

УДК 537.52

СУБНАНОСЕКУНДНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ПУЧОК В НЕОНЕ И ГЕЛИИ ПРИ ПОВЫШЕННОМ ДАВЛЕНИИ

С. Б. Алексеев¹, В. М. Орловский¹, В. Ф. Тарасенко¹,
А. Н. Ткачев, С. И. Яковленко

Экспериментально и теоретически исследовано формирование субнаносекундного электронного пучка при повышенном давлении в неоне и гелии. Проанализированы два механизма, обеспечивающие эффект убегания электронов. В неоне при атмосферном давлении получен электронный пучок субнаносекундной длительности с плотностью тока $\sim 6 \text{ А/см}^2$. Показано, что при изменении давления неона от 150 до 760 Торр и гелия от 300 до 760 Торр условия формирования пучка электронов сохраняются. Проведены расчеты, моделирующие распространение волны размножения электронов от катода к аноду в рамках диффузионно-дрейфовой модели. Расчеты показывают, что оптимальные условия формирования электронного пучка имеют место, когда волна ионизации подходит к аноду.

В [1 – 7] было показано, что можно существенно увеличить амплитуду электронного пучка, сформированного в газовом диоде при атмосферном давлении молекулярных газов (воздух, азот) и гелия, а также смеси $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-He}$. Сильноточный электронный пучок был получен при средних по времени значениях параметра E/p (E – напряженность электрического поля, p – давление газа) как превышающих локальные критические значения для достижения эффекта “убегания электронов”, так и меньших критического значения параметра E/p . В [1, 3] было высказано предположение, развитое в [4, 5,

¹Институт сильноточной электроники СО РАН, 634055, Томск, Россия.

7], заключающееся в том, что электронный пучок с большой амплитудой за фольгой формируется при достижении критического поля между фронтом расширяющейся от катода к аноду плазмы и анодом. Субнаносекундный электронный пучок, который в воздухе имел амплитуду в десятки ампер и формировался из расширяющейся плазмы объемного лавинного разряда, в [4] было предложено называть СЛЭП – пучком (СЛЭП – субнаносекундный лавинный электронный пучок).

В [8, 9] было показано, что критерий убегания электронов для газа имеет принципиально нелокальный характер и определяется условием равенства длины размножения электронов (обратный коэффициент Таунсенда) расстоянию между электродами. При этом, поскольку коэффициент Таунсенда уменьшается при больших значениях параметра E/p , имеют место верхние ветви кривых, характеризующих критерий ухода электронов и критерий зажигания разряда (кривая Пашена [10]).

Цель данной работы – исследовать формирование электронного пучка в газовом диоде, заполненном неоном и гелием при давлениях от единиц *Torr* до 1 атмосферы. Исследования для неона в условиях формирования сильноточных электронных пучков проведены впервые.

Экспериментальная установка. Экспериментальные исследования были проведены с использованием модернизированного генератора наносекундных импульсов типа СИНУС, который подробно описан в [11]. В генераторе была встроена дополнительная передающая линия с волновым сопротивлением 40 Ом, рис. 1. Генератор формировал на согласованной нагрузке 40 Ом импульс с напряжением ~ 180 кВ. Длительность импульса на полувысоте от давления составляла ~ 1.5 нс, при фронте импульса напряжения ~ 0.5 нс. Катод, как и в работах [1 – 3], представлял собой набор трех цилиндров (диаметры 12, 22, 30 мм) из Ti фольги толщиной 50 мкм, вставленных друг в друга и закрепленных на дюралевой подложке. Все цилиндры из фольги имели общую ось. Высота цилиндров уменьшалась на 2 мм от цилиндра с меньшим диаметром к цилиндру с большим диаметром. Зазор газового промежутка изменялся от 10 до 28 мм. Плоский анод, через который осуществлялся вывод электронного пучка, был образован AlBe фольгой толщиной 40 мкм или сеткой. Зазор газового промежутка изменялся от 10 до 28 мм. Импульс отрицательного напряжения подавался на катод при давлении неона или гелия в газовом промежутке от 1 до 760 Torr.

Ток пучка измерялся с помощью коллектора, установленного на расстоянии 10 мм от фольги. Кроме того, одновременно измерялся "полный" ток диода и напряжение на разрядном промежутке. Для регистрации сигналов с емкостного делителя, коллектора

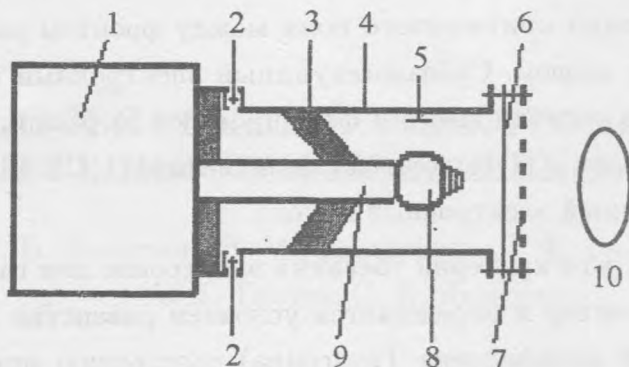


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки. 1 – высоковольтный генератор импульсов, 2 – коаксиальный токовый шунт, 3 – изолятор, 4 – корпус линии с волновым сопротивлением 40 Ом, 5 – емкостной делитель напряжения, 6 – фольга AlBe (40 мкм), 7 – выходное окно (прозрачность для пучка электронов $\sim 60\%$), 8 – катод с держателем, 9 – стержень, 10 – коллектор.

и шунтов применялся осциллограф TDS-7405 с полосой 4 ГГц, имеющий до 20 GS/s (20 точек на 1 нс) или осциллограф TDS-334 с полосой 0.3 ГГц, имеющий 2.5 GS/s (2.5 точки на 1 нс). Свечение разряда фотографировалось цифровым фотоаппаратом.

Экспериментальные результаты. На рис. 2 показаны зависимости амплитуды тока разряда через диод, напряжения на разрядном промежутке, плотности тока пучка электронов за фольгой и длительности импульса тока пучка на полувысоте от давления для гелия, а на рис. 3 для неона. При формировании электронного пучка в гелии измерения были проведены при временном разрешении системы регистрации ~ 0.1 нс. Зависимости, приведенные на рис. 2 и 3, подобны полученным нами ранее в [2] для гелия. При этом в неоне, как в более тяжелом газе, плотность тока за фольгой меньше и меньше давление неона, при котором начинается рост тока пучка. Можно выделить два характерных режима работы диода (см. рис. 2, 3). Первый режим, который был описан нами ранее (режим три в [2]), наблюдался при давлениях гелия менее 100 Торр ($E/p > 0.6$ кВ/(Торр·см)) и давлениях неона менее 50 Торр ($E/p > 1.2$ кВ/(Торр·см)). Для него характерно увеличение амплитуды и длительности тока пучка электронов за фольгой при уменьшении давления гелия и неона. Данные зависимости обусловлены ростом параметра E/p и увеличением доли убегающих электронов при уменьшении p .

Наиболее интересен второй режим, который был описан нами ранее в [2] как режим четыре. При давлениях гелия более 300 Торр и неона более 100 Торр амплитуда

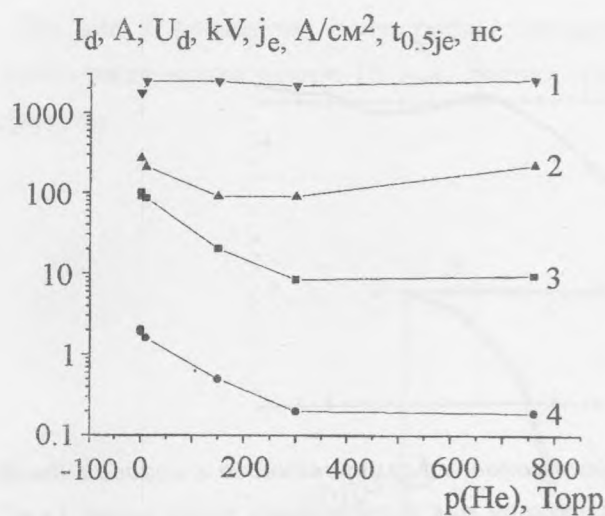


Рис. 2. Зависимость амплитуды тока разряда в диоде (1), напряжения на газовом диоде (2), плотности тока пучка за фольгой (3) и длительности импульса тока пучка на полувысоте (4) от давления гелия.

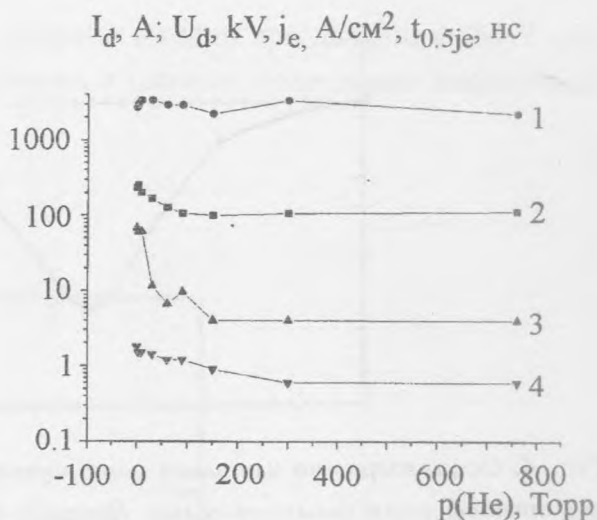


Рис. 3. Зависимость амплитуды тока разряда в диоде (1), напряжения на газовом диоде (2), плотности тока пучка за фольгой (3) и длительности импульса тока пучка на полувысоте (4) от давления неона.

тока пучка электронов, амплитуды напряжения на промежутке и тока разряда мало изменяются. Т. е. при изменении давления неона и гелия в газовом диоде в несколько раз ток пучка электронов за фольгой не изменяется. При этом значение параметра E/p уменьшилось в гелии до $0.16 \text{ кВ}/(\text{Торр} \cdot \text{см})$ и стало существенно меньше критического (достаточного для убегания значительного количества электронов) [8, 9]. Значение параметра E/p в неоне при изменении давления от 100 до 760 Торр уменьшилось с 0.6 до $0.08 \text{ кВ}/(\text{Торр} \cdot \text{см})$. Такое поведение тока пучка с изменением давления однозначно доказывает предположение [1, 3] о формировании пучка электронов в области между расширяющейся от катода плазмой и анодом. При увеличении давления критическое значение параметра E/p достигается на пропорционально меньшем расстоянии до анода.

Отметим, что после модернизации данного генератора длительность импульса напряжения уменьшилась до 1.5 нс на полувысоте. При этом исчезло "закорачивание" газового диода в конце импульса напряжения, которое ранее регистрировалось в [2]. Соответственно, ток разряда, который был объемным, уменьшился.

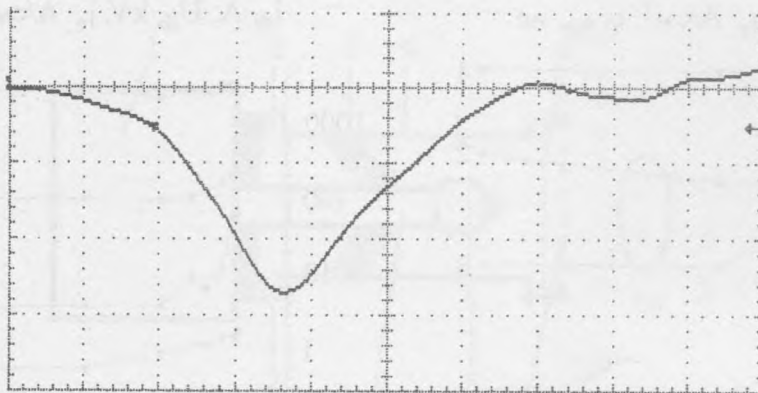


Рис. 4. Осциллограмма импульса тока пучка электронов, сформированного в газовом диоде при атмосферном давлении гелия. Площадь коллектора для регистрации тока пучка 1 см^2 . Масштаб по горизонтали 0.1 нс/клетку , масштаб по вертикали 3.7 А/клетку .

На рис. 4 приведена осциллограмма тока пучка за фольгой в гелии при атмосферном давлении, снятая с временным разрешением 0.1 нс . Видно, что пучок имеет субнано-секундную длительность. Длительности тока пучка, приведенные на рис. 2, 3, были сняты с разрешением ~ 0.1 и $\sim 1 \text{ нс}$, соответственно.

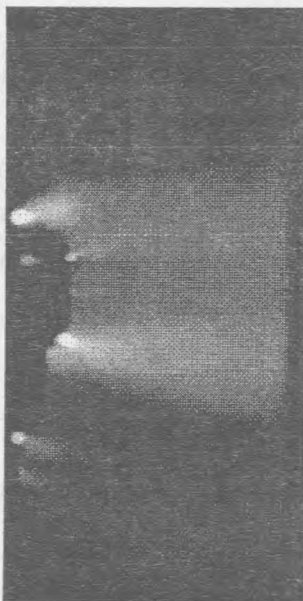


Рис. 5. Фотография свечения разряда в газовом диоде при атмосферном давлении гелия.

На рис. 5 приведена фотография свечения разряда в гелии при давлении 760 Торр и межэлектродном зазоре 16 мм. Видно, что разряд в газовом диоде имеет диффузный характер.

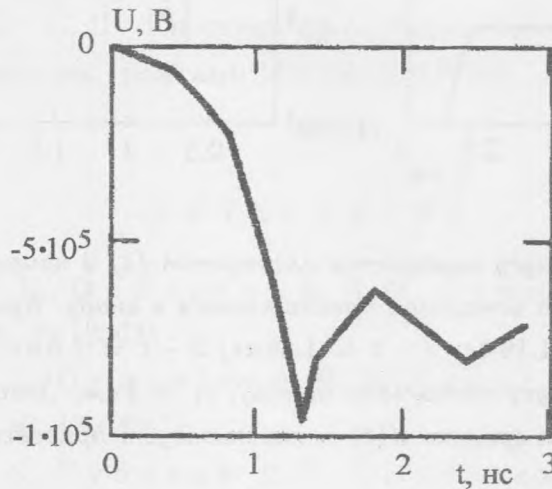


Рис. 6. Задаваемая в расчетах зависимость напряжения на электродах от времени.

Расчеты волны ионизации в сферической геометрии. Ранее для выявления условий убегания электронов было проведено численное моделирование процесса размножения электронов в цилиндрическом разрядном промежутке, заполненном ксеноном [7]. При этом использовалась диффузионно-дрейфовая модель, развитая в работах [12, 13]. В работах [14 – 16] рассмотрена простая модель размножения электронов фона.

Здесь мы развили одномерную диффузионно-дрейфовую модель, позволяющую качественно моделировать развитие ионизации в гелии сектором сферы. Рассматривается плазма между сферическими электродами $r_0 < r < r_1$, где r_0, r_1 радиусы соответственно внутреннего и внешнего электродов. Процессы образования плазмы и экранировки электрического поля описывались уравнениями переноса импульса и уравнениями непрерывности для электронов и ионов, а также уравнением Пуассона для электрического поля. Зависимости различных величин, фигурирующих в уравнениях дрейфово-диссипативной модели (частоты ионизации, дрейфовых скоростей и коэффициентов диффузии) от напряженности поля задавались с помощью полученных в работе [8] аппроксимаций. Напряжение на электродах задавалось как функция времени.

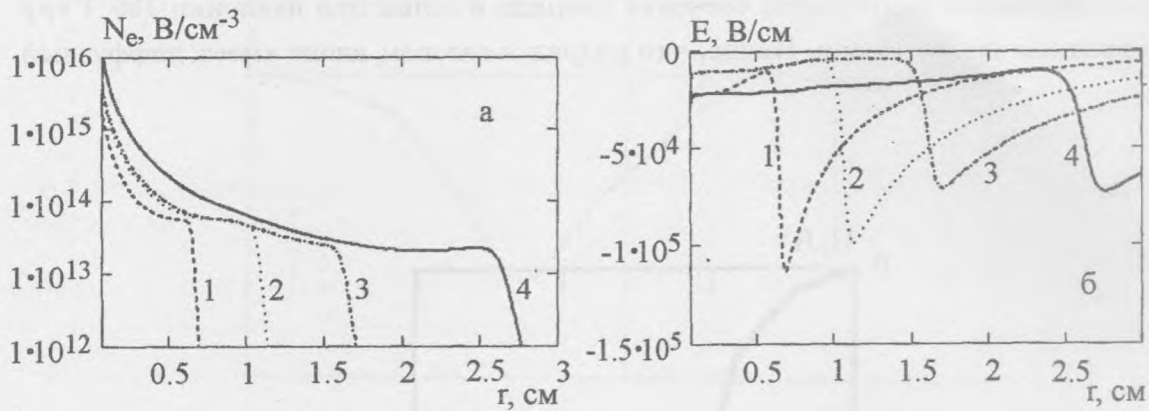


Рис. 7. Распределение по радиусу плотности электронов (а) и напряженности поля (б) в моменты времени, когда волна ионизации приближается к аноду. Кривые соответствуют моментам времени: 1 – $t = 1.19$ нс; 2 – $t = 1.36$ нс; 3 – $t = 1.6$ нс; 4 – $t = 2.0$ нс. $r_0 = 0.5$ мм (соответствует радиусу катодного пятна), $r_1 = 3$ см. Зависимость задаваемого напряжения на электродах от времени $U(t)$ соответствует приведенной на рис. 6.

На рис. 6, 7 приведены результаты расчетов, качественно моделирующие экспериментальные условия. Напряжение на электродах взято из экспериментальных данных для холостого хода. Видно, что плазма начинает резко приближаться к аноду, когда напряжение на электродах достигает ~ 50 кВ.

Результаты расчетов позволяют интерпретировать механизм генерации пучка следующим образом. Как и ранее [5, 7 – 9], мы полагаем, что электроны пучка формируются в слое толщиной $\sim 1/\alpha$; вблизи анода. Это происходит в моменты времени, когда волна ионизации подходит к аноду и напряженность поля в этом слое увеличивается. Когда волна ионизации касается анода, напряженность поля в прианодной области резко падает (см. рис. 7). При этом ухудшаются условия генерации пучка.

Таким образом, проведенные экспериментальные и теоретические исследования условий получения убегающих электронов в неоне и гелии:

- подтверждают возможность формирования сильноточного электронного пучка при атмосферном давлении и малых средних значениях параметра $E/p = 0.08 - 0.16$ кВ/(Торр · см);

- доказывают правомерность предложенной модели формирования субнаносекундных электронных пучков в области между плазмой, распространяющейся от катода, и анодом.

В неоне при атмосферном давлении получен электронный пучок с плотностью тока пучка более $\sim 6 \text{ А/см}^2$. Показано, что при изменении давления неона и гелия от 100 до 760 *Torr* условия формирования СЛЭП пучка сохраняются. При улучшении разрешения системы регистрации в гелии зафиксирована длительность тока пучка электронов на полувысоте $\sim 0.2 \text{ нс}$.

Авторы благодарят С. Д. Коровина за предоставление генератора импульсов СИНУС. Работа поддержана грантами МНТЦ 1270, 2706.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Алексеев С. Б., Орловский В. М., Тарасенко В. Ф. Письма в ЖТФ, **29**, вып. 10, 29 (2003).
- [2] Алексеев С. Б., Орловский В. М., Тарасенко В. Ф. и др. Письма в ЖТФ, **29**, вып. 16, 45 (2003).
- [3] Алексеев С. Б., Губанов В. П., Орловский В. М. и др. ПТЭ, N 4, 81 (2003).
- [4] Тарасенко В. Ф., Орловский В. М., Шунайлов С. А. Известия ВУЗов, Физика, N 3, 94 (2003).
- [5] Тарасенко В. Ф., Яковленко С. И., Орловский В. М. и др. Письма в ЖЭТФ, **77**, вып. 11, 737 (2003).
- [6] Тарасенко В. Ф., Шпак В. Г., Шунайлов С. А. и др. Письма в ЖТФ, **29**, вып. 21, 1 (2003).
- [7] Тарасенко В. Ф., Яковленко С. И., Орловский В. М., Ткачев А. Н. Письма в ЖТФ, **30**, вып. 8, 68 (2004).
- [8] Ткачев А. Н., Яковленко С. И. Письма в ЖЭТФ, **77**, вып. 5, 264 (2003).
- [9] Ткачев А. Н., Яковленко С. И. Письма в ЖТФ, **29**, вып. 16, 54 (2003).
- [10] Райзер Ю. П. Физика газового разряда, М., Наука, 1987.
- [11] Губанов В. П., Коровин С. Д., Пегель И. В. и др. Известия ВУЗов, Физика, N 12, 110 (1996).
- [12] Tkachev A. N. and Yakovlenko S. I. Laser physics, **12**(7), 1022 (2002).
- [13] Tkachev A. N. and Yakovlenko S. I. Laser physics, **13**(11), 1345 (2003).
- [14] Яковленко С. И. "Механизм распространения стримера к аноду и к катоду, обусловленный размножением электронов фона". Электронный журнал "Исследовано в России", N 9, 86 (2004). <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/009.pdf>

- [15] Яковленко С. И. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 10, 27 (2003).
[16] Яковленко С. И. Письма в ЖТФ, 30, вып. 9, 12 (2004).

Институт общей физики
им. А. М. Прохорова РАН

Поступила в редакцию 6 апреля 2004 г.