вывода пучка в газовую среду обычно решают при помощи громоздких систем дифференциальной откачки или фольговых окон, технологические проблемы создания которых широко известны.

В связи с этим является актуальным создание устройств генерации электронного пучка непосредственно в газовой среде с относительно высоким давлением. Наиболее распространенный прибор такого типа — электронная пушка с высоковольтным тлеющим разрядом (ВТР, [6]). Однако рабочее давление в ВТР-пушках не превышает 1–10 Па, что во многих случаях недостаточно.

Для увеличения рабочего давления логичным шагом является уменьшение размеров устройства, обеспечивающее сохранение произведения давления на зазор между катодом и анодом, хотя применимость критерия подобия газовых разрядов в данном случае не очевидна. При размерах порядка миллиметров реализация электронно-оптических систем для формирования пучка, как это делается в ВТР-пушках, становится практически невозможной. В результате, устройство для генерации пучка электронов упрощается до плоского катода и анода с

одним или многими отверстиями (в последнем случае, как правило, используют сетчатый анод).

Одной из первых работ в данном направлении является [2], авторы которой предположили, что в эмиссию электронов с катода определяющий вклад вносит фотоэффект от излучения плазмы, и это принципиально отличает такой разряд от тлеющего, где эмиссия вызвана бомбардировкой катода ионами и нейтралами. В дальнейшем были выдвинуты аргументы против фотоэмиссионной природы разряда [10]. Следует отметить, что используемый авторами многих работ термин „открытый разряд“ представляется весьма удачным независимо от преобладающего механизма эмиссии электронов.

В работе [8] было предложено разместить между катодом и анодом диэлектрическую решетку, диафрагмирующую поверхность катода с целью уменьшения потока ионов на катод за счет их гибели на стенках изолятора в результате диффузии. Несмотря на то, что авторы [8] преследовали иную цель, такой изолятор позволяет увеличить стабильность горения разряда за счет уменьшения плотности тока эмиссии с катода.

В большинстве работ по исследованию открытого разряда напряжение на катод подается импульсами различной длительности; измеряется зависимость напряжения, тока и параметров разрядной плазмы (например, ее излучения) от времени. При достаточно большой продолжительности импульсов в плазме успевает произойти перераспределение зарядов, что приводит к формированию слоя катодного падения потенциала (КПП).

Для эффективного ускорения электронов в газе высокого давления требуется достаточно большая напряженность поля, обеспечивающая убегание (просвист) электронов. Поэтому разряд на начальной стадии (до формирования КПП) и стационарный разряд могут иметь принципиально разные характеристики.

Настоящая работа является первой из цикла об исследовании непрерывной генерации пучков электронов в открытом разряде. Авторы ставили перед собой цель обеспечить устойчивую генерацию пучка при макси-

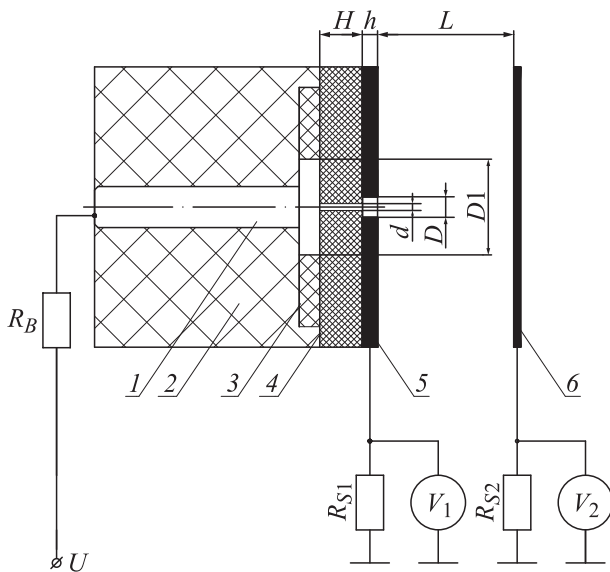
мально возможном давлении и достигнуть возможно больших значений рабочего напряжения.

В ходе работ исследовались вольтамперные характеристики генераторов электронного пучка (ГЭП) в воздухе и гелии при различных давлениях. В данной статье рассмотрены основные принципы работы ГЭП, использованный в работе вариант конструкции и результаты экспериментов по выбору конструкционных материалов.

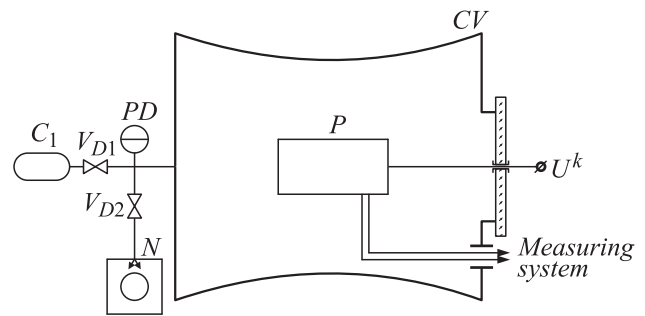
### 1. Генератор электронного пучка

Схема генератора приведена на рис. 1. Он состоит из катода 1, втулки 2, прокладки 3, изолирующей проставки 4 и анода в виде шайбы 5. Коллектор электронов 6 устанавливается для оценки тока пучка.

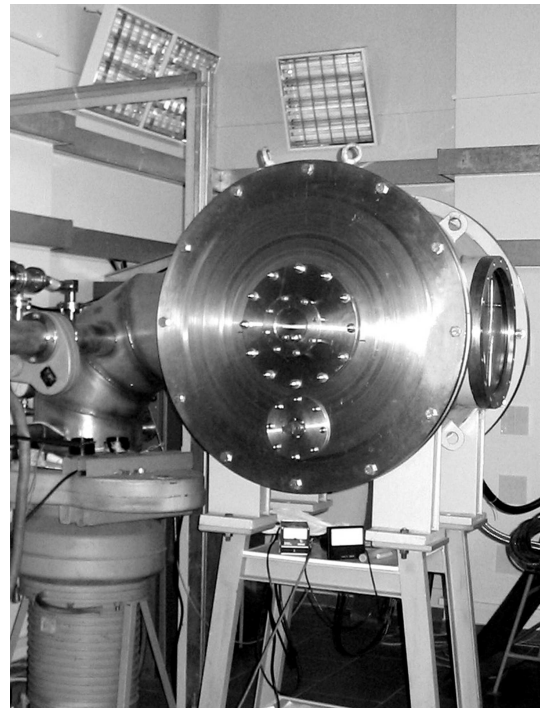
Как видно из рисунка, конструкция аналогична предложенной в работе [3], однако имеет одно принципиальное отличие — изолятор, разделяющий катод и анод, выполнен не как наносимое на катод покрытие, а в виде отдельной детали 4, механически прижимаемой к катоду. Это существенно уменьшило поток тепла на изолятор и позволило обеспечить продолжительную работу без принудительного охлаждения катода. Фактически, при уровнях мощности, приводимых в [3], нами наблюдалось установление стационарного теплового режима без принудительного охлаждения; длительность непрерывной работы при этом достигала более 30 мин. Дополнительным преимуществом изготовления изолятора в виде отдельной детали является существенное расширение номенклатуры возможных изоляционных материалов, которые могут быть применены в данной конструкции.



**Рис. 1.** Генератор электронного пучка, 1 — высоковольтный ввод с катодом, 2 — втулка, 3 — прокладка, 4 — изолирующая проставка, 5 — анод, 6 — коллектор электронов.



**Рис. 2.** Схема экспериментальной установки для исследования ГЭП.



**Рис. 3.** Внешний вид экспериментальной установки для исследования ГЭП.

### 2. Описание экспериментальной установки

Для определения достижимых параметров ГЭП и исследования вольт-амперных характеристик создана экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 2, а внешний вид — на рис. 3.

Экспериментальная установка представляет собой вакуумную камеру CV длиной 800 мм и диаметром 900 мм, изготовленную из нержавеющей стали. В торцевых фланцах предусмотрены герметичные разъемы, позволяющие обеспечить измерения тока анода 5 и тока коллектора 6. Камера заземлена в одной точке, сопротивление заземления составляет менее  $20 \mu\Omega$ . Для ввода высоковольтного питания предусмотрен специальный проходной фланец (рис. 4), изготовленный из

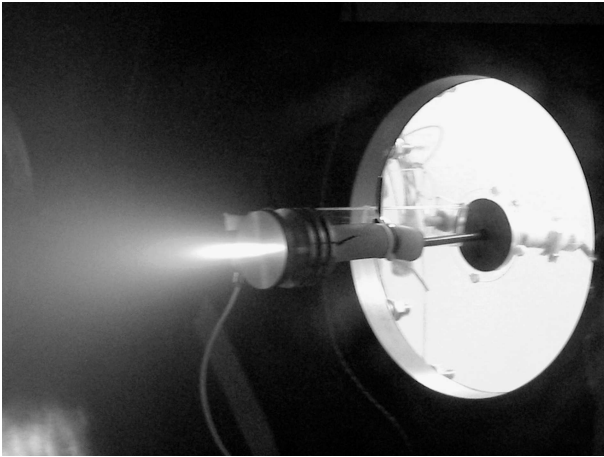


Рис. 4. Проходной высоковольтный фланец.

оргстекла. Через отверстие фланца без разрыва проходит высоковольтный кабель марки ПВЛЭ, герметизация осуществляется с помощью резинового уплотнения. Кабель подключается к катоду ГЭП, закрепленного на специальном кронштейне. Анод ГЭП заземлен через герморазъем, с внешней стороны которого установлено измерительное сопротивление  $R_{S1}$ , равное  $100 \Omega$  (рис. 1). Коллектор электронов  $\delta$  заземлен через шунт  $R_{S2}$  величиной  $200 \Omega$  и закреплен на поворотной штанге, что позволяет вводить коллектор в пучок электронов во время работы ГЭП.

С блока высоковольтного питания ГЭП через балластное сопротивление  $R_B = 100 \text{ k}\Omega$  подается напряжение отрицательной полярности на катод  $I$ . Максимальное напряжение блока до  $100 \text{ kV}$ , максимальный ток до  $180 \text{ mA}$ . Контроль тока и напряжения производится по показаниям блока.

При закрытом кране  $V_{D1}$  открывается затвор  $V_{D2}$ , вакуумная камера  $CV$  откачивается насосом  $N$  до давления  $20\text{--}30 \text{ Pa}$ . Затвор  $V_{D2}$  закрывается, краном  $V_{D1}$  устанавливается требуемое давление и состав газа из баллона  $C_1$  или атмосферы. Контроль давления производится по деформационному вакуумметру  $PD$  типа

ВД. Для уменьшения содержания остаточного воздуха в некоторых случаях осуществлялась повторная откачка камеры с последующим заполнением газом из баллона до требуемого давления.

### 3. Условия проведения экспериментов

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) измерялись в воздухе с давлением от  $90 \text{ Pa}$  до  $400 \text{ Pa}$  и в гелии технического марки А с давлением до  $3000 \text{ Pa}$ , в последнем случае содержание воздуха в гелии контролировалось и составляло от  $0,1$  до  $10$  объемных процентов.

Материалы и геометрические размеры изолирующей проставки  $4$  (рис. 1) приведены в табл. 1.

Влияние материала катода на работу ГЭП исследовалось с проставкой из керамики КСП-90 (табл. 1, № 5).

Для измерения ВАХ напряжение питания увеличивалось с шагом  $500 \text{ V}$ , на каждом шаге фиксировался ток. При нормальной работе ГЭП наблюдалось свечение плазмы, типичный вид которого показан на рис. 4. Размеры светящейся области зависят от давления газа и приложенного напряжения, влияющих на длину пробега. Форма светящейся области оказалась практически одинаковой для воздуха и гелия.

При достижении некоторого напряжения наблюдается резкое изменение режима работы ГЭП, сопровождающееся увеличением потребляемого тока в несколько раз. Увеличение тока всегда сопровождалось изменением формы и размеров светящейся области плазмы. Измерение ВАХ при достижении этого напряжения прекращалось.

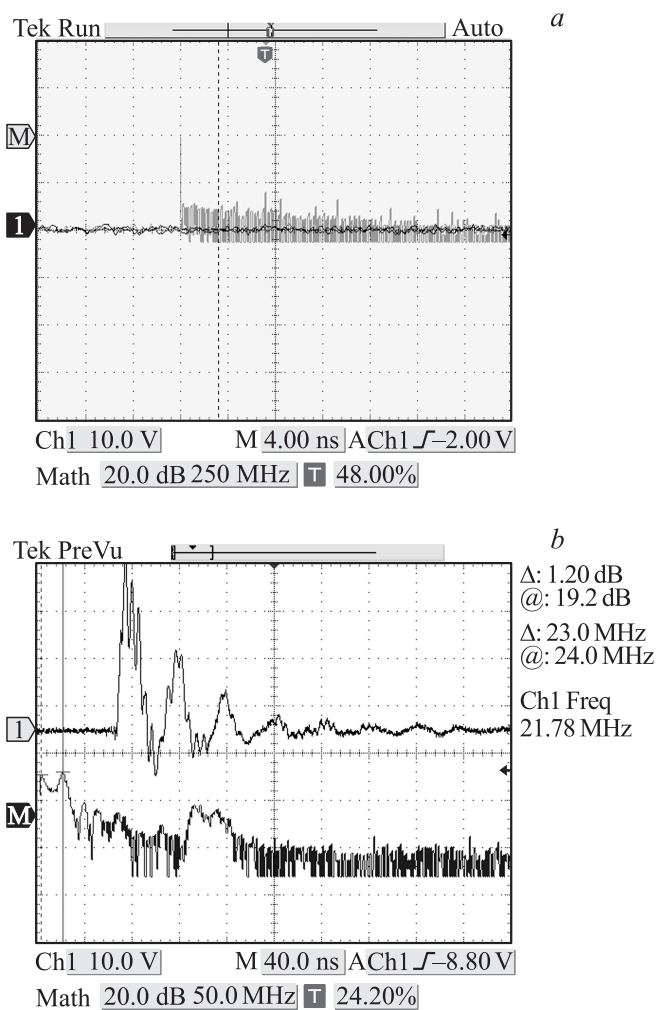
Иногда происходил пробой изолирующей проставки  $4$ . Наблюдались как пробой сквозь проставку на анод, так и пробой вдоль внутренней поверхности проставки.

В других случаях происходило резкое изменение видимой структуры разряда — вокруг всего ГЭП и подводящего кабеля образовывалась светящаяся область толщиной  $2\text{--}4 \text{ cm}$ . Изредка при этом наблюдалось свечение удаленных от ГЭП областей на внутренней поверхности вакуумной камеры, как правило, вблизи кромок либо отверстий. Свечение вокруг ГЭП и высоковольтного ка-

Таблица 1. Материалы и геометрические размеры

№	Материал	Толщина $H$ , mm	Диаметр отверстия в диэлектрике $d$ , mm	Диаметр отверстия в аноде $D$ , mm
1	Фольгированный тесктолит	1–3	0.4	3
2	Керамика с заливкой из вискита К-68	2.5	1.5	3
3	Фольгированная керамика	4.3	1.4	3
4	Керамика БПП-10	3	0.8	3
5	Керамика КСП-90 <sup>1</sup>	0.5–2.0	0.5	3

<sup>1</sup>Элементы 2, 3, 4 конструктивно объединены.

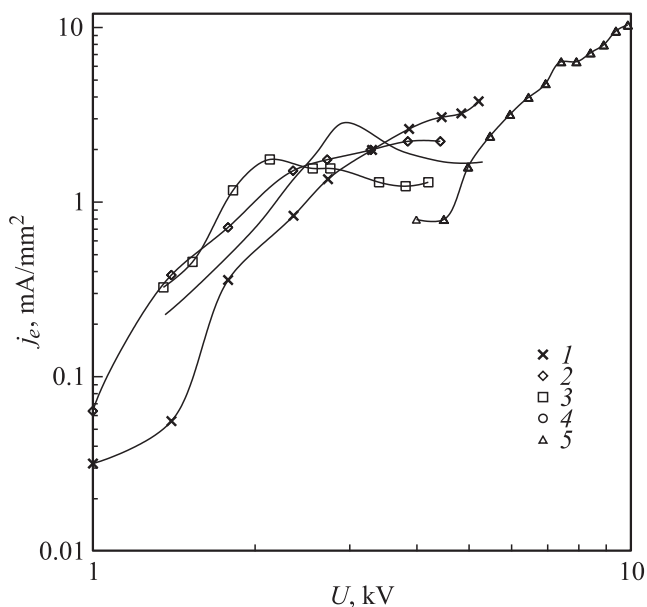


**Рис. 5.** Высоковольтное напряжение, измеренное с делителя, установленного между катодом и балластным сопротивлением (вверху) и его спектр (внизу) при нормальной генерации (а) и ВЧ-разряде (б).

кабеля интерпретировалось нами как возникновение высокочастотного разряда, что иллюстрируется результатами измерения напряжения на катоде, представленными на рис. 5. Объяснить появление ВЧ-разряда можно следующим образом: при появлении нестабильностей высоковольтного тлеющего разряда вблизи катода могут возникать области плазмы с высокой проводимостью. При этом заряд, накопленный в конструктивной емкости ГЭП  $C$ , разряжается на землю с характерным временем  $\tau_d = R_{pl}C$ , зависящим от эффективного сопротивления плазмы  $R_{pl}$ . Падение напряжения приводит к прекращению разряда и исчезновению области высокой проводимости. Начинается новый рост напряжения с характерным временем  $\tau_{ch} = RBC$ , зависящего от балластного сопротивления  $RB$ , и продолжающийся до момента нового возникновения области высокой проводимости. ГЭП входит в режим автогенерации, параметры которого зависят от конструктивной реализации ГЭП, емкости

и выходного сопротивления высоковольтного блока, величины балластного сопротивления, параметров газовой среды, скорости эрозии катода и т.д. После экранировки и заземления экрана высоковольтного кабеля и корпуса ГЭП по ГОСТ 19005–81 возникновение ВЧ-разряда не наблюдается.

Устранение проблемы ВЧ-разряда позволило увеличить достижимое напряжение на катоде. Резкий рост тока теперь сопровождается появлением яркого свечения вблизи отверстия в проставке 4, иногда заполняющего все пространство до отверстия в аноде 5 и далее до заземленных крепежных элементов. Желтоватый цвет свечения резко отличается от нормального свечения плазмы и одинаков для воздуха и гелия, что свидетельствует о высокой температуре газа. При этом нередко наблюдается продолжение генерации пучка и образование нормальной светящейся области плазмы. Механизм перехода в такой режим работы и способы дальнейшего повышения рабочего напряжения пока не исследованы. Наиболее близким аналогом данного режима может являться контракция тлеющего разряда, однако в использованной нами геометрии разрядного промежутка зарождение неустойчивости должно происходить в отверстии проставки 4 или в его непосредственной близости. Эта область разряда крайне сложно поддается прямой диагностике и даже визуальному наблюдению.



**Рис. 6.** Зависимости плотности тока ГЭП  $j_e$  от напряжения  $U$  на катоде при диаметре отверстия в аноде  $D = 3$  мм и давлении воздуха  $140 \pm 20$  Па. 1 — проставка из БГП,  $H = 3$  мм,  $d = 0.8$  мм; 2 — проставка из фольгированного текстолита,  $H = 3$  мм,  $d = 0.4$  мм; 3 — проставка из фольгированной керамики,  $H = 4.3$  мм,  $d = 1.4$  мм; 4 — проставка из керамики с заливкой К-68,  $H = 2.5$  мм,  $d = 1.5$  мм; 5 — конструкция из керамики КСП-90,  $H = 2.0$  мм,  $d = 0.5$  мм.

**Таблица 2.** Сравнение результатов по определению плотности тока для различных материалов катода ГЭП

Материал катода	Максимальная плотность тока <sup>1</sup> $j$ , mA/mm <sup>2</sup>	Максимальная плотность тока <sup>2</sup> $j$ , mA/mm <sup>2</sup>	Работа выхода <sup>3</sup> $\phi$ , eV
Алюминий	1.59	7.27(8.7) <sup>4</sup>	4.25
Гексаборид лантана	1.06	29.4	2.8
Графит	0.13	4.7(6.2) <sup>4</sup>	4.7
Медь	0.07	10.3	4.40
Нержавеющая сталь	0.07	8.75	4.41
Молибден	0.07	10.35	4.3
Цинк	—	3.18(5.5) <sup>(4)</sup>	4.24

<sup>1</sup> — полученная в работе [4].<sup>2</sup> — по результатам рис. 7.<sup>3</sup> — рекомендуемые в [15].<sup>4</sup> — экстраполяция на 9.5 kV.

#### 4. Выбор материалов конструкции ГЭП

Проверены несколько материалов изолирующей втулки 2: фторопласт, БПП-10, эпоксидная смола К-300, виксинт К-68, керамика КСП-90. Исследования проводились для геометрических размеров проставки 4, приведенных в табл. 1. В целом все материалы пригодны для использования в качестве изолирующего.

Изолирующая прокладка 3, предназначенная для затруднения пробоя по внутренней поверхности проставки 4, была изготовлена из виксинта К-68. В одном из вариантов конструкции втулка 2 и проставка 4 изготавливались как единая деталь из керамики КСП-90, т.е. прокладка 3 отсутствовала.

Анализ ВАХ, представленных на рис. 6, показывает, что максимальные напряжения достигаются при использовании материалов с высокой электрической прочностью, таких как керамика КСП-90.

#### 5. Зависимость ВАХ от материала катода

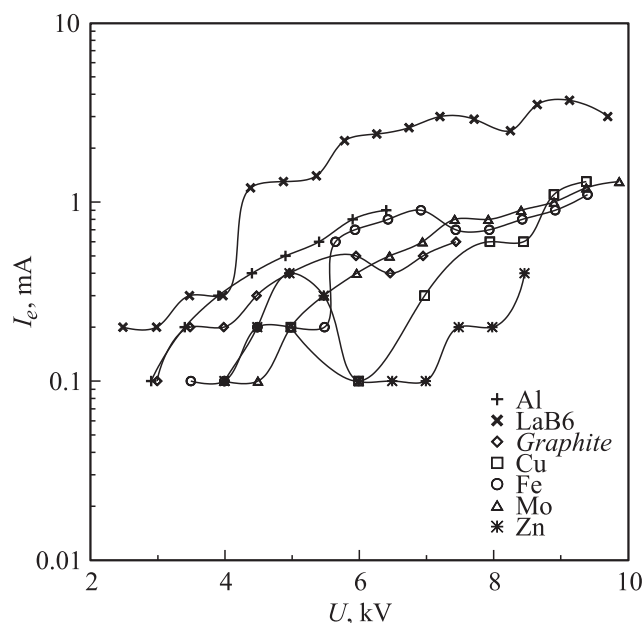
В качестве материала катода рассматривались Mo, Cu, Fe (сталь 12X18H10T), Al, графит, Zn, LaB<sub>6</sub>. Результаты измерений ВАХ на воздухе для одинаковых условий приведены на рис. 7. Погрешность измерения тока составляла  $\pm 0.05$  mA, напряжение поднималось с шагом 0.5 kV.

Необходимо отметить, что хотя разница в характере ВАХ заметна, однако на достижение максимальных параметров материал катода не оказывает существенного влияния, за исключением катода из алюминия, графита и цинка. Можно предположить, что в рамках использованной конструкции при давлении воздуха 133 Pa предельно достижимым напряжением на катоде является 9.5–10 kV. При этом катод из гексаборида лантана обеспечивал в 3 раза больший ток при тех же напряжениях, т.е. изменение режима работы ГЭП происходит в результате

эффектов, связанных именно с напряжением, а не током, как можно было бы ожидать.

В табл. 2 приведено сравнение результатов по определению плотности тока для различных материалов катода, полученных в примерно одинаковых условиях в работе [4] и полученных нами.

При больших давлениях эффективный коэффициент вторичной эмиссии  $\gamma$  практически не зависит от материала катода [2–5], что подтверждается нашими измерениями плотности тока, приведенными в табл. 2, за исключением катода из гексаборида лантана. Повышенную плотность тока при использовании гексаборида



**Рис. 7.** Зависимости тока ГЭП  $I_e$  от напряжения  $U$  для катодов из алюминия (Al), гексаборида лантана (LaB<sub>6</sub>), графита, меди (Cu), нержавеющей стали (Fe), молибдена (Mo) и цинка (Zn) на конструкции из керамики КСП-90 с размерами  $H = 2.0$  mm,  $d = 0.5$  mm,  $D = 3$  mm при давлении воздуха  $\sim 133$  Pa.

лантана можно объяснить различными причинами — дефектом сборки (неплотное прилегание катода к изолятору), влиянием термоэмиссионного тока, большим эффективным коэффициентом эмиссии за счет молекулярной структуры гексаборида и низкой работы выхода. В дальнейшем предполагается выполнить дополнительные эксперименты.

Отличия предельной плотности тока, измеренной в [4], от наших результатов для алюминия, гексаборида лантана и графита объясняются, очевидно, тем, что эксперименты в работе [4] выполнялись в гелии с небольшой примесью кислорода, тогда как наши эксперименты были выполнены в воздухе. Кроме того, авторы [4] не приводят критерия, по которому определялась предельная величина тока.

Катоды после проведения исследований всегда имеют ярко выраженные следы эрозии, подтверждающие вывод об ионной бомбардировке как основном канале эмиссии электронов [16]. Наименьшая эрозия была получена на катодах из молибдена, которые были использованы в дальнейших исследованиях.

## 6. Заключение

Использованная конструкция ГЭП позволила обеспечить устойчивую непрерывную генерацию пучков электронов с максимальной энергией порядка 10 keV в воздухе при давлении 133 Па. Генерация пучков с энергией порядка 6 keV осуществлялась в воздухе при давлении до 400 Па и в гелии при давлении до 3000 Па.

Несмотря на отсутствие принудительного охлаждения, предложенная конструкция позволяет работать в непрерывном режиме в течение длительного времени — непрерывная работа ГЭП продолжалась в течение 30 min, максимально достижимое время работы не измерялось.

Показано, что наибольшее рабочее напряжение достигается при использовании катодов из молибдена, гексаборида лантана, меди и нержавеющей стали. При этом гексаборид лантана обеспечивает в 3 раза большие токи, тогда как токи эмиссии для остальных катодов практически не отличаются.

В настоящее время к публикации готовятся результаты исследований зависимости ВАХ генераторов от давления газа и геометрии разрядного промежутка, результаты измерений КПД генерации пучков электронов и математическая модель, предложенная для описания работы ГЭП.

## Список литературы

- [1] Иванов И.Г., Латуш Е.Л., Сэм М.Ф. Ионные лазеры на парах металлов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 255 с.
- [2] Бохан П.А., Сорокин А.Р. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 1. С. 88–95.
- [3] Азаров А.В., Митько С.В., Очкин В.Н. // Патент РФ2172575, 2000.
- [4] Rocca J.J., Meyer J.D., Farrell M.R., Collins G.J. // J. Appl. Phys. 1984. Vol. 56. N 3. P. 790–797.
- [5] Holliday J.H. // Electrical Rev. 1970. Vol. 187. N 25. P. 875–879.
- [6] Завьялов М.А., Крейндель Ю.Е., Новиков А.А. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. М.: Энергоатомиздат, 1989. 256 с.
- [7] Муратов Е.А., Рахимов А.Т., Суетин Н.В. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 5. С. 121–124.
- [8] Бохан А.П., Закревский Д.Э. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 2. С. 74–80.
- [9] Ковалев А.С., Манкевич Ю.А., Муратова Е.А. и др. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. № 18. С. 1076–1083.
- [10] Сорокин А.Р. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 20. С. 1–4.
- [11] Самсонов Г.В. Эмиссионные свойства материалов. Справочник. Киев: Наукова думка, 1970.
- [12] Демкин В.П., Королев Б.В., Мельничук С.В. // Физика плазмы. 1995. Т. 21. Вып. 1. С. 81–84.
- [13] Utterback N.G., Miller G.H. // Rev. Sci. Instr. 1961. Vol. 32. P. 1101–1108.
- [14] Чернецкий А.В. Введение в физику плазмы. М.: Атомиздат, 1969. 136 с.
- [15] Hayden H.C., Utterback N.G. // Phys. Rev. 1964. V. 135. N 6A. P. 1575–1579.
- [16] Сорокин А.Р. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. Вып. 24. С. 89–94.