

УДК 537.523.9

*В.Ф. ТАРАСЕНКО***, Е.Х. БАКШТ*, А.Г. БУРАЧЕНКО******ГЕНЕРАЦИЯ СВЕРХКОРОТКОГО ЛАВИННОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В SF₆¹**

Проведены исследования параметров сверхкороткого лавинного электронного пучка (с.л.э.п.) в SF₆, а также в смеси SF₆ с криптоном и азотом. На промежутке, образованный трубчатым катодом и плоским анодом, подавались импульсы напряжения от генератора СЛЭП-150М. Показано, что при заполнении газового диода SF₆ криптоном, а также смесью SF₆ с криптоном в различных пропорциях, при атмосферном давлении и одинаковых напряжениях на промежутке амплитуда с.л.э.п. существенно не изменяется. Подтверждено, что при разбавлении SF₆ азотом и воздухом амплитуда с.л.э.п. пропорционально увеличивается, а напряжение пробоя промежутка уменьшается.

Ключевые слова: *убегающие электроны, SF₆, смеси SF₆ с криптоном и азотом, генератор СЛЭП-150М, сверхкороткий лавинный электронный пучок, с.л.э.п.*

В последние годы достигнут значительный прогресс в изучении генерации убегающих электронов (УЭ) при лабораторных разрядах в газах повышенного давления (см., например, обзор [1] и ссылки в нем). Новые экспериментальные результаты были получены благодаря прогрессу в развитии измерительных приборов и совершенствованию методик измерений. Основное внимание при проведении исследований в последние 10 лет уделялось определению параметров и свойств УЭ при пробое воздуха атмосферного давления, а также изучению механизма генерации УЭ. Исследованиям генерации УЭ в тяжелых газах уделялось мало внимания. Например, пучок УЭ в SF₆ атмосферного давления за анодом был зарегистрирован только в двух научных группах.

Впервые о регистрации УЭ в SF₆ атмосферного давления за анодом из фольги сообщалось в работе [2]. Число убегающих электронов определялось по почернению рентгеновской пленки. Оценка дала 10⁸ электронов за импульс, что было примерно на порядок меньше, чем в воздухе атмосферного давления. Измерение длительности импульса тока пучка было проведено с помощью сцинтиллятора и ФЭУ с временным разрешением не лучше чем 3.5 нс. По-видимому, из-за ошибок в измерениях в работе [2] утверждалось, что энергия УЭ в SF₆ больше, чем в воздухе, а также, что в SF₆ и воздухе генерируется моноэнергетический пучок убегающих электронов с «аномальной» энергией [2, 3]. Под «аномальной» энергией в [2, 3] понималась энергия электронов, которая превышает eU_m , где U_m – максимальное напряжение на промежутке во время генерации пучка УЭ, а e – заряд электрона. Данная ошибка в определении энергии электронов в SF₆ [2] и воздухе [3] или(и) напряжения на промежутке, как и ошибка в описании механизма генерации пучков УЭ, повторяется в публикациях руководителя этой научной группы вплоть до настоящего времени.

В работе [4] было показано, что в пучке УЭ, регистрируемых за анодной фольгой при наносекундном пробое воздуха атмосферного давления, можно выделить две–три группы быстрых электронов с различной энергией. При этом число электронов с «аномальной» энергией не превышало 10 % общего числа электронов за фольгой для оптимальных условий. Пучок УЭ, измеряемый за анодом из фольги, в [5] было предложено называть сверхкоротким лавинным электронным пучком (с.л.э.п.), в данной работе мы используем этот термин. Сравнение энергии электронов с.л.э.п. в SF₆ и воздухе, проведенное в работе [6], показало, что электроны в воздухе при прочих равных условиях имеют большую энергию, чем в SF₆. Отметим, что в работе [7] убегающие электроны с «аномальной» энергией в воздухе атмосферного давления при субнаносекундном фронте импульса напряжения вообще не были зарегистрированы и было сделано утверждение, что таковых не должно быть.

При субнаносекундном временном разрешении системы регистрации с помощью коллектора с.л.э.п. в SF₆ атмосферного давления был впервые зарегистрирован в работе [8], где было показано, что длительность импульса тока пучка на полувывоте в SF₆ и других газах при давлении одна атмосфера составляет ~100 пс. В этой работе использовался генератор РАДАН-220, а с.л.э.п. был

¹ Работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ №15-58-53031_ГФЕН_а.

получен в шести различных газах, в том числе в газах с большим атомным номером (Kr и Xe). Попытка зарегистрировать пучок УЭ в SF₆ при давлении 1 атм за анодной фольгой с генератором РАДАН-303 в работе [9] окончилась неудачей. По-видимому, из-за не оптимальной конструкции газового диода и большей длительностью фронта импульса напряжения генератора РАДАН-303 (~ 1.5 нс), по сравнению с длительностью фронта генератора РАДАН-220 (~ 0.5 нс). Однако пучок УЭ в воздухе атмосферного давления с генератором РАДАН-303 в работе [9] был зарегистрирован.

Наиболее подробные исследования с высоким временным разрешением (до 90 пс) генерации УЭ в SF₆ были выполнены в работах [6, 10]. Генерация с.л.э.п. наблюдалась при давлениях SF₆ до 2 атм и было показано, что длительность импульса с.л.э.п. зависит от давления SF₆ и амплитуды импульса напряжения. Однако к настоящему времени пучок УЭ при атмосферном давлении SF₆ был зарегистрирован только в двух научных группах, результаты исследований которых существенно отличаются. Это требует проведения дальнейших измерений параметров с.л.э.п. в SF₆, а также сравнения получаемых результатов с параметрами с.л.э.п. в других газах.

Цель данной работы – продолжить исследования генерации с.л.э.п. в SF₆, а также провести сравнение амплитуды с.л.э.п. в криптоне, азоте, воздухе и в смесях SF₆ с криптоном, азотом при атмосферном давлении. Настоящая работа продолжает исследования, которые были начаты в работах [6, 10]. Отметим, что исследование разрядов в SF₆ имеет кроме научного большое практическое значение, поскольку SF₆ широко используется как изолятор в высоковольтных устройствах, а также в качестве одного из компонентов химических газовых лазеров.

В работе была использована установка, состоящая из генератора СЛЭП-150М с передающей линией, газового диода и системы регистрации. Амплитуда U в падающей волне составляла ~ 130 кВ, а длительность импульса на полувывоте 1 нс. Длительность фронта импульса напряжения определяется обострителем разрядником и составляла ~ 0.3 нс. Данная длительность фронта импульса напряжения меньше, чем в генераторе РАДАН-220, с которым мы проводили исследования ранее. Передающая линия генератора СЛЭП-150 имела 4 емкостных делителя напряжения, один из которых был установлен напротив газового диода. К торцу газового диода крепился шунт, имеющий форму диска, к которому крепились чип-резисторы с малой индуктивностью. Сопротивление шунта $R = 0.038$ Ом. В середине диска из латуни находилась диафрагма с отверстием диаметром 1 см, закрытая сеткой с коэффициентом пропускания ~ 14 %. Данная сетка и диск служили анодом. В качестве катода использовалась трубочка диаметром 6 мм с толщиной кромки ~ 200 мкм, которая была закруглена. Межэлектродный зазор d составлял 4 или 8 мм. За сеткой помещалась Al-фольга толщиной 10 мкм и устанавливался коллектор с диаметром приемной части 20 мм. Система регистрации позволяла фиксировать сигналы с емкостных делителей, токового шунта и коллектора. Временное разрешение системы составляло 100 пс. В экспериментах регистрировалась только часть с.л.э.п., который ослаблялся диафрагмой, анодной сеткой и фольгой, и импульс напряжения с емкостного делителя, установленного напротив газового диода. Газовый диод откачивался форвакуумным насосом и заполнялся различными газами (SF₆, криптон, воздух и азот), а также их смесями.

На рис. 1 приведены зависимости амплитуды с.л.э.п., регистрируемого коллектором с учетом поглощения в анодной сетке, и амплитуды напряжения на промежутке от содержания SF₆ в азоте при давлении смеси 1 атм, а также от давления SF₆. Межэлектродный промежуток $d = 4$ мм. Разбавление SF₆ азотом при давлении смеси 1 атм давало увеличение амплитуды с.л.э.п. и оказывало малое влияние на максимальное напряжение на газовом диоде. При этом существенное увеличение амплитуды с.л.э.п. начиналось при содержании SF₆ в смеси менее 10 %. При уменьшении давления SF₆ амплитуда с.л.э.п., как и в работах [6, 10], возрастала, а напряжение на газовом диоде при этом уменьшалось. Минимальное напряжение пробоя при $d = 4$ мм наблюдалось при давлении SF₆ 0.1 атм.

На рис. 2 приведены зависимости амплитуды с.л.э.п. и амплитуды напряжения на промежутке от давления SF₆, а также от содержания SF₆ в криптоне и азоте при давлении смеси 1 атм и межэлектродном промежутке 8 мм.

При уменьшении давления SF₆ амплитуда с.л.э.п., как и при межэлектродном зазоре 4 мм, возрастала. Однако максимальное напряжение на газовом диоде при этом существенно не изменялось. Разбавление SF₆ азотом при давлении смеси 1 атм и $d = 8$ мм давало существенное увеличение амплитуды с.л.э.п. при содержании SF₆ менее 10 % и оказывало малое влияние на максимальное напряжение на газовом диоде.

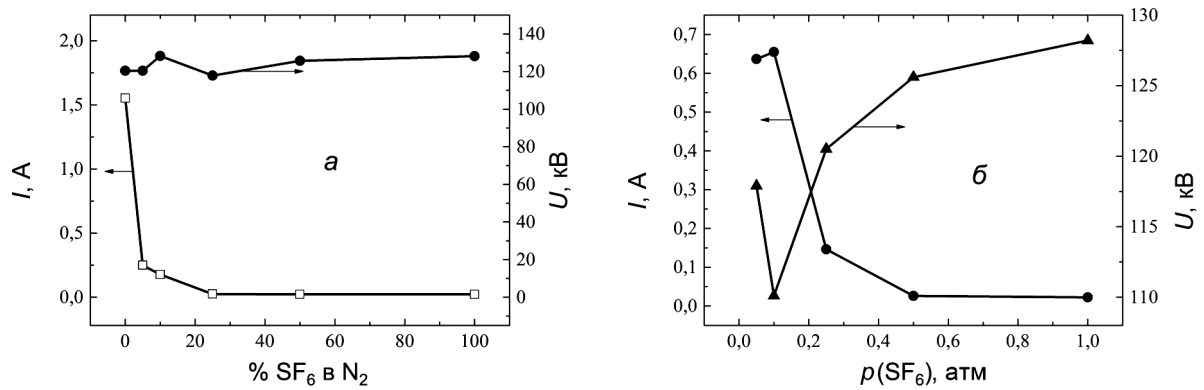


Рис. 1. Зависимости амплитуды с.л.э.п. и амплитуды напряжения на промежутке от содержания SF_6 в азоте при давлении смеси 1 атм (а), а также от давления SF_6 , $d = 4$ мм

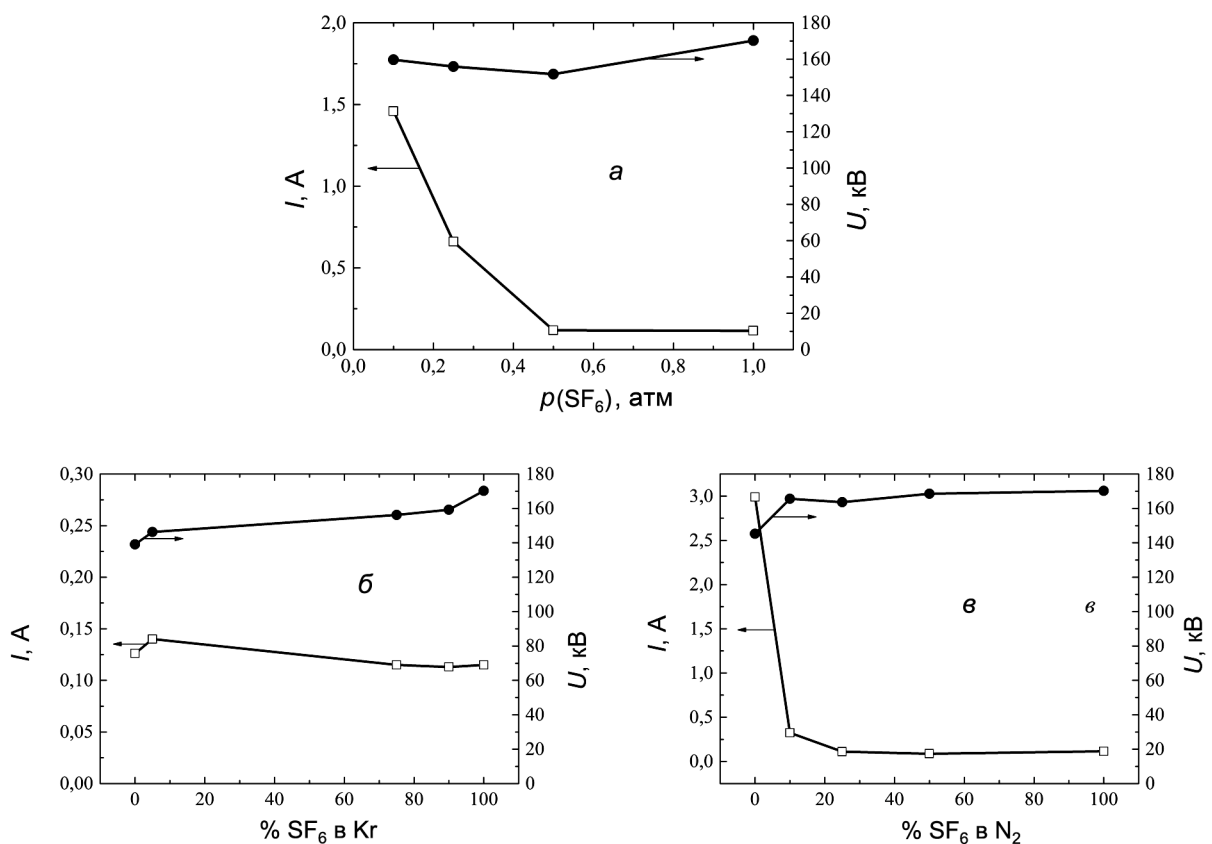


Рис. 2. Зависимости амплитуды с.л.э.п. и амплитуды напряжения на промежутке от давления SF_6 (а), а также от содержания SF_6 в криптоне (б) и в азоте (в) при давлении смеси 1 атм, $d = 8$ мм

В смесях SF_6 с криптоном, который, как и SF_6 , является тяжелым газом, изменение содержания SF_6 в криптоне существенно не влияло ни на амплитуду с.л.э.п., ни на амплитуду напряжения на промежутке. Как известно, SF_6 является электроотрицательным газом, а криптон электроположительным газом. Соответственно из рис. 2, б следует, что электроотрицательность газа не оказывает в данных условиях существенного влияния на амплитуду с.л.э.п. Данный вывод подтверждают эксперименты по сравнению амплитуды с.л.э.п. в азоте (электроположительный газ) и воздухе (содержит 25 % электроотрицательного газа кислорода). Амплитуды с.л.э.п. в воздухе и азоте существенно не отличаются. В зависимости от экспериментальных условий они могут быть больше как в азоте, так и в воздухе.

Осциллограммы напряжения с ёмкостного делителя, установленного напротив газового диода, тока через промежуток и с.л.э.п. в SF_6 атмосферного давления приведены на рис. 3.

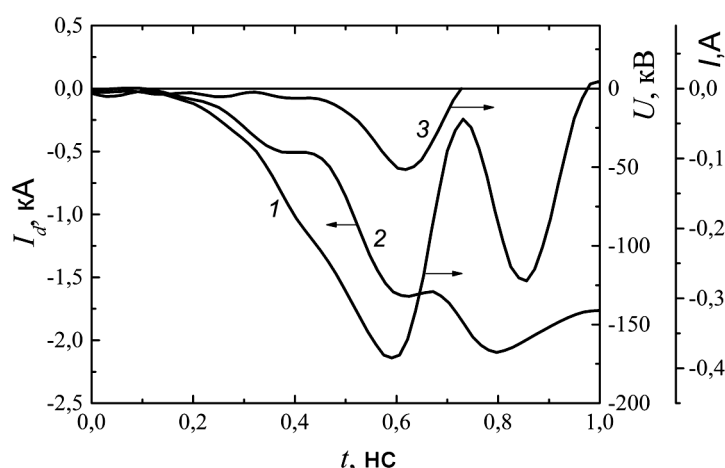


Рис. 3. Осциллограммы импульсов напряжения на газовом диоде (кр. 1), тока через промежуток (кр. 2) и с.л.э.п. в SF₆ (кр. 3) при $d = 8$ мм

Максимум с.л.э.п. регистрируется примерно на начале спада напряжения на промежутке. При этом рост тока через промежуток замедляется. Колебания на осциллограмме импульса напряжения (при использовании для регистрации напряжения ёмкостного делителя, установленного напротив газового диода) обусловлены субнаносекундным пробоем промежутка.

Проведенные исследования подтверждают, что в тяжелых газах (SF₆ и криптон) при атмосферном давлении наблюдается генерация с.л.э.п. Однако амплитуда с.л.э.п. (числа УЭ в пучке) существенно меньше, чем в азоте и воздухе. Установлено, что на амплитуду с.л.э.п. большее влияние оказывает вес газа, чем его электроотрицательность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Levko D., Krasik Ya.E., Tarasenko V.F. // International Review of Physics. – 2012. – V. 6. – No. 2. – P. 165–195.
2. Бабич Л.П., Лойко Т.В. // ЖТФ. – 1991. – Т. 61. – Вып. 9. – С. 153–155.
3. Бабич Л.П., Лойко Т.В. // ЖТФ. – 1985. – Т. 55. – Вып. 5. – С. 956–958.
4. Baksht E.Kh., Burachenko, A.G., Kozhevnikov V.Y. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2010. – V. 43. – 305201.
5. Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Шунайлов С.А. // Изв. вузов. Физика. – 2003. – Т. 45. – № 3. – С. 94–95.
6. Baksht E.Kh., Burachenko A.G., Erofeev M.V., et al. // Laser Phys. – 2008. – V. 18. – No. 5. – P. 732–737.
7. Месяц Г.А., Коровин С.Д., Шарыпов К.А. и др. // Письма в ЖТФ. – 2006. – Т. 32. – Вып. 1. – С. 35–44.
8. Бакшт Е.Х., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф. // Письма в ЖТФ. – 2006. – Т. 32. – Вып. 21. – С. 69–75.
9. Mesyats G.A., Reutova A.G., Sharypov K.A., et al. // Laser Part. Beams. – 2011. – V. 29. – P. 425–435.
10. Zhang Ch., Tarasenko V.F., Shao T., et al. // Laser and Particle Beams. – 2014. – V. 32. – P. 331–341.

*Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 03.08.15.

**Национальный исследовательский Томский государственный университет,

г. Томск, Россия

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

Тарасенко Виктор Федотович, д.ф.-м.н., профессор, зав. лабораторией;

Бакшт Евгений Хаймович, к.т.н., ст. науч. сотр.;

Бураченко Александр Геннадьевич, мл. науч. сотр.

V.F. TARASENKO*,**, E.Kh. BAKSHT*, A.G. BURACHENKO*,**

SUPERSHORT AVALANCHE ELECTRON BEAMS IN SF₆

In this work, the generation of a supershort avalanche electron beam (SAEB) in SF₆ in an inhomogeneous electric field was studied on the generators SLEP-150M with pulse rise times of 0.3 ns. The SAEB parameters in SF₆ are compared with those obtained in krypton, nitrogen, air and mixture SF₆ with krypton, nitrogen. SAEB was detected during the rise time of both the voltage pulse and discharge current. Similar sets of waveforms were obtained in mixtures SF₆ with krypton. It is shown that the SAEB amplitude in SF₆ at pressures range from 0.01 to 0.1 MPa is commensurable with that in krypton and is much lower than that in nitrogen and air.

Keywords: supershort avalanches electron beam and X-ray in SF₆, pulser SLEP-150M, mixtures SF₆ with krypton and nitrogen.

REFERENCES

1. Levko D., Krasik Ya. E., Tarasenko V. F. (2012). Present status of runaway electron generation in pressurized gases during nanosecond discharges. *International Review of Physics*, 6(2), 165–195.
2. Babich L. P., Loiko T. V. (1991). Runaway electrons at high voltage nanosecond discharges in sulfur hexafluoride at pressure of 1 atm. *Tech. Phys.*, 61(9), 153–155. [In Russian].
3. Babich L.P., Loiko, T.V. (1985). Energy spectra and time parameters of the runaway electrons at a nanosecond breakdown in dense gases. *Tech. Phys.*, 55(5), 956–958. [In Russian].
4. Baksht E. H., Burachenko A. G., Kozhevnikov V. Y., Kozyrev A. V., Kostyrya I. D., Tarasenko V. F. (2010). Spectrum of fast electrons in a subnanosecond breakdown of air-filled diodes at atmospheric pressure. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43(30), 305201.
5. Tarasenko V. F., Orlovskii V. M., Shunailov S. A. (2003). Forming of an electron beam and a volume discharge in air at atmospheric pressure. *Russian Physics Journal*, 46(3), 325–327.
6. Baksht E. Kh., Burachenko A. G., Erofeev M. V., Lomaev M. I., Rybka D. V., Sorokin D. A., Tarasenko V. F. (2008). Nanosecond discharge in sulfur hexafluoride and the generation of an ultrashort avalanche electron beam. *Laser Phys.*, 18(5), 732–737.
7. Mesyats G. A., Korovin S. D., Sharypov K. A., Shpak V. G., Shunailov S. A., Yalandin M. I. (2006). Dynamics of subnanosecond electron beam formation in gas-filled and vacuum diodes. *Technical Physics Letters*, 32(1), 18–22.
8. Baksht E. K., Lomaev M. I., Rybka D. V., Tarasenko V. F. (2006). High-current-density subnanosecond electron beams formed in a gas-filled diode at low pressures. *Technical Physics Letters*, 32(11), 948–950.
9. Mesyats G. A., Reutova A. G., Sharypov K. A., Shpak V. G., Shunailov S. A., Yalandin M. I. (2011). On the observed energy of runaway electron beams in air. *Laser and Particle Beams-Pulse Power and High Energy Densities*, 29(4), 425–435.
10. Zhang C., Tarasenko V. F., Shao T., Beloplotov D. V., Lomaev M. I., Sorokin D. A., Yan, P. (2014). Generation of supershort avalanche electron beams in SF₆. *Laser and Particle Beams*, 32(2), 331–341.