

04;10

## Сильноточный электронный пучок в разряде с полым катодом и рабочим давлением до 100 Torr

© А.Р. Сорокин

Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск  
E-mail: ars@isp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 15 сентября 2006 г.

Предложен разряд с плазмой в полости между выемкой  $\delta$  с плоским дном в катоде и частично прикрывающей ее диэлектрической пластиной с отверстием, определяющим апертуру разряда с дна выемки катода на анод. В ячейке с отверстием диаметром 22 mm в диэлектрической пластине и  $\delta = 0.5$  mm при  $p_{\text{He}} = 3.5$  Torr получен электронный пучок  $t_{EB} = 700$  ns с током пучка  $j_{EB}$ , в 10 раз превышающим полный ток эквивалентного ( $U$ ,  $p$  — фиксированы) аномального разряда  $j_{AD}$ . В прианодной области обнаружен эффект появления электрического поля, встречного по отношению к полю от источника питания и связанного с объемным зарядом у границы катодной плазмы, который не успева-ет отслеживать быстрый спад напряжения на разрядном промежутке. В ячейке с узкой щелью в диэлектрике  $S = 0.1 \times 5$  cm<sup>2</sup>,  $\delta = 0.5$  mm,  $p_{\text{He}} = 50$  Torr,  $U = 4.2$  kV получен пучок  $j_{EB} = 0.7$  kA/cm<sup>2</sup>,  $t_{EB} = 2$  ns,  $j_{EB}/j_{AD} = 1.5$ .

PACS: 52.80.Vp

1. В источниках электронных пучков (ЭП) на тлеющем разряде область сильного поля, где ускоряются электроны пучка, примыкает к поверхности, эмитирующей электроны. В зависимости от того, является ли эмиттером поверхность катода или плазменная граница, различают разряд с плазменным анодом или разряд с плазменным катодом [1]. Плазма в таких разрядах образуется там, где отсутствует сильное поле, например в полом аноде (в простейшем случае это плоская пластина с отверстием, в которое провисает ослабленное поле) или в полом катоде. Возможны и более сложные системы [1,2].

В разряде с полым анодом анодная плазма служит основным источником поставки ионов, бомбардирующих катод совместно с потоком быстрых атомов, возникающих в процессах перезарядки ионов

в прикатодной области с сильным электрическим полем. Число электронов, выбитых с катода на один ион, определяется обобщенным коэффициентом эмиссии  $\gamma = \gamma_i + \Sigma \gamma_a$  ( $\gamma_i, \gamma_a$  — коэффициенты эмиссии от отдельных иона и атома). В технологических источниках ЭП с полым катодом ток пучка  $j_{EB}$  обычно составляет  $\eta = 0.7-0.8$  от полного тока разряда —  $j$  [2]:

$$\eta = j_{EB}/j \approx \gamma(\gamma + 1)^{-1}. \quad (1)$$

Если анод с отверстием или сетчатый и внутри разрядного промежутка  $d$  сформировано катодное падение потенциала (КПП), то разряд практически не отличается от традиционного аномального разряда. Для фиксированных значений напряжения питания  $U$  и давления  $p$ , если  $U \approx U_{cf}$  ( $U_{cf}$  — величина КПП), в аномальном разряде достигаются наибольшие токи  $j_{EB}$  и  $j_{AD}$ . Для гелия

$$j_{AD} = 2.5 \cdot 10^{-12} (U_{cf})^3 (p_{He})^2. \quad (2)$$

Ссылки на оригинальные работы с этой и другими формулами приведены в [3].

Ниже условимся считать ЭП сильноточным, если ток в нем  $j_{EB}$  превышает расчетное значение полного тока аномального разряда  $j_{AD}$  для одних и тех же значений  $U, p$ . Такой режим возможен, например, в разряде с полым катодом. Ток  $j_{AD}$  определяется по формуле (2) с заменой  $U_{cf}$  на  $U$ , что не учитывает падения напряжения на положительном столбе разряда, которое может быть значительным [3], если  $l_{cf} \ll d$ , где  $l_{cf}$  — длина области КПП.

В разряде с полым катодом (типичное рабочее давление  $10^{-3}-1$  Торр) область сильного, ускоряющего электроны пучка, поля примыкает к входу в катодную металлическую полость. Коэффициент эмиссии электронов из катодной плазмы  $\gamma_p$  (количество эмитированных плазмой электронов, приходящихся на один ион, поступающий в полость), на которой обычно падает  $U_p = 100-400$  В [1], существенно превышает коэффициент эмиссии  $\gamma$  в аномальном разряде, чем обеспечивается большая эффективность  $\eta$  формирования ЭП. Если за областью с сильным полем в направлении к аноду степень ионизации газа много меньше, чем в катодной плазме, то параметр  $\eta$  приближается к 1. Энергетические потери определяются падением напряжения на катодной плазме и переносом заряженных частиц, возникших в процессах ионизации газа вне катодной полости. Для разряда с полым анодом

формула (1) совпадает с энергетическим КПД [2]:  $\eta \approx U j_{EB} / (U j)$ . Для разряда с полым катодом следует учитывать падение напряжения на катодной плазме  $U_p$ . Мощность пучка получается  $j_{EB}(U - U_p)$  и, если  $(U - U_p) \approx U$ , то формула (1) также совпадает с энергетическим КПД. Наиболее плотная катодная плазма образуется, если длина области КПП  $l_{cf} < \delta/2$  (в полости у стенок с расстоянием между ними  $\delta$  сформировано КПП). Считаем, что  $l_{cf}$  приближенно соответствует аномальному разряду, в котором [3]:

$$p_{\text{He}} - l_{cf} = 0.48 \text{ Torr} \cdot \text{cm}. \quad (3)$$

В разряде с полым катодом, например, с ростом давления наряду с катодной плазмой формируется анодная, которая при еще большем  $p$  смыкается с катодной и разряд переходит в низковольтную форму. В импульсном режиме переход в низковольтную форму может происходить при большем  $p$ . Разряд с полым катодом обладает большей склонностью к переходу в низковольтный режим, чем разряд с полым анодом [1], и в настоящее время ограничено используется в технологических электронных пушках [2]. Возможности источников ЭП на разряде с полым катодом могут быть расширены, в частности для возбуждения лазеров, если повысить рабочее давление газа, например уменьшив величину  $\delta$  [4]. В [4] использовалась коаксиальная конструкция источника. Сетчатый анод (диаметр  $D = 48 \text{ mm}$ ) располагался с зазором  $d = 1 \text{ mm}$  относительно ряда катодных полостей (их количество определяло суммарную апертуру пучка) с малой  $\delta = 0.5 \text{ mm}$ , что позволило для  $p_{\text{He}} \sim 8 \text{ Torr}$  получить  $j_{EB} \sim 1 \text{ kA/cm}^2$ , а  $j_{EB}/j_{AD} \sim 10^3$ . Хотя в  $d$  разряд был однородным, в области дрейфа ЭП за сетчатым анодом в результате эффектов самофокусировки электронов пучка однородность возбуждения газа нарушалась — появлялись отдельные яркие образования. При большем  $p$  нарушалась однородность и в  $d$ .

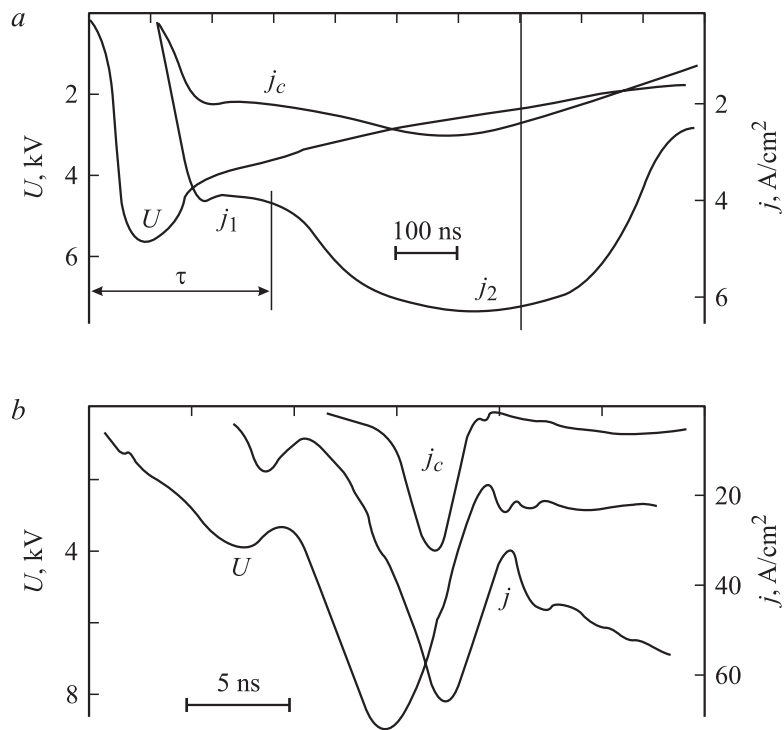
С целью избежать этих неприятностей и расширить диапазон рабочих давлений в настоящей работе предложен разряд с относительно пониженным коэффициентом  $\gamma_p$  катодной плазмы в полости между выемкой  $\delta$  в катодной стенке с плоским дном и частично прикрывающей ее диэлектрической пластиной с отверстием, определяющим апертуру разряда с плоского дна катода на анод. Это позволило повысить давление в источнике ЭП до  $100 \text{ Torr}$ . Ранее на возможности подобного режима разряда было обращено внимание в [3]. Разряд в гелии с примесью

1%  $O_2$ . С примесью  $O_2$  при том же  $U$  ток слегка понижается, но растет устойчивость разряда [3]. Добавление  $O_2$  не является принципиальным для рассматриваемого режима разряда.

2. Чтобы выделить влияние катодной плазмы на разряд, в опытах с ячейкой № 1 диэлектрическая пластина имела большое отверстие — его диаметр 22 мм на много превышал глубину выемки в катоде  $\delta = 0.5$  мм. Диаметр выемки с плоским дном 30 мм. Для извлечения части тока ЭП, регистрируемой коллектором,  $j_c$ , использовался сетчатый анод прозрачностью  $\mu = 0.64$ , расположенный на расстоянии  $d = 11$  мм от поверхности дна катода, так что полный ток ЭП составлял  $j_{EB} = j_c/\mu$  (параметр  $\eta = j_c(j\mu)^{-1}$ ). Шаг отверстий в сетке 0.5 мм. Коллектор размещался на расстоянии  $L_d = 5$  мм (область дрейфа ЭП) от сетки.

Во всех опытах для регистрации  $j$  анод и коллектор, электрически соединенные накоротко между собой, подсоединялись к измерительному сопротивлению 0.2  $\Omega$ , заземленному другим концом. Измерения  $j_c$  проводились с заземленным накоротко анодом. В таких измерениях ток ЭП может быть только занижен, поскольку, например, коллектором не регистрируются электроны пучка, заторможенные в области дрейфа, и электроны, отраженные от коллектора (на коллекторе всегда присутствует отрицательное смещение относительно анода). Почти во всех ранее опубликованных работах измерения в разряде с сетчатым анодом (открытый разряд) основаны на регистрациях анодного  $j_a$  и коллекторного  $j_c$  токов с отдельных сопротивлений. В таких условиях измерений в процессе разряда идет выравнивание потенциалов сетки и коллектора и в измеряемые токи дополнительно включаются потоки зарядов, возникших в результате ионизации газа пучком в области дрейфа. Наибольшие искажения измерений  $j_{EB}$  возникают, если реальный  $j_{EB}$  мал. Ток  $j_a$  получается заниженным, а  $j_c$  и соответственно  $j_{EB}$ ,  $\eta$  — завышенными (в области дрейфа дополнительный ток направлен от коллектора к аноду). В результате определенный таким образом ток пучка может, например, на порядок превышать реальный ток ЭП.

Для небольших давлений, как и в [3], могла наблюдаться 2-импульсная структура  $j$  (рис. 1, а),  $p = 3.5$  Торг. При небольшом напряжении на осциллограмме  $j$  наблюдался только один импульс  $j_1$ . Свечения плазмы в катодной полости не было видно. По мере увеличения напряжения питания появлялся импульс  $j_2$  со все уменьшающейся



**Рис. 1.** Осциллограммы разряда в ячейке № 1: *a* —  $p = 3.5$  Torr,  $\delta = 0.5$  mm; *b* —  $p = 50$  Torr,  $\delta = 0.5$  mm.

задержкой  $\tau$  относительно начала разряда. В катодной полости возникали сначала отдельные, хорошо видные, диффузные каналы свящейся плазмы с одновременным их замыканием с торца отверстия диэлектрика напрямую на анод. При еще большем напряжении все эти каналы перекрывались между собой и вызывали равномерное диффузное свечение газа. Параметр  $\alpha = j_{EB}/j_{AD}$  в момент, отмеченный вертикальной линией на рис. 1, *a*, достигал значения 11.4 ( $U \approx 2.2$  kV,  $\eta = 0.56$ ). Можно предположить, что электроны пучка, ускоренные в области формирующегося сильного поля у входа в катодную полость,

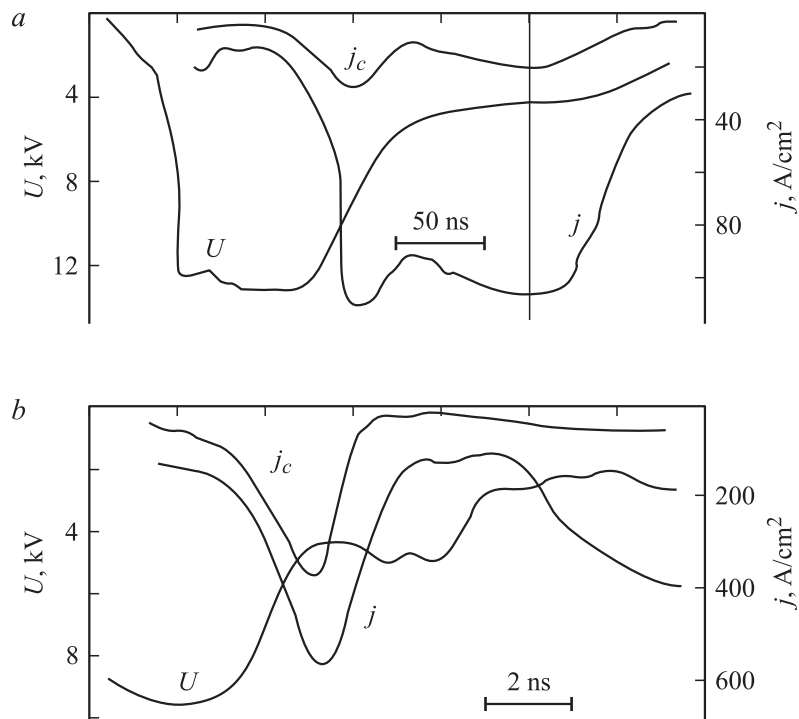
распространяются над поверхностью катода (не путать этот пучок с основным пучком в сторону анода), дополнительно ионизуя газ, и токи  $j_c$ ,  $j$  оказываются выше, чем в аномальном разряде. В этих опытах распределение плотности тока поперек основного ЭП, распространяющегося в сторону анода, осталось неизвестным. Неизвестен также момент появления диффузного освещения катодной плазмы, видимого глазом. Эта плазма, скорее всего, возникает в конце импульса, уже в отсутствие ЭП, в местах зарождения плазмы с меньшей светимостью и ответственной за появление тока  $j_2$ .

При повышенном давлении (рис. 1, *b* —  $p = 50$  Torr) поскольку детали ячейки до подачи импульса напряжения находятся под потенциалом земли, а по (3) для  $p = 50$  Torr  $l_{cf} \approx 0.1$  mm  $< \delta/2$  и параметр  $p\delta = 2.5$  Torr · cm приблизительно соответствует минимуму кривой Пашена, то сначала формируется емкостной разряд, затрагивающий полость (для электрического пробоя промежутка  $d$  напрямую с катода на анод, где  $pd = 55$  Torr · cm, требуется в 2 раза большее напряжение). Небольшая начальная проводимость плазмы обеспечивает дальнейший рост  $U$  на промежутке  $d$ , а затем в процессе развития разряда происходит быстрый спад  $U$  с одновременным формированием области сильного поля и пучка в сторону анода. В максимуме  $j_c$  параметр  $\alpha$  мал — 0.04 ( $U = 5.9$  kV,  $\eta = 0.9$ ), пучок в первом импульсе, по-видимому, формируется вблизи торца отверстия в диэлектрике, а ток  $j_c$  усреднен по всей площади  $S$  открытой части поверхности катода. Обращает на себя внимание большое значение параметра  $\eta$  в максимуме  $j_c$ .

3. Чтобы выделить сильноточный импульс пучка в разряде с повышенным давлением, использовалась ячейка № 2 с узкой щелью в диэлектрике:  $S = 0.1 \times 5 = 0.5$  cm<sup>2</sup>,  $\delta = 0.5$  или 1 mm,  $d = 10.7$  или 11.2 mm,  $L_d = 5$  mm, прозрачность анодной сетки  $\mu = 0.56$ .

Для низкого давления (рис. 2, *a* —  $p = 4.3$  Torr) параметр  $\alpha$  в момент, отмеченный вертикальной линией на рис. 2, *a*, достигал значения — 10.9 ( $U \approx 4.3$  kV,  $\eta = 0.36$ ), а в первом максимуме  $j_c$ ,  $j$  в 150 ns от начала приложенного напряжения —  $\alpha = 2.3$  ( $U \approx 7.8$  kV,  $\eta = 0.42$ ).

Наиболее интересно поведение разряда при повышенном давлении (рис. 2 *b* —  $p = 50$  Torr). Здесь в максимуме  $j_c$  получены следующие параметры разряда:  $U \approx 4.2$  kV,  $j_{EB} \approx 700$  A/cm<sup>2</sup> с  $t_{EB} = 2$  ns,  $\alpha = 1.5$ ,  $\eta = 1.2$ . На переднем фронте  $U$ , так же как и на рис. 1, *b*, имелась



**Рис. 2.** Осциллограммы разряда в ячейке № 2: *a* —  $p = 4.3$  Торр,  $\delta = 1$  мм; *b* —  $p = 50$  Торр,  $\delta = 0.5$  мм.

ступенька, соответствующая началу формирования катодной плазмы (эта часть осциллограмм не отражена на рис. 2, *b*). Для давления в 100 Торр получен пучок с  $t_{EB} = 1.5$  ns (предел временного разрешения использованного осциллографа) и  $\eta = 0.68$ .

Необычно зарегистрированное в опыте значение  $\eta > 1$  означает, что  $j_{EB} > j$ . Этот эффект обусловлен быстрым спадом напряжения на разрядном промежутке в течение сильноточного импульса тока пучка. Распределение поля и потенциала в разрядном промежутке определяется суперпозицией поля, задаваемого внешним источником питания, и поля объемных зарядов самого разряда. Объемный заряд,

ответственный за сильное поле, ускоряющее электроны пучка, за время сброса  $U$  не успевает перестроиться, и поле, порождаемое им на анод, может превысить встречное поле от внешнего источника питания. В результате в прианодной области появляется ток  $\Delta j$ , встречный току пучка, и  $j_{EB}$  становится больше  $j = j_{EB} - \Delta j$ , а  $\eta > 1$ . По этой же причине в опытах с ячейкой № 1 (рис. 1, *b*) достигается высокое значение  $\eta$ . После частичного расформирования объемного заряда происходит дальнейшая перестройка распределения поля и пучок может появиться вновь (рис. 2, *b*). Заметим, что в области отрицательного свечения нормального тлеющего разряда, где также наблюдается ЭП, иногда тоже регистрируется встречное поле [5].

Оценим для условий максимума  $j_c$  (рис. 2, *b* —  $U_{cf} = 4.2$  kV, считаем  $U \approx U_{cf}$  в максимуме  $j_c$ ),  $p = 50$  Torr время  $\tau_d$  расплывания объемного положительного заряда, полагая, что его параметры те же, что и в КПП аномального разряда. За время  $\tau_d$  примем время пересечения ионом длины  $l_{cf}$ :  $\tau_d = l_{cf}/v$ , где  $v$  — средняя скорость иона,  $v = 0.35 \cdot 10^6 (eU_{cf}/n)^{0.5}$  cm/s ( $eU_{cf}$  подставляется в eV),  $n = l_{cf}/\lambda_{ct}$  — число перезарядок на длине  $l_{cf}$ ,  $\lambda_{ct} = (0.32 \cdot 10^{17} \cdot p\sigma_{ct})^{-1}$ , сечение перезарядки  $\sigma_{ct} = 1.5 \cdot 10^{-15}$  cm<sup>2</sup>. Получим  $\tau_d = 2$  ns, что согласуется с осциллограммой  $j_c$  (рис. 2, *b*). В этом процессе участвует также поток со стороны анода электронов, компенсирующих объемный заряд.

4. Предложен разряд с катодной плазмой, обладающей пониженным, по сравнению с обычным разрядом с полым катодом коэффициентом эмиссии в полости между выемкой в катоде и прикрывающей ее диэлектрической пластиной с отверстием. Такой режим разряда позволил повысить рабочее давление на 2 порядка, до 100 Torr, и получить пучки с током на порядок более высоким, чем полный ток эквивалентного аномального разряда. В прианодной области обнаружен эффект появления результирующего электрического поля, встречного по отношению к полю от внешнего источника питания. Этот эффект связан с положительным объемным зарядом у границы катодной плазмы, который не успевает отслеживать быстрый спад напряжения на разрядном промежутке, что позволяет с высокой эффективностью формировать пучок малой длительности на уровне  $\sim 1$  ns с чрезвычайно высокой плотностью тока  $\sim 1$  kA/cm<sup>2</sup> при небольших напряжениях питания и давлениях до  $\sim 100$  Torr.



Разработанные электроразрядные источники электронных пучков расширяют возможности их практического использования.

## Список литературы

- [1] Крейндель Ю.Е. Плазменные источники электронов. М: Атомиздат, 1977. 145 с.
- [2] Завьялов М.А., Крейндель Ю.Е., Новиков А.А. и др. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. М.: Энергоатомиздат, 1989. 256 с.
- [3] Сорокин А.Р. // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 5. С. 47–55.
- [4] Sorokin A.R. // J. Moscow Phys. Sos. 1997. N 7. P. 145–151.
- [5] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 536 с.