

УДК 537.523

ГЕНЕРАЦИЯ СВЕРХКОРОТКОГО ЛАВИННОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ЭЛЕГАЗЕ

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

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

В элегазе (SF_6) при давлениях 0,1...2,5 ата исследовано формирование сверхкороткого (100...200 пс) лавинного электронного пучка. За AlBe фольгой толщиной 45 мкм электронный пучок получен при давлении элегаза в газовом диоде до 2 ата. Показано, что при повышенных давлениях (>1 ата) и подаче от генератора наносекундных импульсов высокого напряжения (~270 кВ) длительность импульса сверхкороткого лавинного электронного пучка на полувывоте увеличивается до 150 пс.

Введение

Элегаз широко используют для изоляции в электрофизических устройствах [1] и в качестве донора фтора в нецепных химических лазерах [2], поэтому исследование условий генерации пучка убегающих электронов и формирования объемного разряда при пробое элегаза представляет большой научный и практический интерес. В настоящее время известны только две работы [3, 4], в которых сообщалось о регистрации пучка электронов за анодом из фольги при давлениях элегаза ~1 ата. Возможность генерации пучка убегающих электронов в элегазе при атмосферном давлении была продемонстрирована в работе [3]. Там же сообщалось о формировании объемного разряда при давлении SF_6 1 ата. Максимальное напряжение наносекундного генератора импульсов в [3] равнялось 250 кВ. Длительность импульса тока пучка τ регистрировались по свечению сцинтиллятора. Измерения дали величину $\tau \sim 3,5$ нс, что соответствовало разрешению системы регистрации. Прямые измерения амплитуды тока пучка не проводились. С помощью рентгеновской пленки РТ-1 определялись кривые поглощения для убегающих электронов, которые оказались подобными для воздуха и элегаза.

В [4] сообщалось о получении сверхкороткого лавинного электронного пучка (СЛЭП) при давлении 0,3...1 ата в газовом диоде, заполненном элегазом, а также гелием, водородом, неоном, азотом, аргоном, метаном, криптоном и ксеноном. Было показано, что длительность импульсов тока пучка, регистрируемых за фольгой, составляет на полувывоте для всех газов ~100 пс. Эта длительность соответствовала в [4] разрешению системы регистрации, амплитуда тока пучка убегающих электронов для элегаза не приводилась. Кроме работ [3, 4] отмечим также работу [5], в которой при атмосферном давлении элегаза в газовом диоде пучок убегающих электронов за фольгой получить не удалось.

Цель настоящей работы – экспериментально исследовать при повышенных давлениях элегаза генерацию сверхкороткого лавинного электронного пучка.

Экспериментальная аппаратура и методики

Эксперименты проводились с использованием газовых диодов, конструкция которых приведена в

работах [6, 7]. Катодом служила трубка из стальной фольги толщиной 100 мкм и диаметром ~6 мм. Вывод электронного пучка осуществлялся через AlBe фольгу толщиной 45 мкм. Расстояние между анодом и катодом равнялось 10...12 мм. В качестве источника импульсного напряжения использовались генераторы РАДАН [8]. Генератор РАДАН-220 формировал импульсы напряжения с амплитудой ~270 кВ (за счет обострительного разрядника с увеличенным напряжением пробоя), длительностью импульса на полувывоте при согласованной нагрузке ~2 нс и временем нарастания ~0,5 нс. Генератор РАДАН-150 формировал импульсы напряжения с амплитудой ~150 кВ, длительностью импульса на полувывоте при согласованной нагрузке ~1,5 нс и временем нарастания ~0,5 нс. Ток пучка электронов измерялся с помощью коллектора, который имел временное разрешение ~100 пс. Конструкция коллектора приведена в [6]. Приемная часть коллектора состояла из металлического конуса, образующего с корпусом линию с волновым сопротивлением 50 Ом. Основание конуса, обращенное к фольге, имело диаметр 20 мм и располагалось на расстоянии 5 мм от фольги. Импульсы напряжения с генератора РАДАН-150 регистрировались с помощью емкостного делителя напряжения, а ток разряда с помощью шунта из чип-резисторов [6]. Электрические сигналы с делителя напряжения, коллектора и шунта подавались на цифровой осциллограф TDS6604 (6 ГГц, $2 \cdot 10^{10}$ выборок/с). Временное разрешение системы регистрации составляло ~100 пс.

Результаты

Эксперименты показали, что время запаздывания пробоя промежутка t_d сильно зависит от давления элегаза. Так, при использовании генератора РАДАН-150 и давлении элегаза 2 ата, t_d составило ~80 нс. При давлении элегаза 1,5 ата t_d составило ~1,5 нс. В обоих случаях пробой наблюдался на плоской части импульса при напряжении холостого хода генератора ~150 кВ. При давлении элегаза 1 ата пробой стал происходить на фронте импульса при напряжении 130...140 кВ, рис. 1, а.

На рис. 1, а, также приведена осциллограмма импульса тока разряда. Видно, что при атмосферном давлении элегаза импульс тока разряда не имеет положительного выброса и за 5 нс энергия от ге-

нератора полностью вкладывается в плазму разряда. Причем ток разряда начинал регистрироваться на фронте импульса напряжения. Разряд при давлениях 0,5...1 ата обычно был объемным (диффузным) и только у катода были видны яркие точки. С увеличением давления на фоне объемного разряда начинал появляться яркий канал. Контрагирование разряда также наблюдалось с уменьшением давления элегаза до ~0,2 ата и менее. При этом напряжение пробоя промежутка не превышало 100 кВ. Амплитуда СЛЭП при зазоре между катодом и анодом 12 мм и атмосферном давлении элегаза была сравнительно малой (~0,01 А). В азоте и воздухе атмосферного давления амплитуда тока пучка была на порядок больше. При уменьшении давления элегаза амплитуда СЛЭП существенно возрастала и составила 0,08, 0,12 и 0,2 А при давлениях 0,75, 0,5 и 0,25 ата, соответственно. Отметим, что в гелии, воздухе и азоте в этом диапазоне давлений зависимость амплитуды тока пучка от давления более слабая [4, 9]. На рис. 1, б, приведены осциллограммы импульса напряжения на промежутке и тока пучка при давлении элегаза 0,5 ата. Длительность импульса СЛЭП составила с генератором РАДАН-150 ~130 пс на полувысоте.

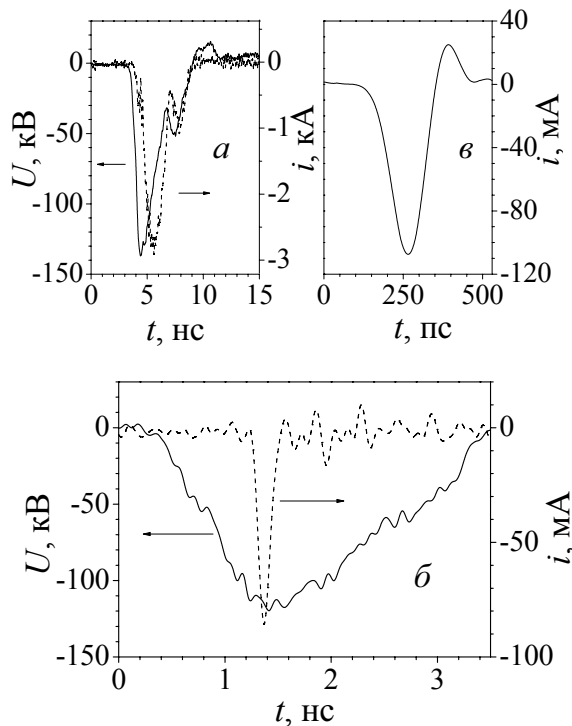


Рис. 1. Осциллограммы импульсов напряжения на разрядном промежутке и тока разряда (а), импульсов напряжения и тока пучка (б), импульса тока пучка (в): а) РАДАН-150, 1 ата; б) РАДАН-150, 0,5 ата; в) РАДАН-220, 0,5 ата

На рис. 2 приведены зависимости амплитуды тока пучка с коллектора и длительности импульса СЛЭП на полувысоте от давления элегаза, полученные с газовым диодом, конструкция которого приведена в [6], и генератором РАДАН-220.

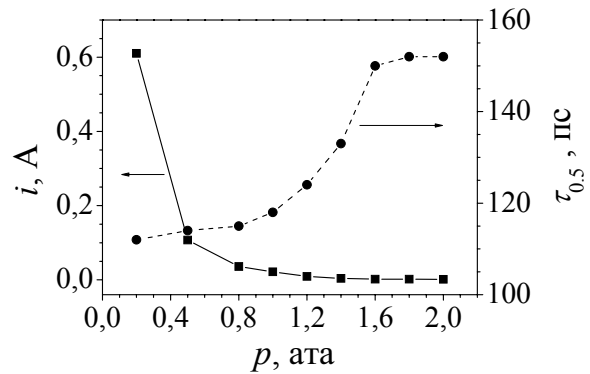


Рис. 2. Зависимости амплитуды и длительности импульса тока пучка от давления элегаза, полученные с генератором РАДАН-220

Газовый диод подключался к генератору с минимальной индуктивностью. Оптимальное напряжение генератора, конструкция газового диода и катода позволили получить со всей площади AlBe фольги толщиной 45 мкм в воздухе атмосферного давления амплитуду СЛЭП ~40 А. В элегазе амплитуда тока пучка при атмосферном давлении с генератором РАДАН-220 была на три порядка меньше. Исследования показали, что параметры генератора и конструкция газового диода существенно влияют на амплитуду СЛЭП в различных газах, и оптимальные условия для генерации СЛЭП в различных газах существенно отличаются. С генератором РАДАН-220 электронный пучок был получен при давлении элегаза в газовом диоде до 2 ата. При давлении более 2 ата сигнал с коллектора становился нестабильным, и уравнивался по амплитуде с электромагнитной наводкой. Осциллограмма импульса тока пучка при давлении 0,5 ата приведена на рис. 1, в. Длительность импульса на полувысоте с генератором РАДАН-220 составила ~110 пс и была меньше, чем с генератором РАДАН-150. При повышенных давлениях (1,6...2 ата) было обнаружено увеличение длительности импульса СЛЭП до ~150 пс. Этот результат является важным для определения механизма генерации электронного пучка в газовом диоде.

Также с генератором РАДАН-220 были определены кривые поглощения электронного пучка в элегазе и воздухе при давлении 1 ата. Поведение этих кривых существенно отличалось. В воздухе СЛЭП регистрировался за фильтром из алюминиевой фольги толщиной 300 мкм, а в элегазе за фильтром толщиной более 100 мкм амплитуда сигнала была недостаточна для измерений. Соответственно, средняя энергия электронов пучка в элегазе меньше, чем в воздухе. Данный результат отличается от данных, полученных в работе [3].

Обсуждение результатов

Уменьшение амплитуды тока пучка в элегазе по сравнению с более легкими газами (азотом и воздухом) является естественным. SF_6 — это тяжелый электроотрицательный газ, удельный вес которого

в 7 раз больше чем у азота. Для реализации условий убегания электронов в нем нужны более высокие электрические (критические) поля [10]. Однако регистрация в данной работе СЛЭП при давлении элегаза 2 ата и резкое увеличение амплитуды тока пучка при давлении 0,2 ата показывает, что в элегазе эти критические поля легко достигаются. Благодаря высокому пробивному напряжению в элегазе, генерация убегающих электронов реализуется при различных давлениях за счет усиления электрического поля у катода и в промежутке. Однако их количество меньше, чем в легких газах. Убеганием электронов можно объяснить и легкость получения объемного разряда в нецепных химических HF и DF лазерах с накачкой самостоятельным разрядом [2]. В этих лазерах с катодом, который имеют шероховатую поверхность, объемный разряд при повышенных давлениях (~0,1 ата) легко формируется без источника предйонизации [11]. Мы считаем, что предйонизация осуществляется быстрыми электронами, которые генерируются вначале у катода, а затем в промежутке [10, 12]. В предйонизации также участвует тормозное мягкое рентгеновское излучение, формируемое за счет соударений быстрых электронов с тяжелыми частицами газа [13].

Отметим, что генерация СЛЭП связана с достижением критического поля между фронтом волны ионизации, который движется от катода, и анодом [10, 12]. При этом волна ионизации формируется благодаря быстрым электронам, которые генерируются за счет усиления поля у катода и в промежут-

ке. Увеличение длительности импульса СЛЭП с ростом давления элегаза в газовом диоде можно объяснить уменьшением скорости фронта волны ионизации. Это согласуется с результатами, полученными в работах [14, 15]. К увеличению длительности импульса тока пучка приводило как увеличение давления азота и аргона [14], так и уменьшение напряжения генератора [15]. В данных экспериментах длительность импульса СЛЭП на полувывоте с генератором РАДАН-150 при давлении 0,5 ата была на ~30 % больше, чем с генератором РАДАН-220.

Выводы

Электронный пучок за AlBe фольгой получен при давлении элегаза в газовом диоде до 2,0 ата. Исследованы условия формирования сверхкороткого (100...200 пс) лавинного электронного пучка в диапазоне давлений элегаза 0,1...2,5 ата. Показано, что энергия электронов и амплитуда тока пучка в элегазе существенно меньше, чем в воздухе, что обусловлено параметрами генератора и конструкцией газового диода. При давлениях 1,6...2,0 ата элегаза зарегистрирована длительность импульса СЛЭП на полувывоте ~150 пс. Показано, что при повышенных давлениях (>1 ата) или уменьшении напряжения генератора длительность импульса СЛЭП в элегазе увеличивается, что можно объяснить замедлением скорости движения фронта волны ионизации.

Работа доложена на VIII Международной конференции «Atomic and Molecular Pulsed lasers», Tomsk, 10–14 September, 2007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бортник И.М. Физические свойства и электрическая прочность элегаза. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 77 с.
- Химические лазеры / Под ред. Н.Г. Басова. — М.: Наука, 1982. — 400 с.
- Бабич Л.П., Лойко Т.В. Убегающие электроны при высоковольтных наносекундных разрядах в гексафториде серы атмосферной плотности // Журнал технической физики. — 1991. — Т. 61. — Вып. 9. — С. 153–155.
- Бакшт Е.Х., Рыбка Д.В., Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф. О формировании субнаносекундных импульсов тока пучка большой плотности в газовом диоде при низких давлениях // Письма в ЖТФ. — 2006. — Т. 32. — Вып. 21. — С. 69–75.
- Месяц Г.А., Коровин С.Д., Шарыпов К.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.А. О динамике формирования субнаносекундного электронного пучка в газовом и вакуумном диоде // Письма в ЖТФ. — 2006. — Т. 32. — Вып. 1. — С. 35–44.
- Бакшт Е.Х., Рыбка Д.В., Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф. Ток разряда и ток сверхкороткого пучка электронов при объемном наносекундном разряде в неоднородном электрическом поле // Письма в ЖТФ. — 2007. — Т. 33. — Вып. 5. — С. 71–78.
- Бакшт Е.Х., Рыбка Д.В., Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф. Излучение плазмы объемного наносекундного разряда в ксеноне, криптоне и аргоне при повышенном давлении // Квантовая электроника. — 2006. — Т. 36. — № 6. — С. 576–580.
- Яландин М.И., Шпак В.Г. Мощные малогабаритные импульсно-периодические генераторы субнаносекундного диапазона // Приборы и техника эксперимента. — 2001. — № 3. — С. 5–31.
- Алексеев С.Б., Губанов В.П., Орловский В.М., Скаун В.С., Тарасенко В.Ф. Новый способ формирования сильноточных электронных пучков субнаносекундной длительности // Доклады РАН. — 2004. — Т. 398. — № 5. — С. 611–614.
- Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I. High-power subnanosecond beams of runaway electrons and volume discharge formation in gases at atmospheric pressure // Plasma Devices and Operations. — 2005. — V. 13. — № 4. — P. 231–279.
- Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Орешкин В.Ф., Фирсов К.Н. Нецепной электроразрядный HF(DF)-лазер с высокой энергией излучения // Квантовая электроника. — 1998. — Т. 25. — № 2. — С. 123–125.
- Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I., Shunailov S.A., Kostyrya I.D., Tkachev A.N. On the mechanism of subnanosecond electron beam formation in gas-filled diodes // Laser Physics. — 2006. — V. 16. — № 3. — P. 526–533.
- Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Тельминов А.Е. Рентгеновское излучение искровой системы предйонизации и плазмы объемного разряда в лазере с индуктивным накопителем энергии // Квантовая электроника. — 2007. — Т. 37. — № 1. — С. 103–106.
- Ерофеев М.В., Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф. Импульсный разряд в неоднородном электрическом поле в азоте и аргоне при повышенных давлениях // Журнал технической физики. — 2007. — Т. 77. — Вып. 10. — С. 43–49.
- Бакшт Е.Х., Рыбка Д.В., Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф. Сверхкороткий лавинный электронный пучок в азоте и гелии, генерируемый на плоской части импульса напряжения // Письма в ЖТФ. — 2007. — Т. 33. — Вып. 9. — С. 29–36.

Поступила 14.09.2007 г.