

03;04;10

О влиянии давления гелия на амплитуду и длительность тока пучка электронов в газовом диоде

© Е.Х. Бакшт, М.И. Ломаев, Д.В. Рыбка, Д.А. Сорокин, В.Ф. Тарасенко

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

(Поступило в Редакцию 5 декабря 2007 г.)

Исследованы параметры электронного пучка, генерируемого в гелии при давлении $p = 10^{-4} - 12$ atm. На промежуток с трубчатым катодом и плоским анодом подавались импульсы высокого напряжения наносекундной длительности. За анодом из AlBe-фольги толщиной $45 \mu\text{m}$ получен электронный пучок при давлении гелия до 12 atm. Зарегистрированы три максимума на кривой зависимости амплитуды тока пучка от давления гелия при $p \sim 0.01$, ~ 0.07 и ~ 3 atm. Приведены фотографии свечения под действием электронного пучка люминесцентной пленки, установленной за фольгой, и свечения разряда при различных значениях давления гелия в газовом диоде.

PACS: 52.80.Tn

Введение

Формирование пучка электронов с длительностью импульса на полувысоте ~ 1 ns и менее в газонаполненном диоде исследовалось в работах [1–7]. В работе [1] электронный пучок за фольгой был впервые получен при давлении гелия 1 atm, но амплитуда тока пучка не приводилась. При давлении гелия $p = 22$ Torr (~ 0.03 atm) в [1] было зафиксировано максимальное число электронов ($\sim 10^{12}$), выводимых за фольгу.

В [2–4] амплитуда тока пучка за фольгой в газовых диодах при атмосферном давлении различных газов была увеличена более чем на порядок. Электронный пучок субнаносекундной длительности был получен при увеличении давления гелия до 6 atm [4]. С высоким временным разрешением (до 0.1 ns) в [5] была измерена длительность импульса тока пучка на полувысоте, которая составила ~ 0.1 ns. Кроме того, в работе [5] было установлено, что при переходе от условий формирования в гелии сверхкороткого лавинного электронного пучка (СЛЭП) к условиям формирования электронного пучка в вакуумном диоде плотность тока пучка на оси диода уменьшается, а длительность импульса тока пучка и длительность его переднего фронта возрастают. В работах [6,7] при использовании генератора с напряжением 25 kV импульсы СЛЭП были получены при давлении гелия 0.2–1 atm с длительностью на полувысоте ~ 0.2 ns, а при меньших давлениях были зарегистрированы импульсы тока пучка, состоящие из двух пиков различной длительности. Однако в литературе нет данных о генерации тока пучка в газовом диоде при давлении гелия более 6 atm, а также очень мало данных о параметрах электронного пучка при переходе от режима вакуумного диода к режиму газового диода в условиях наносекундной длительности импульса высокого напряжения на промежутке.

Цель настоящей работы — экспериментально исследовать влияние давления гелия на параметры электронного пучка в широком диапазоне значений давления, в том числе при давлении гелия более 6 atm, а также при переходе от режима вакуумного диода к режиму сверхкороткого лавинного электронного пучка. Измерения тока пучка были проведены с разрешением во времени до 100 ps, что позволило получить важную информацию об изменении формы и длительности импульса тока пучка, генерируемого в газовом диоде. Кроме того, было проведено фотографирование излучения плазмы в газовом диоде и автографов электронного пучка на люминесцентной пленке.

1. Экспериментальная аппаратура и методики

Эксперименты проводились с использованием двух газовых диодов, конструкция которых приведена в работах [8,9]. Газовые диоды имели одинаковые размеры (внутренний диаметр металлического корпуса 50 mm), но значения индуктивности подводов от генератора наносекундных импульсов к газовым диодам отличались. В газовом диоде № 1 генератор был подключен к газовому диоду с минимальной индуктивностью (см. рис. 1 в [8]), и с ним можно было проводить эксперименты при давлении гелия до 12 atm. В газовом диоде № 2 рабочее давление не превышало 1.5 atm, и генератор имел большую индуктивность подвода к газовому диоду (см. рис. 2 в [9]). Последнее обстоятельство привело к увеличению длительности переднего фронта импульса напряжения до ~ 1 ns. Катодом в обоих диодах служила трубка диаметром ~ 6 mm из стальной фольги толщиной $100 \mu\text{m}$. Вывод электронного пучка осуществлялся через AlBe-фольгу толщиной $45 \mu\text{m}$. За AlBe-фольгой в ряде экспериментов устанавливались

фильтры из алюминия толщиной $h = 60, 120$ и $220 \mu\text{m}$. Расстояние между анодом и катодом d равнялось $12\text{--}16 \text{ mm}$. В качестве источника импульсного напряжения использовался генератор РАДАН-220 [10], формирующий импульсы напряжения с амплитудой $\sim 250 \text{ kV}$, длительностью на полувывоте $\sim 2 \text{ ns}$ и временем нарастания $\sim 0.5 \text{ ns}$ (в газовом диоде № 1). Ток пучка электронов измерялся с помощью коллектора (см. рис. 1 в [8]). Коллектор состоял из металлического конуса, образующего с корпусом линию с волновым сопротивлением 50Ω . Основание конуса, обращенное к фольге, имело диаметр 20 mm . При амплитуде регистрируемого тока более 40 A после фольги помещались одна или несколько металлических сеток с прозрачностью 14 или 64% . Для регистрации сигналов с коллектора использовался цифровой осциллограф TDS6604 (6 GHz , 20 GS/s). Временное разрешение системы регистрации составляло $\sim 0.1 \text{ ns}$.

Фотографирование разряда со стороны анода при различных значениях давления гелия в газовом диоде осуществлялось цифровым фотоаппаратом Olympus Camedia C-2020 Z. При фотографировании фольга заменялась металлической сеткой с прозрачностью 64% . Кроме того, фотографировалось свечение (под действием электронного пучка) специальной люминесцентной пленки, которая устанавливалась за AlBe-фольгой и плотно прилегала к ее поверхности. Газовый диод откачивался форвакуумным насосом. Перед началом работы газовый диод несколько раз заполнялся гелием до давления 1 atm и откачивался. Использовался гелий высокой чистоты.

2. Результаты измерений

На рис. 1 приведены зависимости амплитуды тока пучка от давления гелия в газовом диоде. Видны три максимума на кривой зависимости тока пучка от давления гелия (при $p \sim 0.01, \sim 0.07$ и $\sim 3 \text{ atm}$). В диапазоне давлений $0.6\text{--}1 \text{ atm}$ амплитуда тока пучка изменялась незначительно и составляла $4\text{--}5 \text{ A}$ для обоих газовых диодов. Отметим, что в данных экспериментах на коллектор диаметром 2 cm , который располагался на расстоянии 5 mm от фольги диаметром 50 mm , попадала только центральная часть тока пучка. На рис. 1, *a* также приведена зависимость длительности переднего фронта тока пучка от давления гелия, а на рис. 2 — характерные осциллограммы импульсов тока пучка в различных режимах.

При малых остаточных давлениях в газовом диоде (0.0001 atm) реализуется режим, соответствующий вакуумному диоду, при котором длительность импульса тока пучка за фольгой составляет $\sim 20 \text{ ns}$ (рис. 2, осциллограмма 1). На осциллограмме хорошо видны три пика с общей длительностью $\sim 8 \text{ ns}$, которые связаны с отражениями волны напряжения в газовом диоде и генераторе [5,11].

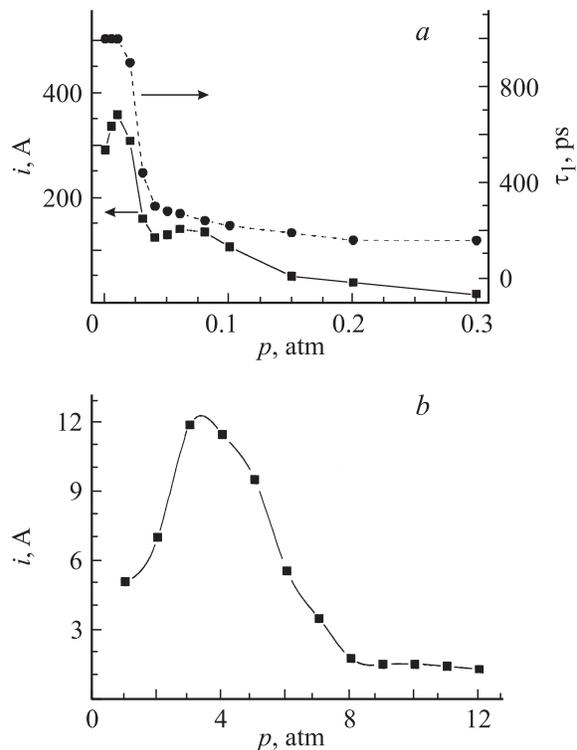


Рис. 1. Зависимости амплитуды импульса тока пучка i за AlBe-фольгой и длительности его переднего фронта τ_1 от давления гелия. *a* — газовый диод № 2, *b* — № 1.

Фотографии свечения плазмы в диоде и люминесценции пленки, помещенной за фольгой при давлении в газовом диоде менее 0.0001 atm (форвакуум), приведены на рис. 3, *c, d*. На рис. 3, *a, b* также показаны фотографии газового диода через анодную сетку (*a*) и люминесцентной пленки, установленной после AlBe-фольги (*b*). При откачке диода до форвакуума на катоде хорошо видно яркое пятно, которое появилось вследствие взрывной электронной эмиссии [12]. Распределение излучения под действием электронного пучка по поверхности люминесцентной пленки в этих условиях является сравнительно равномерным.

При увеличении давления гелия максимальная амплитуда тока пучка возросла на 25% . Однако длительность импульса тока пучка по основанию при давлении 0.005 atm сократилась до $\sim 5 \text{ ns}$. Остались лишь два первых пика (рис. 2, осциллограмма 2). При давлении гелия $\sim 0.01 \text{ atm}$ длительность импульса сократилась до $\sim 1.5\text{--}2.5 \text{ ns}$ и остался только первый пик или его часть (осциллограмма 6 на рис. 2). Длительность переднего фронта импульса при этом не изменилась. Сокращение длительности импульса тока пучка обусловлено замыканием промежутка разрядной плазмой.

Фотографии свечения плазмы в диоде и люминесценции пленки, помещенной за фольгой при давлении в газовом диоде 0.01 atm , приведены на рис. 4, *a, b*. В этом режиме яркие пятна на катоде отсутствуют. Свечение

плазмы разряда является наиболее интенсивным около внешней поверхности трубчатого катода. Также регистрируется более слабое свечение по всему промежутку

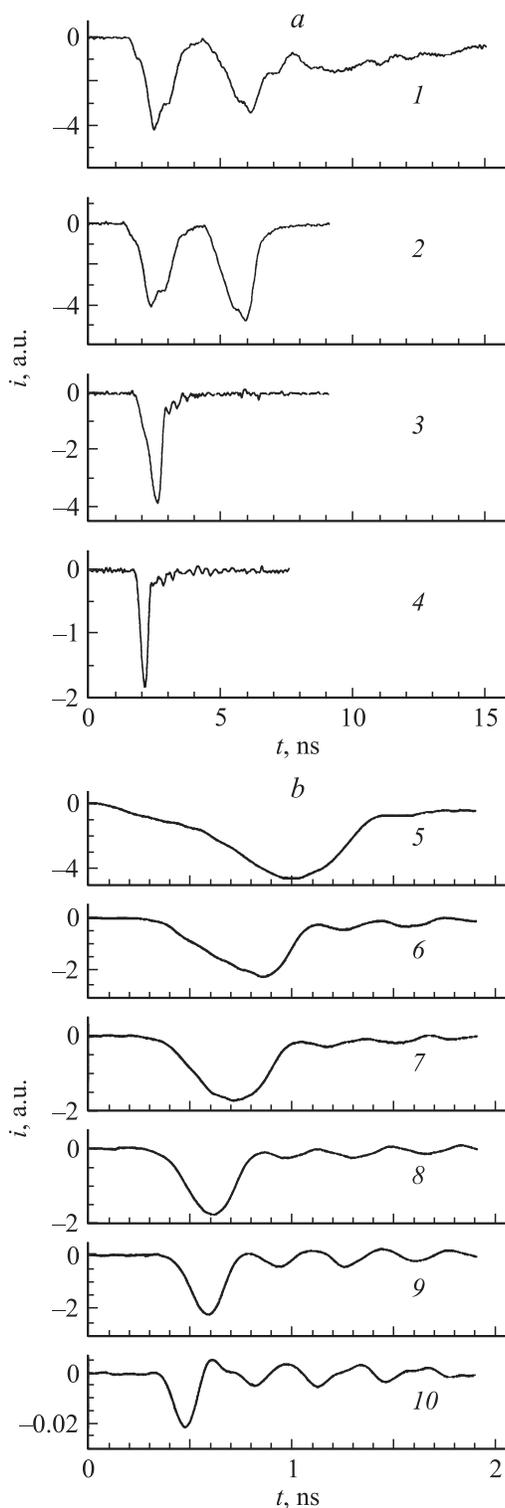


Рис. 2. Осциллограммы импульсов тока пучка за AlBe-фольгой при различных давлениях гелия в газовых диодах: № 1 (10) и № 2 (1–9). *a* — $p = 0.0001$ (1), 0.005 (2), 0.02 (3) и 0.035 atm (4). *b* — $p = 0.015$ (5), 0.025 (6), 0.03 (7), 0.04 (8), 0.07 (9) и 11 atm (10).

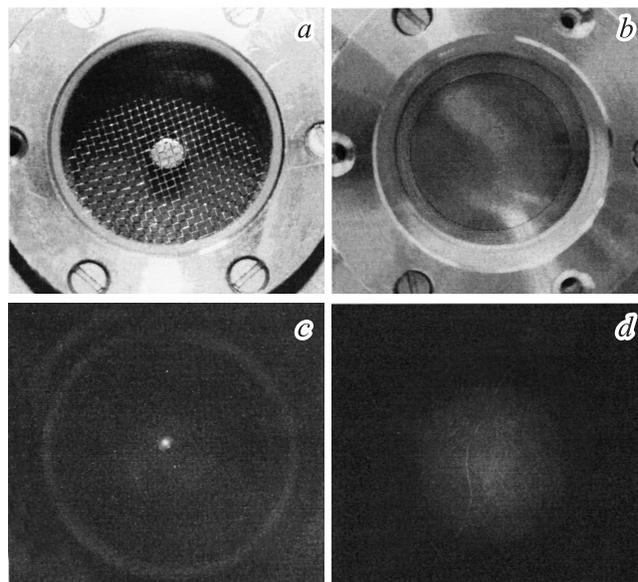


Рис. 3. Фотографии газового диода: с анодной сеткой диаметром 50 mm (*a*), с анодом из AlBe-фольги (*b*); свечение плазмы при форвакууме в газовом диоде (*c*) и свечение люминесцентной пленки (*d*).

ку. Визуально свечение имело красноватый оттенок, характерный для излучения молекулярного гелия. На автографе пучка видны центральное пятно и боковые лучи.

Особенностью временного поведения импульса тока пучка при давлении 10^{-4} –0.02 atm является наличие на большинстве осциллограмм перегиба на его переднем фронте, который исчезает при более высоком давлении. Было обнаружено, что при увеличении давления гелия от 0.02 до 0.03 atm происходит двукратное уменьшение амплитуды тока пучка и его длительности. При этом часть импульса до перегиба на фронте осциллограммы тока сохраняется, а вторая половина импульса пропадает, и длительность заднего фронта импульса становится меньше, чем переднего. Это уменьшение длительности импульса тока пучка также связано с замыканием промежутка разрядной плазмой. Известно, что скорость волны ионизации, которая стартует с катода и замыкает промежуток, при разряде в гелии увеличивается с ростом давления до ~ 0.1 atm [13]. Отметим, что в ряде случаев регистрировались импульсы тока пучка без характерного перегиба на переднем фронте с максимальной амплитудой и длительностью, примерно равной длительности импульса тока до перегиба на его фронте. Условия генерации таких импульсов тока пучка из-за их редкого появления в данной работе не исследовались.

При увеличении давления (> 0.03 atm) наблюдается дальнейшее изменение формы импульса тока пучка. Длительность переднего, а также заднего фронтов уменьшаются и становятся примерно одинаковыми. На графике зависимости амплитуды тока от дав-

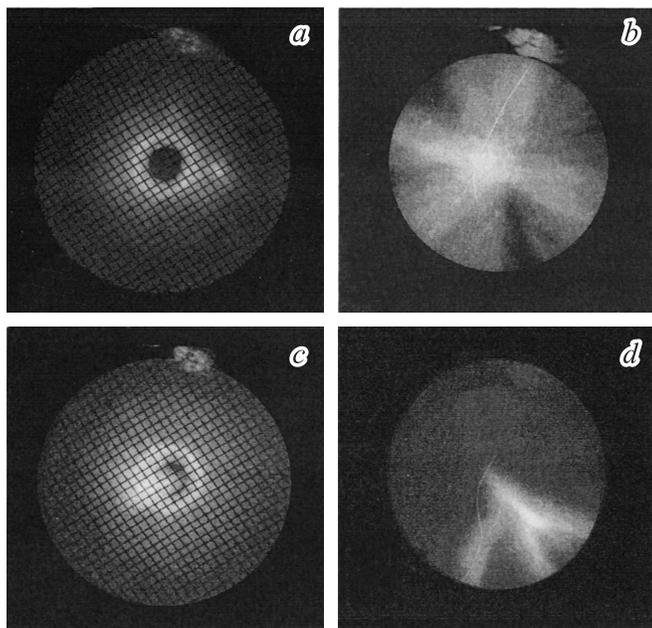


Рис. 4. Фотографии свечения плазмы в газовом диоде (*a, c*) и свечения люминесцентной пленки (*b, d*). Давление гелия в газовом диоде 0.01 (*a, b*) и 0.075 atm (*c, d*). $d = 12$ mm, газовый диод № 1.

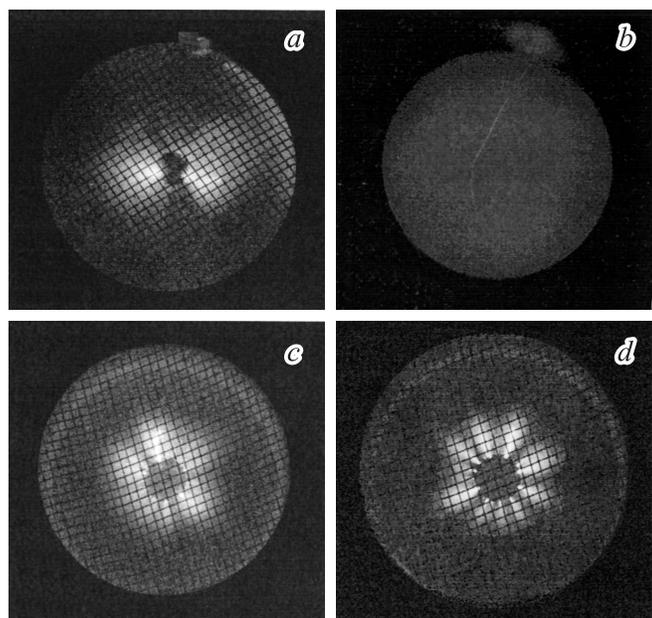


Рис. 5. Фотографии свечения плазмы в газовом диоде (*a, c, d*) и свечения люминесцентной пленки (*b*). Давление гелия в газовом диоде 0.9 (*a, b*), 6 (*c*) и 12 atm (*d*). $d = 12$ mm, газовый диод № 1.

ления (рис. 1, *a*) наблюдается второй максимум при $p \sim 0.07$ atm. Фотографии свечения плазмы в диоде и люминесценции пленки, помещенной за фольгой при давлении в газовом диоде 0.075 atm, приведены на

рис. 4, *c, d*. В данном режиме на фотографии свечения разряда (рис. 4, *c*) в одном месте катода видно более яркое диффузное пятно, а при взгляде сбоку виден диффузный канал, замыкающий промежуток, и яркое пятно на катоде. Вид автографа пучка на люминесцентной пленке при этом также изменился (рис. 4, *d*) по сравнению с приведенным на рис. 4, *b*. Видно яркое светящееся пятно, положение которого, как и положение диффузного пятна на катоде, от импульса к импульсу изменяется. Кроме того, на автографе пучка видны боковые лучи, интенсивность свечения которых существенно меньше интенсивности яркого пятна. Длительность импульса тока пучка при $p > 0.2$ atm приближалась к ~ 0.1 ns на полувывоте, что соответствует предельному разрешению системы регистрации. Можно предположить, что при данной длительности импульса тока пучка критическое поле [14], необходимое для генерации убегающих электронов, преимущественно достигается между фронтом плазмы,двигающимся от катода, и анодом. При дальнейшем увеличении давления интенсивность диффузного свечения в промежутке уменьшалась, а излучение катодных пятен становилось более выраженным. Фотографии свечения плазмы в диоде и свечения люминесцентной пленки, помещенной за фольгой, при давлении в газовом диоде 0.9 atm приведены на рис. 5, *a, b*. На катоде видны яркие пятна, с которых начинаются две яркие диффузные струи (рис. 5, *a*). Изучение люминесцентной пленки под действием электронного пучка в этом режиме сравнительно однородно (рис. 5, *b*).

Как указывалось выше, третий максимум амплитуды тока пучка регистрировался при давлении гелия более 1 atm (рис. 1, *b*). Увеличение амплитуды тока пучка при $p > 1$ atm наблюдалось как при длине разрядного промежутка $d = 12$ mm, так и при $d = 16$ mm. Фотографии свечения разряда при повышенных давлениях приведены на рис. 5, *c*. С ростом давления до 4–6 atm наблюдалось увеличение числа ярких пятен на катоде. Амплитуда тока пучка при этом возрастала до давления 3–4 atm, а затем уменьшалась. Изучение люминесцентной пленки при повышенных давлениях оставалось сравнительно равномерным, без ярко выраженных пятен.

На рис. 6 приведены зависимости амплитуды тока пучка электронов от толщины анода. Отметим, что влияние на амплитуду тока пучка электронов фольги из алюминия $30 \mu\text{m}$ и фольги из AlBe толщиной $45 \mu\text{m}$ примерно одинаково. Установка фильтров из алюминия после AlBe-фольги показала, что амплитуда тока пучка уменьшается в два раза и более при толщине фильтра $60 \mu\text{m}$. Из этого эксперимента следует, что значительная часть электронов имеет энергию меньше 100 keV. Регистрация электронов за AlBe-фольгой и фильтром толщиной $220 \mu\text{m}$ показывает, что некоторая часть электронов имеет энергию более 200 keV. Однако доля этих электронов в пучке менее 10%.

В экспериментах с толстыми фильтрами была зарегистрирована интересная особенность при регистрации импульса тока пучка электронов. Оказалось, что

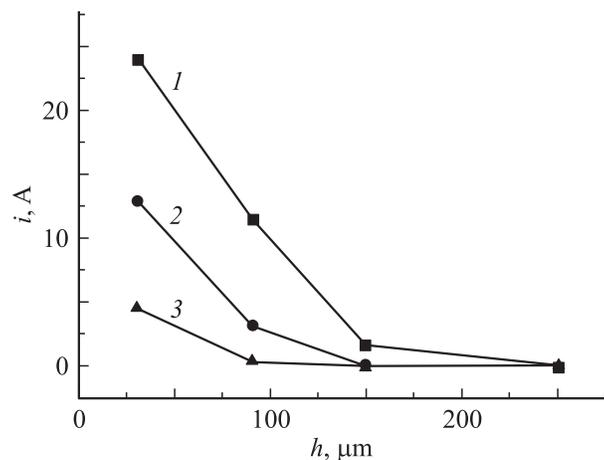


Рис. 6. Зависимости амплитуды импульса тока пучка от толщины h фильтров из алюминия при давлении гелия 0.2 (1), 0.3 (2) и 0.6 атм (3). $d = 12$ мм, газовый диод № 2.

длительность импульса сигнала с токового коллектора при суммарной толщине фольги ~ 250 мкм при давлении 0.6 атм составляет на полувысоте ~ 800 ps. За тонкой фольгой вклад электронов, которые регистрировались за фольгой толщиной ~ 250 мкм, в амплитуду тока пучка был мал, и длительность импульса тока пучка на полувысоте составляла ~ 100 ps. Как уже отмечалось, система регистрации позволяла фиксировать импульсы с длительностью на полувысоте до 100 ps.

3. Обсуждение результатов

Полученные результаты можно объяснить следующим образом. При подаче импульса напряжения на газовый диод электрическое поле усиливается на микро- и макронеоднородностях катода, что приводит на фронте импульса к достижению порога автоэлектронной эмиссии из катода. Автоэлектронная эмиссия ответственна за эмиссию первых электронов с катода при низких, средних и высоких давлениях гелия в газовом диоде. Однако переход автоэлектронной эмиссии во взрывную наблюдается не при всех давлениях. Так, при давлении гелия 0.01 атм (рис. 4, а) яркие пятна на катоде не регистрировались.

Усиленное у катода электрическое поле также приводит к генерации убегающих (быстрых) электронов, в том числе и при повышенном давлении гелия [15]. Эти электроны ионизируют газ в прикатодной области и создают начальные электроны, которые за счет таунсендовской ионизации в прилегающей к катоду области формируют плазму. В возрастающем электрическом поле электроны из плазмы дрейфуют на анод, и у катода образуется избыточный заряд положительных ионов, который дополнительно усиливает электрическое поле у катода. В результате ток эмиссии с катода увеличивается. Это приводит при небольших значениях

давления гелия к увеличению амплитуды тока пучка. Влияние добавок гелия на увеличение амплитуды тока пучка при наносекундных длительностях импульса напряжения проявляется при больших зазорах анод-катод, которые превышают оптимальные для вакуумного диода, установленного на генераторе РАДАН-220 [11]. В данных экспериментах $d = 12-16$ мм, что в несколько раз больше оптимального промежутка для вакуумного диода в подобных условиях (в [11] $d = 3$ мм). Однако образовавшаяся плазма играет и отрицательную роль. За счет более быстрого развития пробоя (замыкания плазмой промежутка) начиная с давления гелия ~ 0.005 атм сокращается длительность импульса. При увеличении давления ($p > 0.01$ атм) время до замыкания промежутка продолжает уменьшаться, что приводит к дальнейшему сокращению длительности тока пучка и уменьшению его амплитуды (рис. 2, осциллограммы 3–6). При малых давлениях гелия критическое поле [14], достаточное для генерации быстрых электронов, достигается для всего промежутка. Замыкание промежутка плазмой происходит при этом на заднем, а затем — при увеличении давления — и на переднем фронте импульса тока пучка. Импульс тока пучка при $0.01 < p < 0.05$ атм и значениях параметра E/p , больших критического, для всего промежутка или его большей части (E — электрическое поле, p — давление гелия) из-за пробоя промежутка не успевает достичь максимальной амплитуды. Однако его длительность превышает длительность СЛЭП.

При $p = 0.05-0.2$ атм длительность и форма импульса тока пучка трансформируются, принимая по мере повышения давления длительность и форму, характерную для СЛЭП, который генерируется между фронтом плотной плазмы и анодом [14]. Увеличение амплитуды тока пучка при давлении гелия более одной атмосферы (3-й максимум, рис. 1, б) можно объяснить увеличением напряжения на газовом диоде в момент генерации СЛЭП и замедлением скорости движения волны ионизации. Последнее обстоятельство в определенных условиях может приводить к увеличению длительности импульса СЛЭП на полувысоте.

Выводы

Таким образом, проведенные исследования показали, что при увеличении давления гелия от форвакуума до 0.03 атм происходит сокращение длительности импульса тока пучка и его заднего фронта за счет замыкания промежутка плазмой разряда. Показано, что при увеличении давления гелия от 0.03 до 0.08 атм изменяется форма импульса тока пучка и уменьшается его длительность за счет сокращения переднего и заднего фронтов импульса. За анодом из AlBe-фольги толщиной 45 мкм сверхкороткий лавинный электронный пучок получен при давлении гелия 12 атм. Амплитуда СЛЭП за фольгой, измеряемая коллектором с приемной частью 2 см, при давлении гелия $p = 3-4$ атм превышает 10 А. Для

электронов, проникающих за анод толщиной $\sim 250 \mu\text{m}$, при давлении гелия 0.6 atm длительность импульса на полувысоте составляет $\sim 800 \text{ ps}$.

Список литературы

- [1] Тарасова Л.В., Худякова Л.Н., Лойко Т.В., Цукерман В.А. // ЖТФ. 1974. Т. 44. Вып. 3. С. 564–568.
- [2] Алексеев С.Б., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 10. С. 29–35.
- [3] Алексеев С.Б., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф., Ткачев А.Н., Яковленко С.И. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 16. С. 45–53.
- [4] Алексеев С.Б., Губанов В.П., Орловский В.М., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф. // ДАН. 2004. Т. 398. № 5. С. 611–614.
- [5] Бакшт Е.Х., Рыбка Д.В., Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 21. С. 69–75.
- [6] Бакшт Е.Х., Рыбка Д.В., Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 9. С. 29–36.
- [7] Бакшт Е.Х., Рыбка Д.В., Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф. // Изв. вузов. Физика. 2007. Т. 50. № 5. С. 94–96.
- [8] Бакшт Е.Х., Рыбка Д.В., Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 5. С. 71–78.
- [9] Бакшт Е.Х., Рыбка Д.В., Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф. // Квант. электрон. 2006. Т. 36. № 6. С. 576–580.
- [10] Яландин М.И., Шпак В.Г. // ПТЭ. № 3. С. 5–31.
- [11] Нагорный Д.Ю., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В. // ПТЭ. 1990. № 3. С. 169–172.
- [12] Месяц Г.А. Эктонь в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. М.: Наука, 2000. 424 с.
- [13] Василяк Л.М., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Филигин И.В. // УФН. 1994. Т. 164. № 3. С. 263–286.
- [14] Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И. // УФН. 2004. Т. 174. № 9. С. 953–971.
- [15] Jiang W., Yatsui K., Orlovskii V.M., Tarasenko V.F. // Proc. Int. Conf. BEAMS–2004. Saint Petersburg, 2005. P. 174–177.