

04;10;12

Барьерный открытый разряд атмосферного давления

© А.Р. Сорокин

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

Поступило в Редакцию 13 ноября 2002 г.

Предложен барьерный открытый разряд повышенной затрудненности и стабильности, в котором удалось увеличить рабочее давление гелия, когда генерируются электронные пучки, на порядок, до 0.8 atm, без проблем с устойчивостью разряда. Анодная сетка с отверстиями 0.17 mm располагалась непосредственно на диэлектрике ($\epsilon \approx 1000$), но может быть сформирована на нем напылением или с помощью фотолитографии. Путем уменьшения отверстий в анодной сетке можно надеяться на продвижение в сторону еще более высоких давлений.

1. В обычном открытом разряде (ОР) в прикатодной области или во всем разрядном промежутке поддерживается электрическое поле, достаточное для „убегания“ электронов, проникающих затем в виде электронного пучка через сетчатый анод в область дрейфа [1].

В типичном промежутке $d = 0.5-1$ mm рабочее давление не превышает нескольких десятков Torr. Основная проблема: требуется удержать в течение импульса высокое значение падения потенциала в прикатодном слое и сохранить при этом устойчивость разряда. Так, для давления гелия $p_{He} = 100$ Torr установившаяся длина катодного падения потенциала составит всего $l_{cf} = 0.05$ mm, а поле у катода ($U = 5$ kV) будет $E_c \approx 2U/l_{cf} = 2 \cdot 10^6$ V/cm, что на порядок выше, чем требуется для начала взрывных процессов на катоде из металла [2]. Эквивалентный ток аномального разряда при этом достиг бы 600 A/cm². В импульсном режиме стабильность разряда в таких условиях можно сохранить в течение нескольких ns [3]. Дополнительно возникает проблема формирования возбуждающих разряд импульсов напряжения с малой длительностью переднего фронта, которая для $d \gg l_{cf}$ должна быть также несколько ns, иначе пробой промежутка произойдет на переднем фронте при малом напряжении. Увеличить же время формирования разряда, повышая его затрудненность уменьшением d до размеров $\sim l_{cf}$, т.е. 50 μ m, практически не реально.

Электронные пучки (ЭП) открытого разряда являются эффективным источником накачки газовых лазеров [4]. Весьма заманчиво было бы продвинуться в сторону более высоких давлений, например, для повышения энергоемкости лазерного излучения. Возможны и другие применения [5].

Для решения задачи в работе предложен барьерный открытый разряд (БР), в котором катодом служит диэлектрик, прикрывающий металлический электрод. Сетчатый анод располагается непосредственно на поверхности диэлектрика. Такой разряд должен характеризоваться высокой стабильностью: меньше коэффициент эмиссии электронов с диэлектрика, следовательно, более протяженная область катодного падения потенциала (КПП); развитие неоднородности затруднено — ее ток в начальной фазе быстро сбрасывает локальную напряженность поля, заряжая поверхность диэлектрика, ограниченную размером одного отверстия сетки (в традиционном БР может заряжаться вся поверхность). Тем самым предотвращается развитие искрового пробоя промежутка. Наконец, главное: затрудненность БР в такой конструкции, а следовательно, и предельное рабочее давление должны в основном определяться размером отверстий в сетке, которые можно сформировать сколь угодно малыми.

В опытах с барьерным открытым разрядом, описанных в недавно опубликованной работе [6], где анодная сетка с отверстиями $A = 2 \text{ mm}$ располагалась в 1.5 mm от керамического катода (диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 4$), отсутствует главное свойство разряда в предложенной нами конструкции — повышенная его затрудненность. Поэтому, несмотря на стабильность разряда в [6] вплоть до атмосферного давления, что не удивительно (здесь уже наличие отверстий в аноде не сказывается на разряде, а в [7], например, не только получен устойчивый барьерный разряд, но и наблюдалась лазерная генерация в нем до давления в 17 atm), эффективная генерация электронного пучка с током $\sim 1 \text{ A/cm}^2$ регистрировалась только при малом давлении $5\text{--}20 \text{ Torr}$.

Основное внимание в работе уделено особенностям работы предложенного устройства. Обсуждаются перспективы дальнейшего повышения рабочего давления.

2. Опыты проводились с керамикой от конденсаторов КВИ-2: 68 pF ; 16 kV , $\epsilon \sim 1000$, диаметр 10 mm . Конденсатор с одной стороны сошлифовывался до размера $\delta = 2 \text{ mm}$ в центре по оси, а его собственный вывод с другой стороны подключался к минусу источника питания.

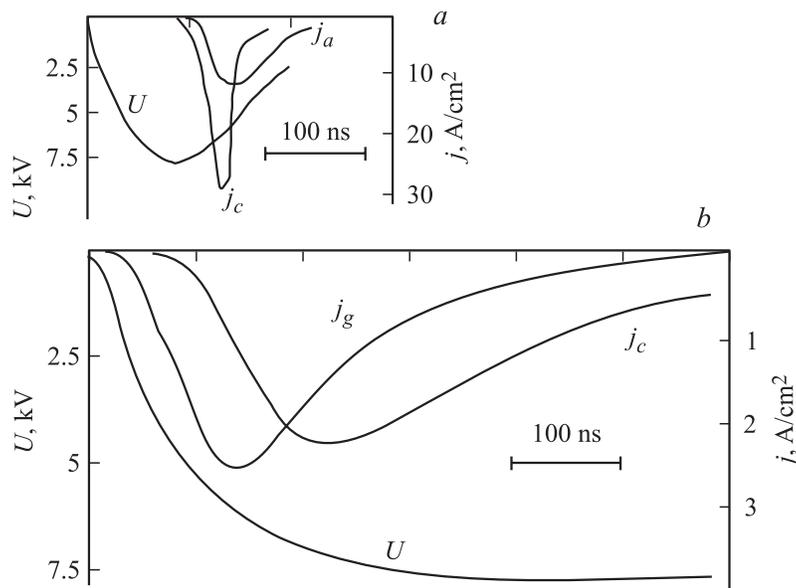


Рис. 1. Осциллограммы, иллюстрирующие разряды: открытый — *a* [8]; барьерный — *b, c*; аномальный — *d*. Давление гелия 30 Торг. Пояснения в тексте.

Анодная сетка имела отверстия 0.17 mm, а геометрическую прозрачность $\mu = 0.72$. Плотность всех токов определялась как отношение регистрируемого тока к активной площади катода, т.е. к суммарной площади отверстий в сетке, которая составляла — $S = 0.45 \text{ cm}^2$.

Сравним поведение разряда в различных промежутках сначала для давления гелия 30 Торг.

На рис. 1, *a, b* представлены осциллограммы для обычного ОР [8] и барьерного. Для контроля тока пучка были введены коллекторная сетка (шаг 0.5 mm, $\mu = 0.65$) и коллектор, расположенные соответственно на 5 и 10 mm от катода. Эти элементы могли влиять и на сам разряд. Действительно, хотя анодная сетка с отверстиями $A = 0.17 \text{ mm}$ экранирует провисание поля в глубь пространства дрейфа и концентрирует его у диэлектрика, в промежутке катод–коллекторная сетка (5 mm) может присутствовать поле, достаточное для возникновения там разряда. В этом промежутке для 30 Торг затрудненность разряда снята: параметр

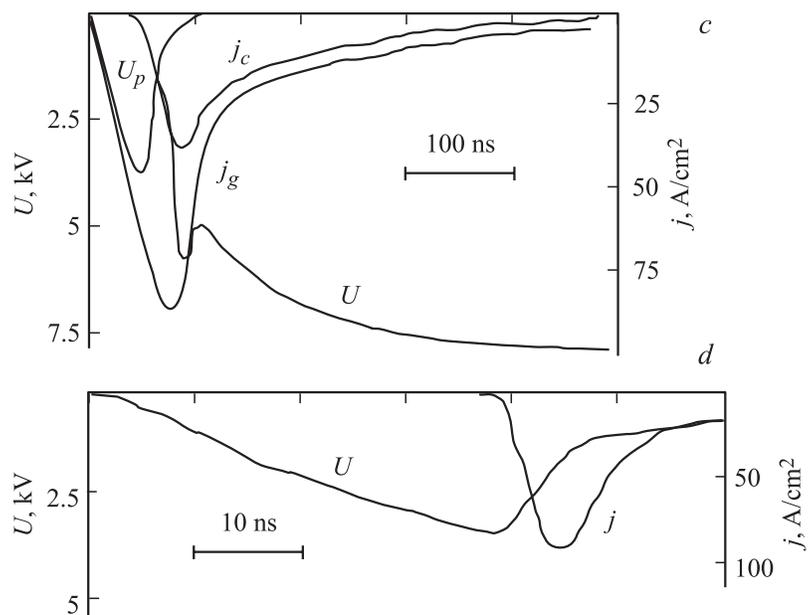


Рис. 1 (продолжение).

$pd_{ag} = 15 > (pd)_{\min} = 4 \text{ Torr} \cdot \text{cm}$ соответствует правой ветви кривой Пашена. Поэтому разряд начинает свое развитие в нем по коротким силовым линиям, заряжая часть поверхности диэлектрика, находящуюся напротив перемычек коллекторной сетки — осциллограмма для j_g на рис. 1, b.

По мере формирования КПП поле еще более стягивается к катоду. Улучшаются условия для „убегания“ электронов, которые формируются в ЭП. Ток разряда заряжает оставшуюся поверхность диэлектрика, в последнюю очередь напротив отверстий коллекторной сетки. Поэтому в заключительной стадии разряда ток в основном переносится электронами пучка на коллектор — j_c , а ток на коллекторную сетку j_g быстрее стремится к нулю (рис. 1, b).

Если коллекторную сетку и коллектор оставить под свободным потенциалом, отключив их, то из-за роста затрудненности разряда (в промежутке катод–коллекторная сетка он теперь не формируется)

многократно падает свечение газа. Это свидетельствует об уменьшении разрядного тока. Задержка пробоя при этом должна возрасти. Судить об этом по изменению осциллограммы анодного тока j_a трудно из-за малой величины тока разряда по сравнению с током зарядки емкости между металлическим катодом и перемычками анодной сетки (j_a есть сумма этих токов).

Иначе развивается ОР (рис. 1, *a*). В условиях большей затрудненности $pd = 1.5 < (pd)_{\min}$ (левая ветвь Пашена) он начинает свое развитие по наиболее длинным силовым линиям, как в полом аноде [5]. Поэтому в начальной стадии ток разряда переносится преимущественно электронами пучка на коллектор и только в процессе формирования КПП разряд с задержкой распространяется на перемычки сетки и появляется анодный ток. В типичном ОР следы катодного распыления на катоде всегда центрируются по осям отверстий сетки.

Другое отличие. В БР, несмотря на облегченные условия начала разряда, инициируемого его развитием сначала в длинном промежутке катод–коллекторная сетка (разряд начинается раньше, чем в ОР, — сравнить рис. 1, *a, b*), токи в барьерном разряде получаются на порядок меньше. Связано ли это только с меньшей эмиссией электронов с диэлектрика?

Такие осциллограммы получаются (рис. 1, *c*), если анодную сетку отсоединить и оставить ее под свободным потенциалом U_p (измерялся через высокоомное сопротивление). Этот потенциал вначале растет одновременно с U , затем происходит электрический пробой промежутка катод–коллекторная сетка и U_p падает до нуля. Поэтому, что важно, все приложенное напряжение, даже в этом случае, быстро сосредоточивается у катода.

То, что возрос ток коллекторной сетки, не удивительно, поскольку он включает в себя ток зарядки емкости металлический катод–перемычки анодной сетки. В условиях рис. 1, *b* этот ток принадлежал току анода j_a (на рисунке он не показан). Существенно, что на порядок возрос ток коллектора j_c . Иными словами, по-видимому, эмиссия электронов с диэлектрика не столь уж мала, но вследствие более высокой затрудненности барьерного разряда в сильноточной стадии (рис. 1, *b*) — ток там наблюдался меньший.

Для полноты картины на рис. 1, *d* приведены осциллограммы прямого разряда (это обычный аномальный разряд) между коллектором (минус питания) и коллекторной сеткой (5 mm).

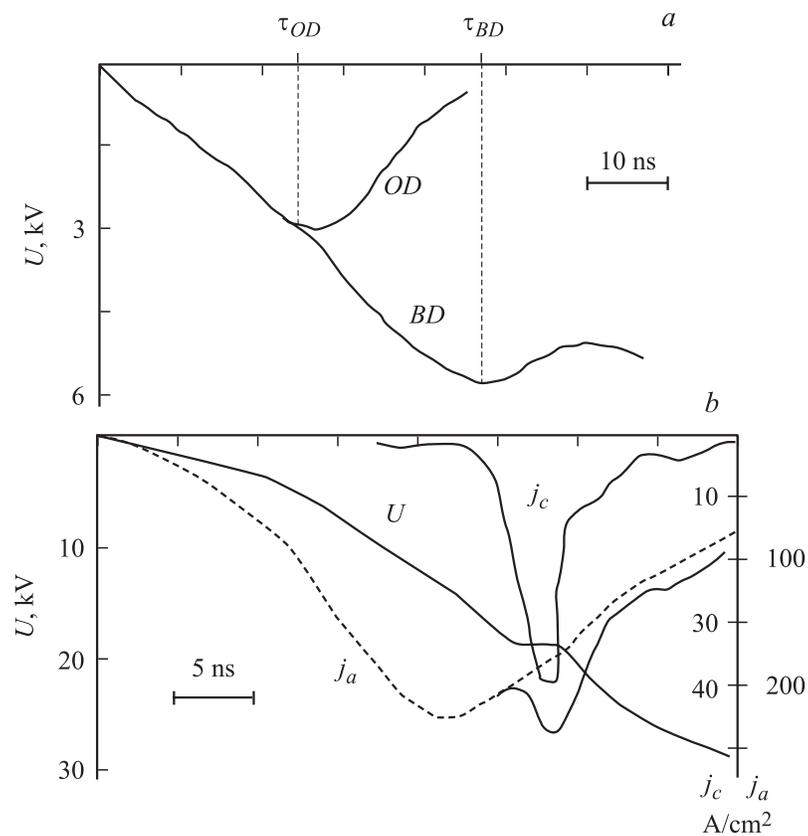


Рис. 2. Осциллограммы открытого разряда — OD (a) и барьерного — BD (a, b, c). Давление гелия: a — 400 Torr; b — 200; c — 0.8 atm. Пояснения в тексте.

3. Перейдем к высоким давлениям. На рис. 2, a приведены осциллограммы напряжения для ОР ($d = 0.6$ mm) и БР для 400 Torr гелия. Здесь уже затрудненность БР оказывается выше, чем в ОР и в начальной стадии разряда, несмотря на подключенную коллекторную сетку, в два раза возросли задержка ($\tau_{BD} \approx 2\tau_{OD}$) и напряжение пробоя. К тому же в этих условиях ОР, в отличие от барьерного, теряет устойчивость. Еще раз подчеркнем два фактора: повышенные затрудненность и ста-

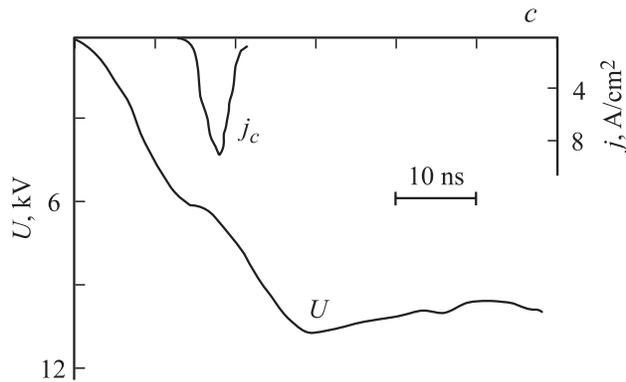


Рис. 2 (продолжение).

бильность барьерного разряда, которые отражают суть предложенного способа получения пучков при высоких давлениях.

На рис. 2, *b* приведены осциллограммы для БР без коллекторной сетки. Коллектор находился в 10 мм от катода, давление 200 Торг. Для анодного тока j_a : пунктир — ток зарядки анодной сетки в вакууме, сплошная часть кривой — довесок к току анода от разряда. Видно, что ток коллектора начинается раньше сильноточной стадии этого довеска, возникающего на спаде напряжения. Следует иметь в виду: осциллограмма U здесь и на других рисунках, кроме начального участка, не характеризует прямо напряжение на разрядном промежутке, поскольку зарядка поверхности диэлектрика выравнивает потенциалы ее и анодной сетки. Возникает вопрос: какая часть тока коллектора соответствует току пучка?

Как было установлено, для высоких давлений $p > 100$ Торг параметры разряда перестают зависеть от того, находятся ли сетка и коллектор под свободным потенциалом или нет, т.е. все разрядные процессы протекают в прикатодной области, куда быстро сбрасывается все приложенное напряжение. Поэтому в этих условиях коллектор, если он подключен, регистрирует ток пучка. Это подтверждается и наблюдением прямого, т.е. аномального, разряда между коллектором и коллекторной сеткой (5 мм), который, например, для 400 Торг при том же импульсе питания, что и на рис. 2, *a*, происходит с большей задержкой — 150 нс (сравнить также с рис. 1, *d*), поскольку параметр

$pd_{gs} = 200 \text{ Torr} \cdot \text{cm}$ на два порядка получается больше, чем $(pd)_{\min}$. Напряжение или задержка пробоя возрастают теперь из-за слишком большого давления.

Таким образом, в случае БР с подсоединенной коллекторной сеткой в условиях высокого давления остаточного поля в промежутке катод—коллекторная сетка (в отсутствие этой сетки в промежутке катод—коллектор) оказывается не достаточно для формирования и протекания в нем разряда, который полностью сосредоточивается лишь в прикатодной области. Поэтому при высоких давлениях коллектор регистрирует ток электронного пучка.

Последние осциллограммы (рис. 2, *c*) приведены для давления гелия 0.8 atm (коллектор в 5 mm от катода). Ток ЭП мал, поскольку для $U \approx 6 \text{ kV}$ лишь малая часть электронов пучка достигает коллектора: длина свободного пробега электронов [9] составляет всего $l = 0.2U/p = 2 \text{ mm}$. По этой же причине небольшой ток пучка — $j_c = 3 \text{ A/cm}^2$ регистрировался при $U = 9 \text{ kV}$, $p = 300 \text{ Torr}$ ($l = 6 \text{ mm}$) и с коллекторной сеткой и коллектором, отстоящими от катода соответственно на 5 и 10 mm . Для роста l следует дополнительно затруднить разряд, чтобы пробой происходил при большем U .

В нашем распоряжении не было сетки с отверстиями меньшими, чем в описанных выше опытах. В целях сравнения была применена сетка с шагом 1 mm ($\mu = 0.85$). С ней предельное давление гелия оказалось в $2-3$ раза меньше. Следовательно, уменьшив отверстия ($A < 0.17 \text{ mm}$), можно надеяться на дальнейшее повышение рабочего давления (или l). Проблема механической прочности сетки при сохранении ее высокой прозрачности, а также плотного прилегания сетки к диэлектрику для больших S может быть решена, если формировать сетку непосредственно на поверхность диэлектрика, например, напылением металла на керамику через маску или применив к предварительно нанесенному на диэлектрик слою металла технику фотолитографии.

Заключение. Повышенная затрудненность и стабильность барьерного открытого разряда в предложенной конструкции позволила увеличить рабочее давление гелия, когда генерируются электронные пучки, более чем на порядок, до 0.8 atm , без возникновения каких-либо проблем с потерей устойчивости разряда. Анодную сетку можно формировать на диэлектрике путем напыления или с помощью фотолитографии. Это позволит дополнительно продвинуться в сторону более высоких давлений, за счет повышения затрудненности разряда уменьшением отверстий в анодной сетке.

Список литературы

- [1] *Сорокин А.Р.* Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 24. С. 89–94.
- [2] *Клименко К.А., Королев Ю.Д.* // ЖТФ. 1990. Т. 60. № 9. С. 138–142.
- [3] *Королев Ю.Д., Месяц Г.А.* Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука, 1991. 224 с.
- [4] *Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А.* и др. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. М.: Научная книга, 1998. 544 с.
- [5] *Завьялов М.А., Крейндель Ю.Е.* и др. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. М.: Энергоатомиздат, 1989. 256 с.
- [6] *Азаров А.В., Митько С.В., Очкин В.Н.* // Квантовая электроника. 2002. Т. 32. № 8. С. 675–679.
- [7] *Ищенко В.Н., Лисицин В.Н., Сорокин А.Р.* // Квантовая электроника. 1976. Т. 5. № 4. С. 788–794.
- [8] *Колбычев Г.В.* // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 6. С. 635–648.
- [9] *Кудрявцев А.А., Цендин Л.Д.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 7. С. 46–56.