

03;04;07;10;12

О влиянии поперечного магнитного поля на генерацию электронного пучка в газовом диоде

© Е.Х. Бакшт, А.Г. Бураченко, М.В. Ерофеев, И.Д. Костыря, М.И. Ломаев, Д.В. Рыбка, В.Ф. Тарасенко

Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055 Томск, Россия
e-mail: vft@loi.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 18 октября 2007 г.)

Экспериментально исследовано влияние поперечного магнитного поля (0.08 и 0.016 Т) на генерацию электронного пучка в газовом диоде. Показано, что при напряжении на газовом диоде $U = 25$ кВ и малых давлениях гелия (45 Торг) поперечное магнитное поле влияет на амплитуду тока пучка за фольгой и его распределение по сечению фольги. Показано, что при повышенных давлениях и формировании сверхкороткого лавинного электронного пучка (СЛЭП) в гелии, азоте и воздухе поперечное магнитное поле (0.016 и 0.08 Т) не оказывает существенного влияния на амплитуду и длительность СЛЭП за фольгой. Установлено, что при напряжении генератора в сотни киловольт часть убегающих электронов попадает на боковые стенки газового диода, в том числе из плазмы разряда у катода.

PACS: 52.80.Tn, 85.45.-w

В последние годы исследованиям генерации электронных пучков и рентгеновского излучения в газовых диодах при атмосферном давлении различных газов стали уделять большое внимание [1–12]. Однако в связи с малой длительностью сверхкороткого лавинного электронного пучка (СЛЭП) при напряжениях генератора в сотни киловольт не более 100 пс [2] и с трудностями при его получении и регистрации результаты по параметрам электронного пучка, полученные различными научными группами при атмосферном давлении воздуха и других газов, существенно отличаются. Это в первую очередь связано с отсутствием у исследователей измерительной аппаратуры с нужным временным, амплитудным и пространственным разрешением. Как следствие, нет единой точки зрения относительно механизма формирования пучка убегающих электронов в газовых диодах [1–13]. Поэтому получение новых данных, например о влиянии поперечного магнитного поля на генерацию электронного пучка в газовых диодах, является весьма актуальным.

Цель данной работы — исследовать влияние поперечного магнитного поля на генерацию пучка убегающих электронов при различных напряжениях на газовом диоде.

Эксперименты были проведены с использованием трех генераторов РАДАН и трех газовых диодов, подобных используемым в [1,2,8,10,11]. Генератор № 1 (РАДАН-220) [14] имел волновое сопротивление 20Ω и формировал импульсы напряжения с амплитудой холостого хода ~ 250 кВ (в большинстве экспериментов), длительностью на полувывоте при согласованной нагрузке ~ 2 нс и длительностью фронта импульса напряжения ~ 0.5 нс. Генератор № 2 (РАДАН-150) [14] формировал импульсы напряжения с амплитудой холостого хода ~ 150 кВ, длительностью на полувывоте ~ 1.5 нс при согласованной нагрузке и длительностью фронта импульса напряжения ~ 0.5 нс. Кабельный генератор № 3 [10] имел волновое сопротивление 50Ω

и формировал прямоугольные импульсы напряжения с амплитудой холостого хода ~ 25 кВ, длительностью на полувывоте ~ 90 нс и длительностью фронта импульса напряжения ~ 5 нс. Газовые диоды состояли из цилиндрического корпуса с боковыми окнами и электродами внутри корпуса. Катод, выполненный из стальной или титановой трубки диаметром 5–6 мм с толщиной стенки 50–100 мкм, помещался на оси газового диода. Плоский анод был образован AlBe-фольгой толщиной ~ 45 мкм либо сетками с прозрачностью по свету ~ 14 или 64%. Также использовалась фольга из алюминия толщиной 3, 10 или 0.2 мкм, последняя для увеличения механической прочности была напылена на пленку из кимфоля ($C_{16}H_{14}O_3$) толщиной 2 мкм. Расстояние между катодом и анодом обычно составляло 12 мм. Газовые диоды заполнялись воздухом, азотом или гелием. Давление газа могло изменяться от 1 Торг до ~ 1 атм. Постоянное магнитное поле в газовом диоде создавалось двумя самарий-кобальтовыми магнитами. Средняя индукция магнитного поля на оси газового диода составляла 0.016, 0.08 и 0.016 Т соответственно в экспериментах с генераторами № 1, 2 и 3. Ось магнитов и ось газового диода были перпендикулярны. Измерение магнитного поля проводилось с помощью измерителя магнитной индукции Ш1-8.

Импульсы напряжения регистрировались емкостным делителем, а импульсы тока пучка коллекторами с временным разрешением ~ 0.1 (коллектор № 1) и ~ 0.05 нс (коллектор № 2). Для измерения сигналов с емкостного делителя и коллекторов использовался цифровой осциллограф TDS6604 (6 GHz, 20 GS/s).

Основные экспериментальные результаты следующие. При заполнении газовых диодов воздухом и азотом атмосферного давления и при использовании генераторов № 1 и 2 магнитное поле (0.016 и 0.08 Т соответственно) не влияло на амплитуду и длительность тока пучка за AlBe-фольгой. Максимальная амплитуда тока пучка

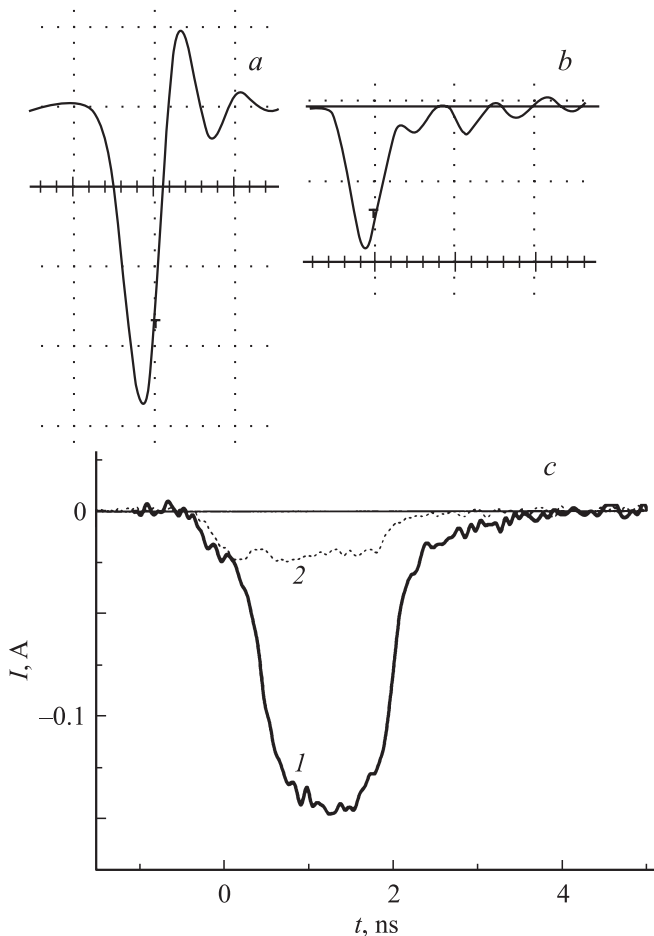


Рис. 1. Осциллограммы импульсов тока электронного пучка с генератором № 1 (*a*) и 3 (*b, c*). *a* — давление воздуха в промежутке 1 atm, AlBe-фольга толщиной 45 μm , масштаб по горизонтали 200 ps; *b* — давление гелия в промежутке 440 Torr, фольга из алюминия толщиной 3 μm , масштаб по горизонтали 500 ps; *c* — эксперимент без магнитного поля (1) и с магнитной индукцией в межэлектродном промежутке $B = 0.016 \text{ T}$ (2), давление гелия в промежутке 45 Torr.

(СЛЭП) за Al-фольгой толщиной 10 μm со всей площади фольги диаметром 5 cm составила $\sim 50 \text{ A}$. При этом использовались генератор № 1 с напряжением холостого хода $\sim 270 \text{ kV}$ и катод из нержавеющей стали. Длительность импульса тока пучка, регистрируемая коллектором № 2 с диаметром приемной части 3 mm, составила на полувысоте $\tau_{0.5} \sim 90 \text{ ps}$ (рис. 1, *a*). Отметим, что регистрируемая с малой площади фольги длительность импульса тока пучка ограничивалась временным разрешением осциллографа.

Было обнаружено, что при использовании генераторов № 1 и 2 электронный пучок генерируется не только в направлении фольги, а также в направлении боковой стенки газового диода, которая имела форму цилиндра с внутренним диаметром 50 и 36 mm соответственно. На рис. 2, *a* приведена фотография интегрального свечения разряда в газовом диоде без магнитного поля. Объемный разряд контактирует не только с катодными пятнами, но

и с боковой поверхностью катода. Наложение магнитного поля не оказывало заметного влияния на форму разряда. На рис. 2, *a* видно, что основное свечение разряда, в данном случае в азоте при давлении 1.2 atm, наблюдается между катодом и фольгой. Однако слабый разряд формируется во всем объеме газового диода. Съемки автографов ионизирующего излучения (на фотопленку РФ-3 в черном конверте) с помощью камеры-обскуры показали, что у катода регистрируется область с диаметром $\sim 1 \text{ cm}$, которая является источником убегающих электронов и мягкого рентгеновского излучения. Средняя энергия основной части электронов, генерируемых из этой области при напряжении генератора № 1 $\sim 230 \text{ kV}$, не превышала 70 keV и была значительно меньше средней энергии электронов в СЛЭП [2]. Размер этой области на обскурограмме ($\sim 1 \text{ cm}$) и отсутствие на ней отдельных ярких точек, которые видны у острой кромки катода на фотографиях (рис. 2, *a*), указывает на то, что плазма у катода является основным источником убегающих электронов, ответственных за предыонизацию разрядного промежутка.

При подаче напряжения на газовый диод от генератора № 3 и давлении гелия 300 Torr за анодом из

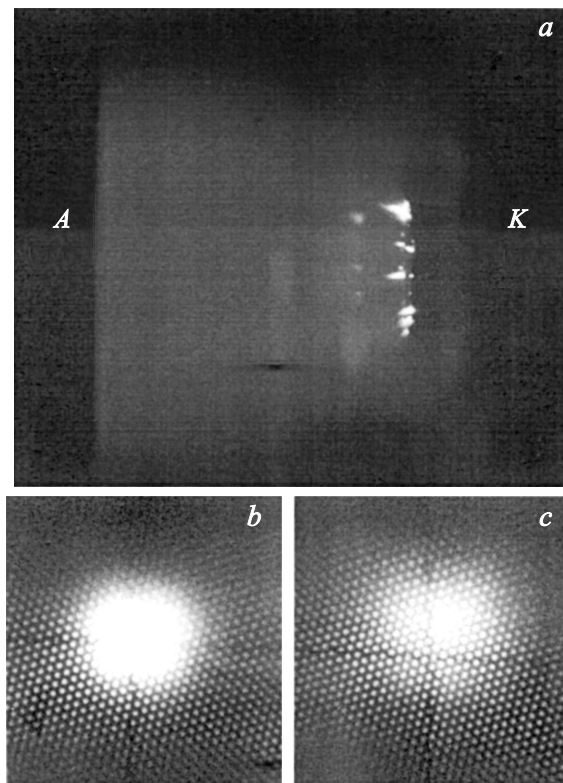


Рис. 2. Фотография свечения разряда в азоте при давлении 1.2 atm (*a*) и автографы электронного пучка, полученные на фотопленке за 200 импульсов, без магнитного поля (*b*) и с $B = 0.016 \text{ T}$ (*c*). *a* — генератор № 1, катод в виде трубки, зазор 12 mm, потенциальный электрод (катод) расположен справа; *b, c* — генератор № 3, давление гелия 45 Torr, катод в виде трубки, зазор 12 mm, перекрестия на фотографиях — тень от двух провололок, укрепленных на сетке, размер фотографий 16 \times 16 mm.

тонкой фольги регистрировался СЛЭП, и магнитное поле с индукцией 0.016 Т в разрядном промежутке не оказывало существенного влияния на его амплитуду. Дальнейшее уменьшение давления в камере приводило к изменению режима генерации электронного пучка. Так, при давлении гелия 45 Torr без магнитного поля длительность импульса тока пучка на полувысоте возрастала до 1.5 ns (рис. 1, *c*, кривая 1). Кроме того, при низком давлении гелия в центре автографа пучка электронов на фотопленке (рис. 2, *b*) появилась область с более сильной засветкой диаметром ~ 1 см. При повышенных давлениях и работе в режиме СЛЭП диаметр автографа на пленке увеличивался, и засветка пленки была более равномерной. Наложение магнитного поля на промежутки при давлении гелия 45 Torr привело к следующим изменениям. Средняя амплитуда тока пучка при выводе его через диафрагму диаметром 4 mm уменьшилась в 5.4 раза (с 0.14 до 0.026 А), а при выводе его через диафрагму диаметром 20 mm уменьшилась в 1.5 раза (с 0.37 до 0.24 А). Длительность импульса тока пучка на полувысоте увеличилась до ~ 2 ns (рис. 1, *c*). При этом на осциллограммах импульсов тока разряда и напряжения, а также на фотографиях разрядной плазмы явных изменений не наблюдалось. На рис. 2, *b, c* приведены автографы электронного пучка за сеткой с прозрачностью 14%, полученные на фотопленке без магнитного поля и при его наложении. При наложении магнитного поля произошло смещение и увеличение размера центральной части автографа. Отметим, что основной причиной почернения фотопленки (рис. 2, *b, c*) является электронный пучок. Для проверки этого между конвертом с фотопленкой и анодом помещалась Al-фольга толщиной 10 μm . Через такую фольгу электронный пучок при напряжении 25 kV не проходит, а рентгеновское излучение ослабляется незначительно. Эксперимент показал, что в присутствии Al-фольги двухсот импульсов для получения автографа недостаточно.

Были проведены оценочные расчеты отклонения пучка электронов различной энергии при движении их в поперечном магнитном поле и в продольном электрическом при различных давлениях гелия в газовом диоде. Для расчета траектории движения электронов использовалось уравнение движения электрона в скрещенных электрических и магнитных полях при наличии столкновений [15]

$$m_e \frac{dv_e}{dt} = e\mathbf{E} + ev_e \times \mathbf{B} - m_e v_e v_p,$$

где m_e — масса электрона, e — его заряд, v_e — скорость электрона, \mathbf{E} — вектор напряженности электрического поля, \mathbf{B} — вектор магнитной индукции, v_p — эффективная частота потери импульса. Расчеты показали, что при использовании генераторов № 1 и 2 влияние магнитного поля на траекторию электронов пучка, генерируемых у катода, незначительно. При параметрах генератора № 3 в магнитном поле электроны пучка, генерируемые у катода, заметно отклоняются от траектории, нормальной

к плоскости анода. Эти данные и результаты экспериментов указывают, что быстрые электроны при низких давлениях генерируются у катода, а затем при движении в промежутке магнитное поле изменяет их траекторию.

С повышением давления в газовом диоде механизм генерации пучка электронов изменяется [1]. Согласно этому механизму, объемный разряд и волна ионизации формируются благодаря быстрым электронам, которые генерируются у катода за счет усиления электрического поля, а основной вклад в амплитуду тока пучка за фольгой дают электроны, ускоренные между анодом и границей плотной плазмы. При этом наблюдается сокращение длительности тока пучка (до ~ 200 ps с генератором № 3 и до ~ 100 ps — с генераторами № 1, 2). В этих условиях (генерация СЛЭП) мы не зарегистрировали изменение амплитуды СЛЭП в экспериментах с магнитным полем. Весьма важно то, что при малом напряжении на промежутке (25 kV) длительность импульса СЛЭП на полувысоте увеличилась до ~ 200 ps (см. рис. 1, *a, b*). Причем используемая система регистрации имела достаточное разрешение для определения длительности импульса тока пучка при его длительности на полувысоте > 120 ps.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что поперечное магнитное поле (0.016 Т) влияет на формирование наносекундного пучка электронов при малых напряжениях генератора (25 kV) и малых (45 Torr) давлениях гелия в промежутке, что связано с генерацией электронов пучка в этих условиях в прикатодной области и дальнейшим ускорением электронов в промежутке. При увеличении давления в газовом диоде параметры электронного пучка изменяются, что можно связать с изменением механизма его генерации. Установлено, что при повышенных давлениях магнитное поле (0.016 Т при напряжении генератора № 3 $U = 25$ и 0.08 Т — при $U \sim 150$ kV генератора № 2) не влияло на амплитуду и длительность СЛЭП.

Список литературы

- [1] Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И. // УФН. 2004. Т. 174. № 9. С. 953–971.
- [2] Tarasenko V.F., Shpak V.G., Shunailov S.A., Kostyrya I.D. // Laser and Particle Beams. 2005. Vol. 23. N 4. P. 545–551.
- [3] Месяц Г.А., Коровин С.Д., Шарыпов К.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 1. С. 35–44.
- [4] Krompholz H.G., Hatfield L.L., Neuber A.A., Kohl K.P., Chaparro J.E., Ryu H.-Y. // IEEE Trans. of Plasma Sci. 2006. Vol. 34. N 3. P. 927–936.
- [5] Maltsev A.N. // IEEE Trans. of Plasma Sci. 2006. Vol. 34. N 4. P. 1166–1174.
- [6] Бохан П.А., Закревский Д.Э. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 9. С. 853–863.
- [7] Месяц Г.А. // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 85. Вып. 2. С. 119–122.
- [8] Бакирт Е.Х., Рыбка Д.В., Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 5. С. 71–78.

- [9] *Сорокин А.П.* // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 9. С. 70–78.
- [10] *Бакшт Е.Х., Рыбка Д.В., Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф.* // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 9. С. 29–36.
- [11] *Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф.* // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 10. С. 41–48.
- [12] *Лисенков В.В., Осипов В.В.* // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 11. С. 49–54.
- [13] *Бабич Л.П., Лойко Т.В., Цукерман В.А.* // УФН. 1990. Т. 160. № 7. С. 49–82.
- [14] *Яландин М.И., Шпак В.Г.* // ПТЭ. 2001. № 3. С. 5–31.
- [15] *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.