

04;10

## Особенности широкоапертурного тлеющего разряда в гелии

© П.А. Бохан, Дм.Э. Закревский

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

Поступило в Редакцию 27 февраля 2007 г.

Исследованы характеристики широкоапертурного разряда в гелии с диаметром катода 19.5 см и расстоянием катод–сетчатый анод 3 см. Обнаружено, что свойства разряда сильно отличаются от свойств аномального разряда. Эти отличия выражаются в наличии перегибов в ВАХ, их резкой зависимости от давления гелия, немонотонности зависимости эффективности генерации электронного пучка  $\eta$  от напряжения горения  $U$ , а также в реализации  $\eta \approx 100\%$  в диапазоне  $U \approx 350 \dots 1000$  В.

PACS: 52.80.-s

В работах [1,2] было показано, что тлеющий разряд в благородных газах при диаметре катода  $d_C \gg l_n$  носит преимущественно фотоэлектронный характер ( $l_n$  — длина области катодного падения потенциала нормального разряда). Это позволило достигнуть эффективности генерации электронного пучка (ЭП)  $\eta \geq 95\%$  при  $d_C > 10$  см в неоне при сравнительно низких напряжениях горения  $U \geq 500$  В. Такие пучки находят применение для плазменного роста и травления полупроводниковых структур [3,4], создания широкоапертурных источников света [5] и накачки ионных лазеров на парах металлов с перезарядочным механизмом возбуждения верхних рабочих уровней [6,7]. В последнем случае наиболее широко используются смеси паров металлов с гелием.

В настоящей работе исследуются особенности генерации ЭП в широкоапертурном аномальном разряде (WAD) в гелии. Использовалась цилиндрическая камера объемом  $7.5 \cdot 10^3$  см<sup>3</sup>. Алюминиевый катод — сферический с радиусом кривизны 60 см и диаметром  $d_C = 19.5$  см. В отличие от работы [1] роль анода выполняла проволочная сетка с геометрической прозрачностью  $\mu = 0.86$  и характерным размером отверстий  $\delta = 1$  мм. Расстояние катод–анод  $l_{CA} = 30$  мм. Электроны пучка регистрировались подвижным коллектором электронов (СЕ), что

позволяло изменять расстояние между анодом и коллектором  $I_{AC}$  в пределах 4...13 см. Отрицательное напряжение подавалось на катод, а анод и СЕ заземлялись через токоизмерительные приборы. Их сопротивление подбирались таким образом, чтобы коллектор всегда находился под отрицательным потенциалом  $\sim 20$  mV относительно анода, с тем чтобы не завывать ток ЭП. При вычислениях эффективности генерации ЭП  $\eta$  по формуле  $\eta = I_{CE}/I_{WAD}\mu$ , где  $I_{WAD} = I_{CE} + I_A$  — ток разряда,  $I_{CE}, I_A$  — токи СЕ и анода, учитывалось, что часть быстрых электронов, рассеянных проволочным анодом, также достигают коллектора, что повышает  $\mu$  с геометрической  $\mu = 0.86$  до расчетной  $\mu_{eff} = 0.95$  согласно данным по отражению и рассеянию электронов из [8]. Поэтому эффективность генерации ЭП рассчитывалась по формуле

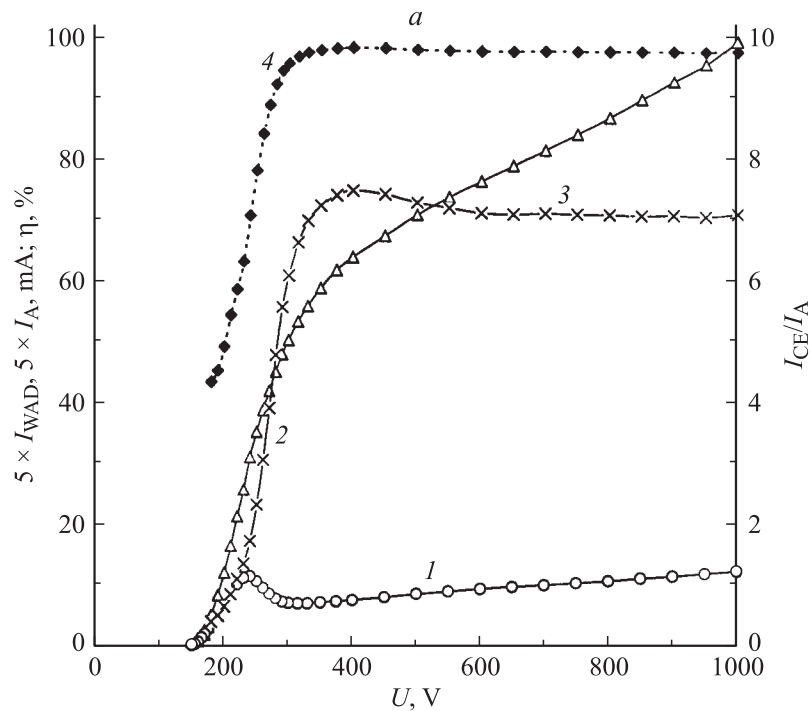
$$\eta = 1.053/(1 + I_A/I_{CE}). \quad (1)$$

Тренировка и обезгаживание камеры проводились при прокачке через нее гелия чистотой М4 со скоростью  $15 \text{ cm}^3/\text{s}$ , дополнительно очищаемого охлаждаемой жидким азотом ловушкой из активированного угля. Стабильность результатов достигалась через  $\sim 100$  h обезгаживания и тренировки камеры. Снятие характеристик разряда проводилось в непрокачиваемой камере, заполняемой до рабочего давления, при мощности не выше 0.5 от мощности разряда в режиме тренировки. Суммарное натекание в камеру за неделю составляло не выше  $10^{-3}$  Torr при первоначальном вакууме  $5 \cdot 10^{-6}$  Torr.

В приведенных экспериментах измерялись  $I_{CE}, I_A$  в диапазоне давлений гелия  $P_{He} \sim 0.5 \dots 1.2$  Torr, для которых  $l_n < l_{CA}$ . В совокупности с малой величиной  $\delta$  это исключало проникновение поля за анод. Рабочие напряжения  $U$  изменялись от порога зажигания до 1.5 kV и мощности разряда не более 150 W. В указанных пределах изменения давления гелия и напряжений  $I_{CE}, I_A$  ведут себя подобным образом, но различаются количественно. В качестве примера на рис. 1, *a, b* показаны основные характеристики разряда при  $P_{He} = 0.6$  Torr и  $P_{He} = 1$  Torr, а на рис. 2 приведены эти характеристики в зависимости от  $P_{He}$  при постоянном  $U = 1$  kV.

Отметим и кратко остановимся на наиболее заметных отличиях реализуемого WAD в гелии от обычного тлеющего разряда:

- наличие перегибов в ВАХ и их резкая зависимость от  $P_{He}$ ;
- аномально высокая эффективность генерации ЭП по сравнению с любыми другими разрядами;
- нмонотонность величины  $\eta(U)$  и ее рост при увеличении  $P_{He}$ .



**Рис. 1.** Зависимости основных параметров разряда от напряжения  $U$ : 1 —  $I_A$ ; 2 —  $I_{CE}/I_A$ ; 3 —  $I_{WAD}$ ; 4 —  $\eta$ .  $a$  —  $P_{He} = 0.6$  Torr,  $b$  —  $P_{He} = 1$  Torr,  $l_{AC} = 9$  см.

Все исследованные ранее стационарные разряды в благородных газах, кроме открытого разряда без анодной сетки [9], имеют равномерно возрастающую ВАХ вида  $j \sim U^n$ , где  $n$  близко к 3 [10–13]. В частности, для аномального разряда (AD) в гелии в диапазоне до 1 kV известна эмпирическая зависимость [14], выведенная из работ V.A. Günterschulze:

$$j_{AD} = 2.5 \cdot 10^{-12} P_{He}^2 U^3, \quad (2)$$

где  $j_{AD}$  — плотность тока в  $A/cm^2$ ,  $P_{He}$  — в Torr;  $U$  — в вольтах. В табл. 1 для  $P_{He} = 0.6$  Torr приведены сравнительные данные для  $j_{AD}$ , рассчитанной по (2), и плотности тока  $j_{WAD}$  для WAD.

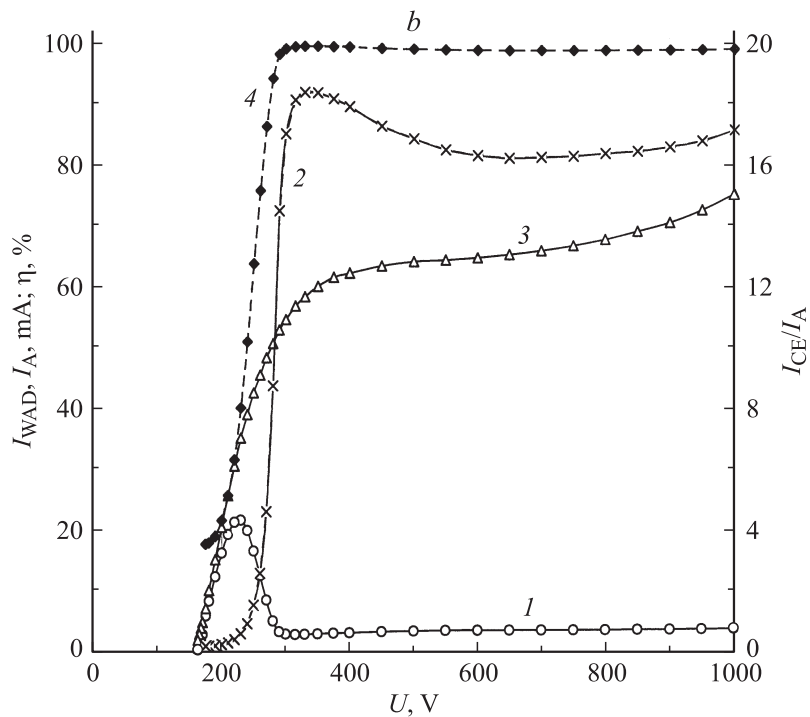
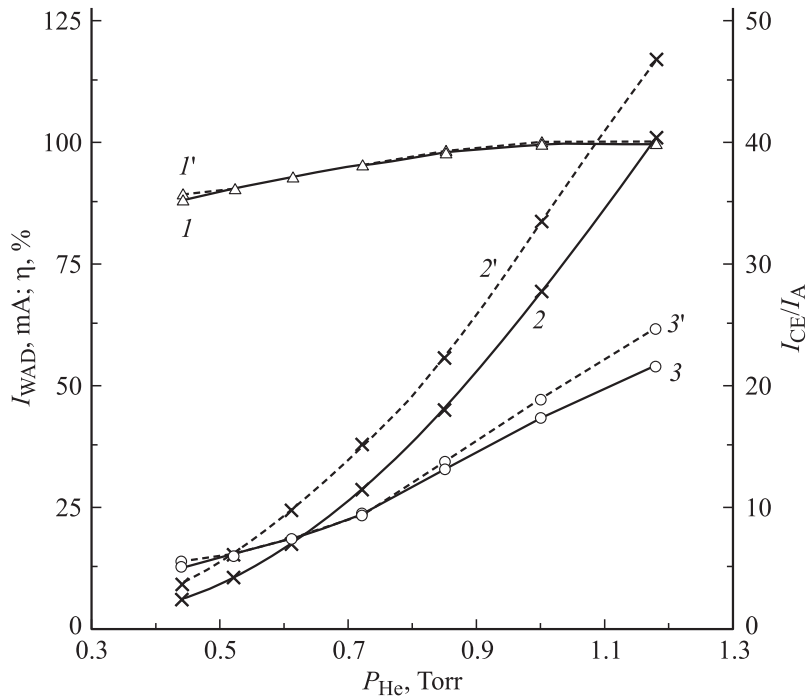


Рис. 1 (продолжение).

В диапазоне 350...1000 V рост тока сильно отстает от роста напряжения (рис. 1, табл. 2) и близок к линейному, как и в аналогичном разряде в неоне без анодной сетки [1]. В частности, при  $P_{\text{He}} = 1$  Тотт ток увеличивается всего на 25%, или в 18.6 раза медленнее, чем по формуле (2). Как и в [1], мы связываем эти особенности ВАХ с преимущественно фотоэлектронной природой WAD. Однако есть и существенные различия с работой [1], в которой  $j_{\text{WAD}} \gg j_{\text{AD}}$  во всем исследованном диапазоне  $U$ . Одной из причин этого различия может быть дрейф ионов в [1] к катоду, как и в обычном AD. В результате этого область рекомбинационного излучения, являющегося существенным поставщиком ВУФ-фотонов, более смещена к катоду, что увеличивает ток разряда. При  $U \leq 250$  V, когда ускоренные в катодном слое элек-



**Рис. 2.** Зависимости основных параметров разряда от давления гелия  $P_{He}$ : 1, 1' —  $\eta$ ; 2, 2' —  $I_{WAD}$ ; 3, 3' —  $I_{CE}/I_A$ ; 1, 2, 3 — при  $U = 600$  V, 1', 2', 3' — при  $U = 1000$  V,  $l_{AC} = 9$  см.

троны практически полностью тормозятся в пространстве катод–анод,  $j_{WAD} \gg j_{AD}$ , как и в [1]. Другая особенность ВАХ в WAD состоит в более резкой по сравнению с AD зависимости от давления, чем в AD,  $I_{WAD} \sim P_{He}^3$  (рис. 2).

С фотоэлектронной природой WAD связана и его вторая особенность — необычайно высокая эффективность генерации ЭП ( $\eta \approx 100\%$ ) при  $P_{He} = 1$  Torr. В диапазоне 350...1000 V при  $P_{He} = 1$  Torr отношение  $I_{CE}/I_A$ , характеризующее  $\eta$ , согласно соотношению (1), без учета прозрачности сетки, превышает 16. В AD это отношение даже при  $U = 3$  kV находится на уровне 2, исходя из измерений  $\eta$  [1], а при  $U = 1$  kV его предельная величина не превышает 1 [15]. Эти

**Таблица 1.** Плотности тока в AD, WAD и их отношение в AD и WAD при различных  $U$ 

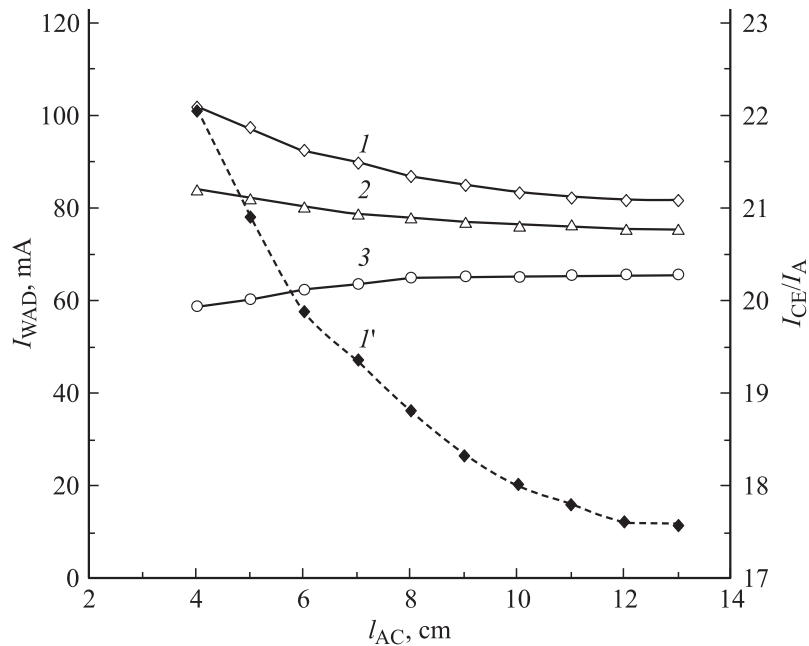
$U, V$	$j_{AD}, mA/cm^2$	$j_{WAD}, mA/cm^2$	$j_{WAD}/j_{AD}$
250	0.039	0.143	3.66
500	0.313	0.216	0.69
1000	2.5	0.253	0.1

**Таблица 2.** Отношение токов широкоапертурного разряда  $I_{WAD}^{U=1000V}/I_{WAD}^{U=350V}$  при  $U = 1000 V$  и  $U = 350 V$ 

$P_{He}, Torr$	0.6	0.67	0.75	0.85	1	1.2
$I_{WAD}^{U=1000V}/I_{WAD}^{U=350V}$	1.7	1.52	1.32	1.28	1.25	1.22

различия связаны с преобладанием эмиссии под действием тяжелых частиц в AD с малым  $d_C$ .

Третьей особенностью, свидетельствующей о фотоэлектронной природе WAD и отличающей его от AD, являются немонотонная зависимость  $\eta$  от  $U$  и рост при увеличении  $P_{He}$ . Первый пик  $\eta$  находится в области 350 V. При этом  $U$ , с одной стороны, количество ВУФ-фотонов, генерируемых при торможении одного электрона, достаточно для эмиссии дополнительного электрона. С другой стороны, это торможение происходит в приближенной к катоду области, что увеличивает геометрический перехват фотонов катодом и ослабляет влияние реабсорбции. При  $U > 350 V$  пробег электронов увеличивается, что ослабляет эффективность ВУФ-подсветки катода; соответственно снижаются соотношение  $I_{CE}/I_A$  и  $\eta$ . При  $U \approx 500 \dots 700 V$ , в зависимости от  $P_{He}$ , начинается новый рост  $\eta$ , который мы связываем с увеличением ВУФ-подсветки за счет отраженных от коллектора электронов. В частности, с этим связаны наблюдающиеся при  $U = 1000 V$  увеличение  $I_{WAD}$  и  $\eta$  при уменьшении расстояния  $l_{AC}$ , показанное на рис. 3. Для  $U = 600 V$   $I_{WAD}$  в меньшей степени зависит от  $l_{AC}$ , а для  $U = 400 V$  при малых  $l_{AC}$ , наоборот, ток заметно меньше, чем при больших. Перечисленные особенности связаны с балансом энергии, вкладываемой в дрейфовое пространство и в фотоподсветку от прямого и отраженного от



**Рис. 3.** Зависимость тока разряда  $I_{WAD}$  (1, 2, 3) и отношения  $I_{CE}/I_A$  ( $I'$ ) от расстояния между анодом и коллектором  $l_{AC}$  при различных напряжениях  $U$ :  $P_{He} = 1$  Torr; 1,  $I'$  —  $U = 1000$  V; 2 —  $U = 600$  V; 3 —  $U = 400$  V.

коллектора электронного пучка. Определенный вклад в рост  $I_{WAD}$  при  $U > 500$  V дает также возбуждение гелия быстрыми тяжелыми частицами в прикатодной области [2].

Напрямую связан с фотоэлектронной природой WAD рост  $\eta$  при увеличении  $P_{He}$  (рис. 1, 2). Это увеличение, как и более резкая зависимость  $I_{WAD} \sim P_{He}^3$ , объясняется ростом тормозной способности гелия, приближающей области подсветки к катоду. Наименьшая величина  $\eta$ , полученная в наших экспериментах при  $U = 1000$  V, составила 85% при  $P_{He} = 0.3$  Torr. Отметим, что в разряде в гелии с  $d_C = 10$  см в [16], при еще более низких давлениях (15... 60 м · Torr) и  $U = 4$  kV, когда роль фотоэмиссии относительно мала [2],  $\eta \sim 50\%$ .

В итоге в результате проведенных исследований показано, что благодаря фотоэмиссионной природе широкоапертурного разряда в гелии достигается практически 100% эффективность генерации ЭП при пониженных  $U < 1$  kV. Это открывает новые возможности его применения. По многим своим характеристикам WAD принципиально отличается от обычного AD, что стимулирует дальнейшие исследования физики тлеющих разрядов.

## Список литературы

- [1] Бохан А.П., Бохан П.А., Закревский Дм.Э. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 20. С. 81–87.
- [2] Бохан П.А., Закревский Дм.Э. // ЖТФ. 2007. Т. 77. В. 1. С. 109–116.
- [3] Rocca J.J., Meyer J.D., Farrell M.R., Collins G.J. // J. Appl. Phys. 1984. V. 56. N 3. P. 790–797.
- [4] Kovalev A.S., Mankelevich Yu.A., Muratov E.A. et al. // J. Vac. Sci. Technol. 1992. V. 10. N 4. P. 1086–1091.
- [5] Муратов У.А., Рахимов А.Т., Суетин Н.В. // ЖТФ. 2004. Т. 74. В. 5. С. 121–124.
- [6] Иванов И.Г., Латуш Е.Л., Сэм М.Ф. Ионные лазеры на парах металлов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 255 с.
- [7] Little C.E. Metal Vapour Lasers. Physics, Engineering and Applications. Chichester: John Wiley & Sons, 1999. 620 p.
- [8] Бронштейн И.М., Фрайман Б.С. Вторичная электронная эмиссия. М.: Наука, 1969. 407 с.
- [9] Бохан П.А., Закревский Дм.Э. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 9. С. 853–863.
- [10] Engel A. Ionized gases. Clarendon: Oxford, 1955. 332 p.
- [11] Грановский В.Л. Электрический ток в газе. М.: Наука, 1971. 543 с.
- [12] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 591 с.
- [13] Phelps A.V. // Plasma Sources Sci. Technol. 2001. V. 10. N 2. P. 329–343.
- [14] Клименко К.А., Королев Ю.Д. // ЖТФ. 1990. Т. 60. В. 9. С. 138–142.
- [15] Сорокин А.Р. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 4. С. 89–94.
- [16] Hartmann P., Matsuo H., Ohtsuka Y., Fukao M., Kando M., Donko Z. // Jpn. J. Appl. Phys. V. 42. P 1. N 6A. P. 3633–3640.