

10

Высокоэффективная генерация электронных пучков в открытом разряде без анодной сетки

© П.А. Бохан, Д.Э. Закревский

Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск

E-mail: zakrdm@isp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 16 августа 2001 г.

Впервые реализована разновидность открытого разряда, в котором практическая эффективность генерации непрерывного электронного пучка превышает 98%. Определены условия функционирования и измерены вольт-амперные характеристики данного типа разряда. Полученные результаты объяснены с точки зрения фотоэлектронного механизма эмиссии электронов.

Тлеющие разряды, в которых значительная часть тока переносится быстрыми электронами, находят широкое применение для возбуждения лазеров [1] и в различных технологических целях [2]. Общим недостатком этих устройств является резкое снижение рабочего напряжения и эффективности η генерации электронного пучка (ЭП) с ростом давления рабочего газа. Поэтому в технологических устройствах давление ограничивается типичной величиной $\sim 10^{-1}$ Торг [2], а в лазерах ~ 1 Торг по гелию [3]. Общей причиной снижения эффективности является уменьшение коэффициента электронной эмиссии под действием ионов и быстрых атомов при уменьшении их энергии [2], что снижает η до 60% уже при давлении гелия $p_{\text{He}} \sim 1$ Торг [3].

Реализация разряда, получившего название открытого (ОР) [4], в котором основным поставщиком электронов является фотоэмиссия [5], резко расширила диапазон рабочих давлений и круг рабочих сред лазеров, возбуждаемых ЭП [6,7]. В открытом разряде высокая $\eta > 90\%$ сохраняется вплоть до $p_{\text{He}} \sim (10 \div 20)$ Торг в непрерывном режиме и до десятков Торг в импульсном [8]. Однако необходимость использования анодной сетки с ограниченной геометрической прозрачностью $\sim (70 \dots 80)\%$ существенно снижает практическую η генерации ЭП и является серьезной технической проблемой при создании лазерных

кувет с большим рабочим объемом, работающих при высоких температурах.

Ниже описаны первые эксперименты с разрядной структурой ОР, в которой анодный узел не перехватывает ЭП, что позволило получить практическую $\eta > 98\%$ в непрерывном режиме при $p_{\text{He}} \sim 10 \text{ Torr}$. Основное отличие описанной разновидности ОР от традиционной состоит в подавлении ионного тока j_i на катод. В традиционном ОР снижение j_i обеспечивается малым ($\sim 1 \text{ mm}$) межэлектродным промежутком d катод-анод [9]. Поэтому оптимальный параметр $(p \times d)$ в традиционном ОР равен $\sim 2 \text{ Torr} \cdot \text{cm}$ в гелии [10] для импульсного ОР и $\sim 1 \text{ Torr} \cdot \text{cm}$ для непрерывного ОР, что совпадает с величиной $(p \times l_c) \sim 1 \text{ Torr} \cdot \text{cm}$ для нормального тлеющего разряда (l_c — длина области катодного падения потенциала). В данной работе для подавления ионного тока между катодом и анодом установлена диэлектрическая решетка с малым характерным расстоянием между стенками токопроводящего канала. Благодаря этому ионы при их дрейфе на катод подвержены гибели на стенках за счет амбиполярной диффузии. Это резко снижает ионный ток на катод, тем самым повышая η .

На рис. 1 изображена схема ячейки для реализации ОР без анодной сетки. Основой разрядной структуры, определяющей свойства данного вида ОР, являются диэлектрические пластины (1) из кварца, установленные на расстоянии 1 mm от поверхности катода (2) из нержавеющей стали. Высота пластин 5 mm, ширина 3 mm, длина 20 mm и расстояние между ними 3 mm. При диаметре рабочей поверхности катода 18 mm площадь его открытой части, не экранированной пластинами (1), составляет $\sim 1 \text{ cm}^2$. Диаметр анодных Mo-стержней (3) составляет 2 mm, поэтому быстрые электроны свободно проходят между пластинами и попадают на коллектор электронов (4). Расстояние между его ближайшей кромкой и анодом составляло $2 \div 8 \text{ cm}$, диаметр 34 mm, а общая длина дрейфового пространства 10 cm. Эксперименты проводились при слабой прокачке ($\sim 0.2 \text{ cm}^3/\text{s}$) рабочего газа гелия марки ВЧ, дополнительно очищаемого ловушкой из активированного угля, охлаждаемой жидким азотом. Без принятия мер по дополнительной очистке гелия происходит загрязнение тех частей, которые не подвержены ионной бомбардировке, что постепенно (через десятки часов) снижает эффективность генерации ЭП.

На рис. 2, 3 показаны типичные вольт-амперные характеристики (ВАХ) исследованного разряда, имеющие 4 резко различающиеся области и реализующиеся при разных рабочих напряжениях U . В диапазоне

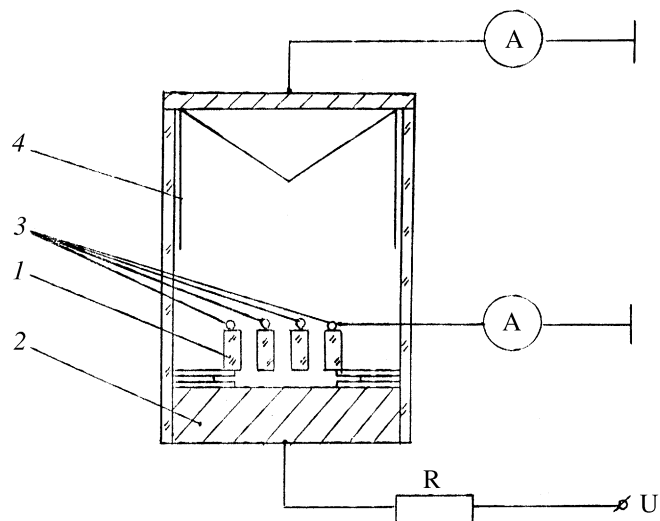


Рис. 1. Газоразрядная ячейка для реализации открытого разряда без анодной сетки.

изменения U от порогового для горения ~ 420 В до $U \leq 600$ В (рис. 2) функционирует обычный аномальный разряд (АР), характеризующийся быстро нарастающей ВАХ и типичной для слаботочного АР $20 \div 30\%$ эффективностью генерации ЭП. Переходная область от АР к ОР реализуется в диапазоне $600 \dots 800$ В и выделяется резким падением анодного тока, компенсирующего ток ионов на катод, и повышением эффективности генерации ЭП. Падение анодного тока настолько велико, что возникает участок с падающей ВАХ и для суммарного тока. Положение и величина пика анодного и минимума суммарного тока сильно зависят от давления газа и его чистоты, а также состояния поверхности катода. Чем чище условия эксперимента, тем резче выражены переходные области. При напряжении $U \geq 800$ В реализуется вполне развитый ОР, характеризующийся медленным нарастанием тока и эффективностью генерации ЭП. При длине коллектора электронов ~ 2 см наложение поперечного магнитного поля отклоняет ЭП на стенку кюветы и может полностью подавить ток на коллектор.

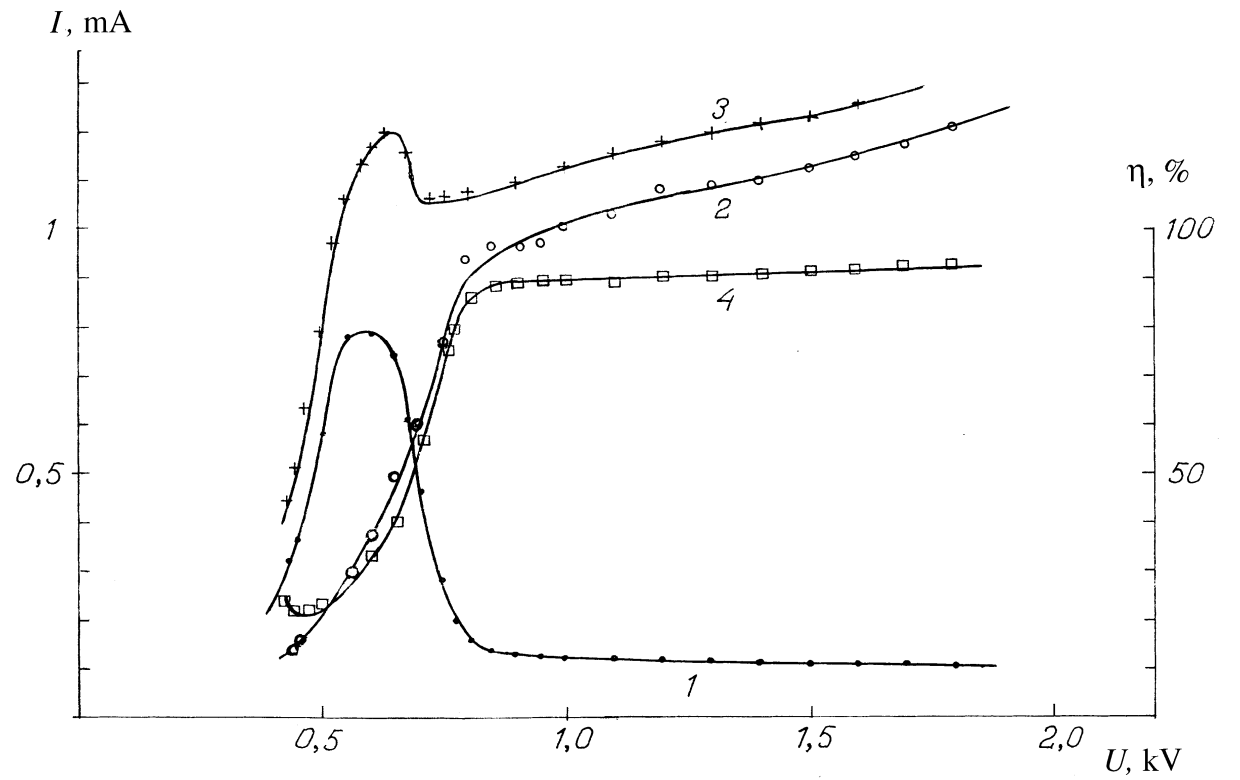


Рис. 2. Изменение параметров разряда при увеличении напряжения U при $p_{\text{He}} = 8.3$ Торг: 1 — анодный ток; 2 — ток коллектора I_c ; 3 — суммарный ток; 4 — эффективность генерации ЭП η .

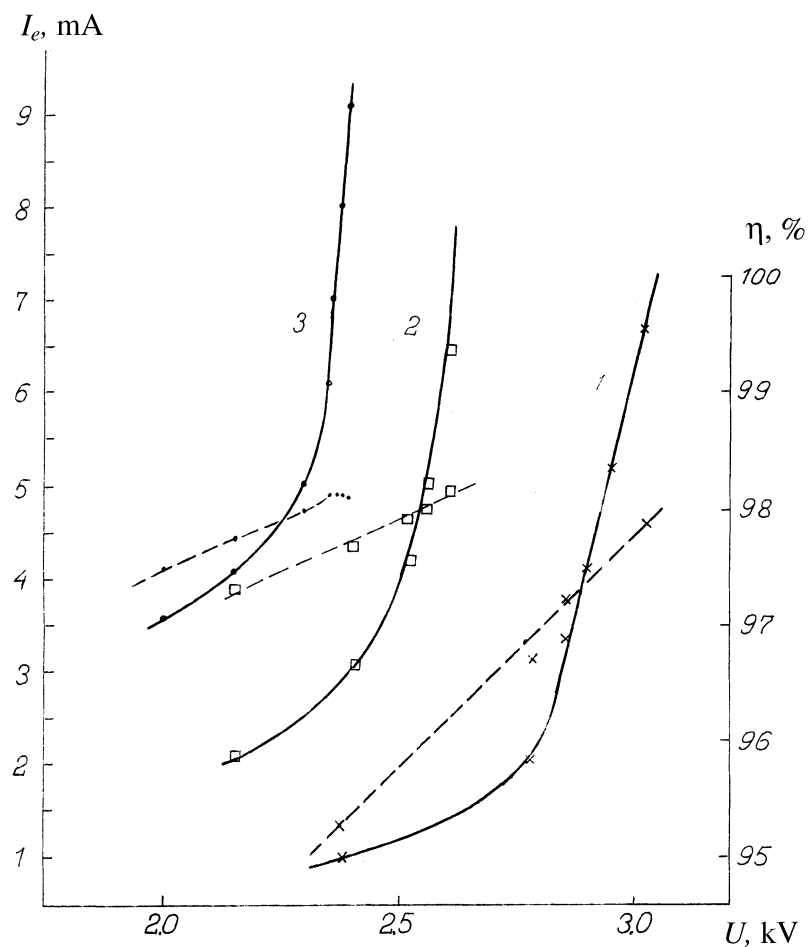


Рис. 3. Зависимости тока коллектора I_c (сплошные линии) и эффективности генерации ЭП η (пунктирные линии) от напряжения U (1 — $\rho_{He} = 8 \text{ Torr}$; 2 — $\rho_{He} = 9 \text{ Torr}$; 3 — $\rho_{He} = 10 \text{ Torr}$).

При дальнейшем росте U характер изменения эффективности генерации ЭП сохраняется (рис. 3). В то же время, начиная с некоторого U , зависящего от ρ_{He} , медленный рост тока ЭП переходит в быстрый. Чем больше ρ_{He} , тем быстрее происходит рост тока при увеличении U .

Длительная эксплуатация ячейки (десятки часов) при пониженном p_{He} и повышенных токах и U приводит к постепенному росту U и уменьшению эффективности генерации ЭП с дальнейшей ее стабилизацией на значительно более низком уровне (70. . . 80)%. Исследование поверхности катода показало, что в этом случае он подвергся значительной эрозии, главным образом в центральной части промежутка шириной 0.5 мм между пластинами (I). В области эрозии сохранилась чистая блестящая поверхность катода, типичная при ионном травлении металлов. На периферии катод оказался сильно загрязненным. Предполагается, что это загрязнение вызвано разложением клея К-400, примененного для герметизации ячейки.

Полученные результаты хорошо укладываются в фотоэлектронную модель открытого разряда. В пользу этого говорят следующие экспериментальные результаты.

1. Экстремально высокая эффективность генерации ЭП. При $p_{\text{He}} = 8.5 \dots 9 \text{ Torr}$ и плотности тока электронного пучка $j_e = (5 \dots 7) \text{ mA/cm}^2$ она оставляет $\eta = 98.3\%$, что соответствует отношению $j_e/j_i = 58$. Такое соотношение при напряжении (2.5. . . 3) kV может обеспечить только фотоэлектронный механизм эмиссии. Глубокое подавление ионного тока на катод приводит к тому, что суммарная плотность тока в реализованном ОР более чем на три порядка ниже, чем плотность тока в АР $j_{AD} = 2.5 \cdot 10^{-12} p_{\text{He}} U^3$ [11] и на три порядка ниже, чем в высоковольтном тлеющем разряде с ЭП в [3], в которых ток в основном обусловлен эмиссией под действием тяжелых частиц.

2. Сильная зависимость j_e от U (рис. 3) при достижении определенного значения U ($j_e \sim \text{const} \times U^{21}$ для $I > 6 \text{ mA}$, $p_{\text{He}} = 10 \text{ Torr}$), что вынуждает использовать балластное сопротивление для стабилизации горения ОР. Это объясняется тем, что при существенном преобладании фотоэмиссии разряд в первом приближении должен быть неустойчивым относительно U , так же как и нормальный тлеющий разряд.

3. Загрязнение части поверхности катода, не подверженной ионному травлению, приводит к снижению доли фотоэлектронного тока, росту рабочего напряжения и к существенному падению эффективности генерации ЭП. Напротив, для ион-электронной эмиссии с ростом рабочего напряжения эффективность генерации ЭП всегда увеличивается.

Таким образом, реализована разновидность открытого разряда, в котором практическая эффективность генерации непрерывного электронного пучка превышает 98%.

Список литературы

- [1] *Иванов И.Г., Латуш Е.Л., Сэм М.Ф.* // Ионные лазеры на парах металлов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 255 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] *Rossa J.J., Meyer J.D., Yu Z.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1982. V. 41. N 9. P. 811–813.
- [4] *Бохан П.А., Сорокин А.Р.* // ЖТФ. 1985. Т. 55. № 1. С. 88–95.
- [5] *Бохан А.П., Бохан П.А.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 6. С. 7–12.
- [6] *Vokhan P.A., Sorokin A.R.* // Opt. and Quant. Electr. 1991. V. 23. N 4. P. 523–538.
- [7] *Arlantsev S.V., Borovich B.L., Buchanov V.V.* et al. // J. Russ. Las. Res. 1995. V. 16. N 2. P. 99–119.
- [8] *Колбычев Г.В.* // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 6. С. 635–649.
- [9] *Бохан П.А.* // ЖТФ. 1991. Т. 61. В. 6. С. 61–68.
- [10] *Бохан П.А., Колбычев Г.В.* // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. В. 7. С. 418–421.
- [11] *Клименко К.А., Королев Ю.Д.* // ЖТФ. 1990. Т. 60. В. 9. С. 138–142.