

04.1

Коммутация высоковольтных импульсов в устройствах на основе открытого разряда в азоте и кислороде

© П.А. Бохан¹, П.П. Гугин¹, Д.Э. Закревский^{1,2,¶}, В.А. Ким¹, М.А. Лаврухин¹¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия² Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

¶ E-mail: zakrdm@isp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 25 июня 2020 г.

В окончательной редакции 9 июля 2020 г.

Принято к публикации 16 июля 2020 г.

Проведены сравнительные исследования коммутационных характеристик устройств на основе открытого разряда — кивотронов — в молекулярных газах (азоте и кислороде), а также в их смесях с гелием. Выбор азота и кислорода обусловлен тем, что коэффициенты эмиссии электронов под действием их тяжелых частиц намного выше, чем для гелия. Показано, что для этого случая, как и при преобладании фотоэлектронного механизма эмиссии в гелии, возможно создание быстродействующих ключей. Их преимуществом являются значительно меньшие требования к чистоте рабочей среды.

Ключевые слова: коммутация, открытый разряд, вольт-амперные характеристики.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.20.50152.18436

Создание разрядных устройств — ключей с субнано-секундным временем коммутации [1] — основано на новом подходе к эмиссионным свойствам катодов в газовом разряде, которые определяются модификацией поверхности рабочим газом. Модификация заключается в том, что при бомбардировке катода, например, ионами гелия с энергией ~ 150 eV концентрация атомов гелия в поверхностном слое в типичных газоразрядных условиях достигает плотности атомов в жидком гелии [2,3]. Эти результаты привели к переоценке роли фотоэмиссии в газовом разряде [4–7] и в конечном итоге к реализации быстродействующих ключей на основе открытого разряда с гелиевым заполнением — кивотронов [8]. В то же время известны работы, авторы которых придерживаются другой точки зрения. Как и в обычном аномальном разряде, считается, что эмиссия электронов в основном осуществляется под действием быстрых атомов и ионов [9–11], и этого достаточно для обеспечения наблюдаемых времен коммутации [11,12].

Для проверки возможности создания на этой основе быстродействующих ключей в настоящей работе проведено исследование коммутационных свойств кивотронов с гелиевым, азотным и кислородным заполнением. Согласно [3,5,13], коэффициенты эмиссии под действием ионов γ_i и быстрых атомов γ_f в разряде в чистом гелии намного ниже, чем в гелии и азоте в условиях легирования поверхностей катодов азотом [3,14]. Еще более высокие величины γ_i , γ_f можно ожидать для поверхностей, легированных кислородом в разряде в чистом кислороде [3]. Согласно данной этой работы, коэффициенты γ_i , γ_f определяются сечениями ионизации частиц рабочего газа, внедренных в катод, соответствующими быстрыми тяжелыми частицами, бомбардирующими катод. Среди He, N₂ и O₂ эти сечения наиболее

высоки для O₂ [14,15], что подтверждается измерениями энергетической эффективности генерации электронных пучков $\eta_w = \langle \gamma \rangle / (\langle \gamma \rangle + 1)$, где $\langle \gamma \rangle$ — суммарный коэффициент эмиссии электронов под действием тяжелых частиц. В гелии при $U = 4$ kV величина $\langle \gamma \rangle \approx 0.75$ [5] и ≈ 0.98 [13]. Для N₂ $\langle \gamma \rangle = 3.1$, для O₂ $\langle \gamma \rangle = 4.6$ исходя из величин $\eta_w = 0.76$ и 0.82 для N₂ и O₂ соответственно [3]. В то же время из-за особенностей энергетической структуры резонансное излучение в N₂ и O₂ значительно слабее, чем в гелии [3].

Исследования проведены в планарной геометрии ячейки с дрейфовым пространством (вставка на рис. 1) [8]. Она содержит два ускорительных промежутка с катодами из карбида кремния и анодными молибденовыми сетками с геометрической прозрачностью 92% и характерным размером отверстий $\delta = 1$ mm. Расстояние катод–анод $l = 3$ mm, диаметр активной части катодов $d = 28$ mm, расстояние между сетками 9 mm. Если сетки соединены вместе и на катоды подается отрицательный потенциал, то в ячейке генерируются встречные электронные пучки и она функционирует как ключ-кивотрон. Если одна или обе сетки и один из катодов соединены гальванически, то ячейка может функционировать в режиме открытого разряда с генерацией электронного пучка. В качестве рабочих сред использовались гелий с чистотой выше 99.999%, азот и кислород с чистотой 99.99%, а также смеси этих газов. Исследование вольт-амперных характеристик (ВАХ) проводилось при питании постоянным током. Исследование коммутационных характеристик осуществлялось при подаче на катоды импульсного напряжения от транзисторного генератора, который заряжал рабочие емкости $C = 2 \times 340$ pF при частоте регулярных импульсов ~ 200 Hz. Нагрузка с сопротивлением $R = 68 \Omega$ составлена из малоиндук-

тивных резисторов марки ТВО. Регистрация сигналов на рабочих емкостях, катодах кивотрона и с токовых шунтов проводилась с помощью омических делителей и осциллографа Tektronix MDO3104 с полосой пропускания 1 GHz.

На рис. 1 показаны ВАХ для случая, когда ячейка работает в режиме открытого разряда, т.е. сетки и один из катодов гальванически соединены и выполняют роль анода, а на второй катод подается отрицательный потенциал. В тщательно обезгаженных ячейках ВАХ в гелии имеют ярко выраженный Z-образный характер, как и в работе [16] для ячейки с титановым катодом с $d = 12\text{ mm}$ и расстоянием катод–сетка $l = 0.65\text{ mm}$. Чем чище условия, тем более глубокое падение тока реализуется при увеличении напряжения выше первого максимума тока. Для зависимости 1 остаточная суммарная концентрация фоновых примесей O_2 и N_2 находится на уровне $10^{-3}\%$. Зависимость 2 относится к случаю, когда их оценочная концентрация не превышает $10^{-5}\%$ от концентрации атомов гелия. В этих условиях падение тока по сравнению с первым максимумом достигает величины $\sim 10^3$. Z-образный характер ВАХ исчезает при уровне концентрации O_2 и N_2 порядка единиц $10^{-2}\%$ от концентрации атомов He. Для смесей с содержанием $\text{O}_2 \sim 0.2\%$ и $\text{N}_2 \sim 0.8\%$ ВАХ представлены зависимостями 3 и 4 соответственно. ВАХ в чистых газах O_2 и N_2 подобны зависимостям 3 и 4 и ВАХ для аномального разряда из работы [3].

Для функционирования открытого разряда важно выполнение условия $\delta \ll l$ [16], что предотвращает развитие тока с катода на коллектор. На вставке к рис. 2 при давлении гелия $p_{\text{He}} = 12\text{ Torr}$ показаны осциллограммы

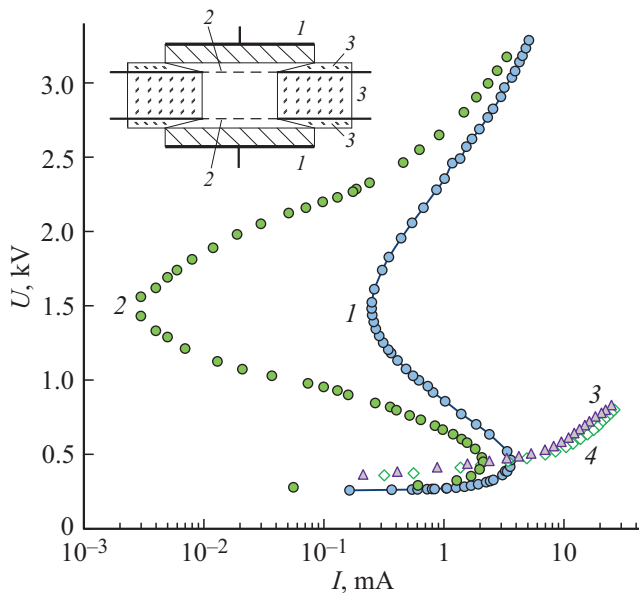


Рис. 1. ВАХ открытого разряда. 1, 2 — гелий, $p_{\text{He}} = 4\text{ Torr}$ (пояснения в тексте); 3, 4 — смеси: гелий ($p_{\text{He}} = 4\text{ Torr}$) с 0.2% кислорода (3) и гелий ($p_{\text{He}} = 4\text{ Torr}$) с 0.8% азота (4). На вставке — конструкция разрядной ячейки: 1 — катод, 2 — сетка-анод, 3 — диэлектрические изоляторы.

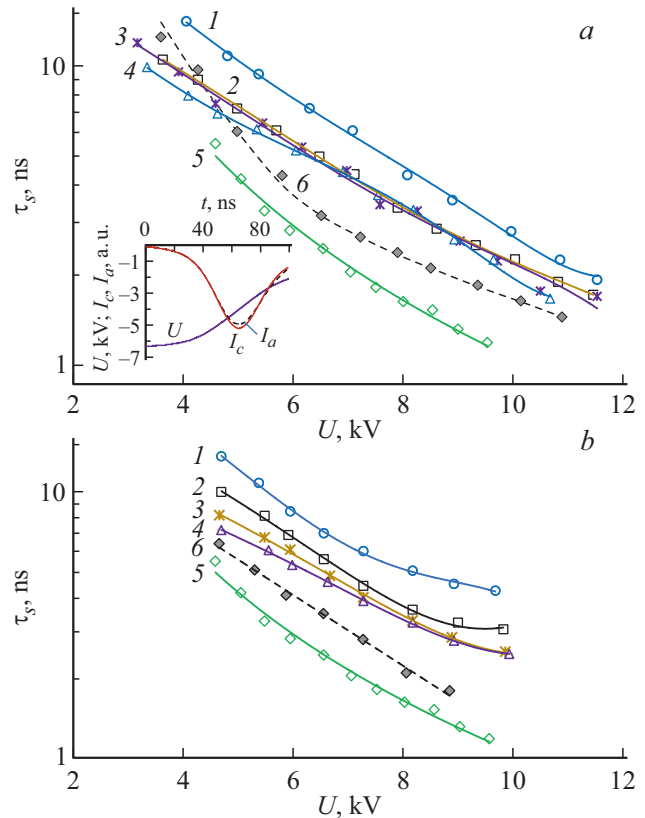


Рис. 2. Зависимости времени коммутации от напряжения $\tau_s(U)$ в кислороде, азоте, гелии и их смесях. *a* — кислород, давление кислорода $p_{\text{O}_2} = 1$ (1), 2 (2), 2.5 (3) и 3 Torr (4); гелий, $p_{\text{He}} = 14\text{ Torr}$ (5); смесь гелия ($p_{\text{He}} = 14\text{ Torr}$) с 0.2% кислорода (6). На вставке — осциллограммы напряжения на катоде U и токов с первой сетки-анода I_a и коллектора I_c , $p_{\text{He}} = 12\text{ Torr}$. *b* — азот, давление азота $p_{\text{N}_2} = 1$ (1), 1.5 (2), 2 (3) и 2.5 Torr (4); гелий, $p_{\text{He}} = 14\text{ Torr}$ (5); смесь гелия ($p_{\text{He}} = 14\text{ Torr}$) с 0.8% азота (6).

напряжения на катоде (U) и токов с первой сетки-анода (I_a) и коллектора (I_c), роль которого в этом варианте включения выполняют вторая сетка и второй катод. Спротивление токовых шунтов подбиралось таким образом, чтобы амплитуды сигналов с них были приблизительно равны. Видно, что ток анода и коллектора (т.е. ток электронного пучка) развивается синхронно, что свидетельствует о правильной организации разряда. Поскольку этот разряд обычно функционирует на левой ветви кривой Пашена, при $\delta > l$ в начальной фазе разряд может развиваться между катодом и коллектором, что часто является источником ошибок при интерпретации экспериментальных результатов [11].

Исследование коммутационных характеристик проводилось в режиме компрессии импульсов. По уровню 0.1–0.95 измерялось время подъема напряжения на рабочей емкости τ_d , по уровню 0.9–0.1 — время коммутации (время спада напряжения на кивотроне) τ_s . Также вычислялась степень компрессии импульсов $S = \tau_d/\tau_s$. На рис. 2, *a, b* показаны зависимости времени комму-

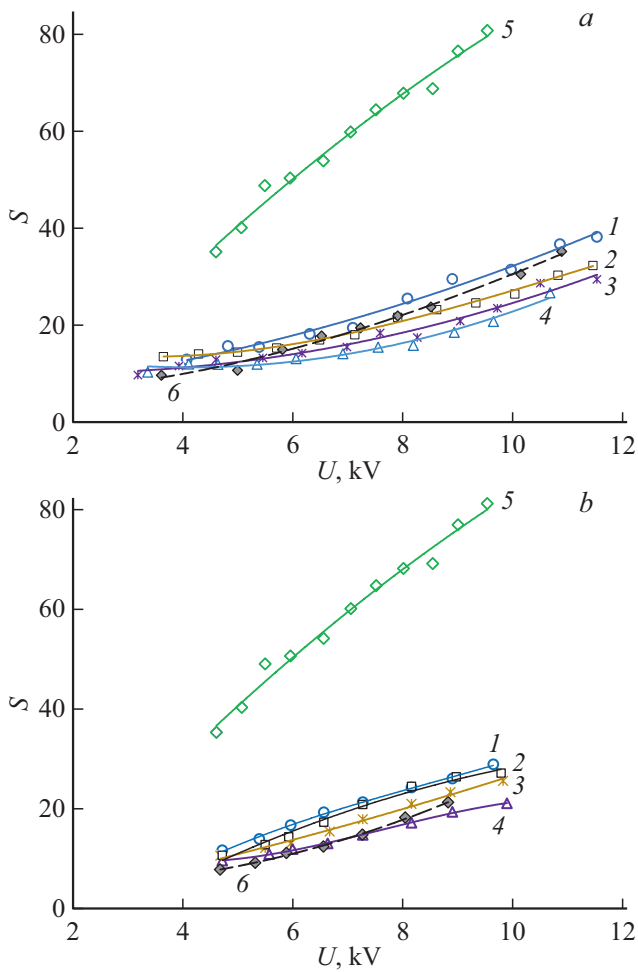


Рис. 3. Зависимости степени компрессии импульсов от напряжения $S(U)$ в кислороде, азоте, гелии и их смесях. *a* — кислород, давление кислорода $p_{O_2} = 1$ (1), 2 (2), 2.5 (3) и 3 Торг (4); гелий, $p_{He} = 14$ Торг (5); смесь гелия ($p_{He} = 14$ Торг) с 0.2% кислорода (6). *b* — азот, давление азота $p_{N_2} = 1$ (1), 1.5 (2), 2 (3) и 2.5 Торг (4); гелий, $p_{He} = 14$ Торг (5); смесь гелия ($p_{He} = 14$ Торг) с 0.8% азота (6).

тации от рабочего напряжения $\tau_s(U)$ для O_2 и N_2 соответственно. Для сравнения здесь же приведены зависимости $\tau_s(U)$ для чистого He и He с добавками O_2 и N_2 . На рис. 3, *a, b* показаны соответствующие зависимости $S(U)$.

Из полученных результатов в первую очередь обращает на себя внимание отличие ВАХ в чистом гелии от ВАХ в гелии с примесями молекулярных газов. Механизм этого отличия в настоящей работе и для открытого разряда в [16] и аномального разряда в [3] аналогичен и вызван переходом от нормального разряда к аномальному, а затем к разряду с убегающими электронами и формированию фотоэлектронного разряда в чистом гелии. При наличии примесей O_2 и N_2 происходит интенсивное расселение резонансного состояния He [3], а разряд поддерживается благодаря высокой величине $\langle \gamma \rangle$. Различие механизмов поддержания разряда приводит

к различию коммутационных характеристик приборов. Наличие „мертвой зоны“ в разряде в гелии (падающий участок зависимости $I(U)$) до $U = 2-2.5$ kV приводит к большей задержке развития разряда по сравнению со случаем O_2 и N_2 и соответственно к большей величине $S(U)$. Особенности механизмов горения приводят к различающимся зависимостям времени коммутации от давления газа. В гелии время коммутации $\tau_s \propto 1/p_{He}$ по крайней мере до величины $\tau_s \approx 100$ ps [7], в то время как для O_2 и N_2 уменьшение τ_s прекращается при давлении газа $\sim 2.5-3$ Торг (рис. 2, *a, b*). Совокупность этих особенностей приводит к тому, что одинаковое с гелием время коммутации в O_2 и N_2 достигается при значительно большем напряжении (рис. 2).

Подводя итог, можно заключить, что при доминировании эмиссии под действием тяжелых частиц возможна реализация быстродействующих ключей. Меньшие времена коммутации обеспечиваются в кислороде, имеющем более высокое значение $\langle \gamma \rangle$ по сравнению с азотом. Даже небольшие примеси этих газов в гелии гасят резонансное излучение, и поэтому для достижения одинаковых времен коммутации в N_2 , O_2 и гелии с их добавками требуется более высокое рабочее напряжение, чем в чистом гелии.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00069).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин М.А. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 7. С. 73–80. DOI: 10.1134/S1063785016040064
- [2] Дудка О.В., Ксенофонтов В.А., Мазилев А.А., Садапов Е.В. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 21. С. 52–59. DOI: 10.1134/S1063785013110035
- [3] Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин М.А. // Физика плазмы. 2019. Т. 45. № 11. С. 1022–1040. DOI: 10.1134/S0367292119100019
- [4] Fierro A., Moore Ch., Scheiner B., Yee B.T., Hopkins M.M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2017. V. 50. N 6. P. 065202. DOI: 10.1088/1361-6463/aa506c
- [5] Xu L., Khrabrov A.V., Kaganovich I.D., Sommerer T.J. // Phys. Plasmas. 2017. V. 24. N 9. P. 093511. DOI: 10.1063/1.5000387
- [6] Donkó Z., Hamaguchi S., Gans T. // Plasma Sources Sci. Technol. 2018. V. 27. N 5. P. 054001. DOI: 10.1088/1361-6595/aac301
- [7] Швейгерт И.В., Александров А.Л., Бохан П.А., Закревский Д.Э. // Физика плазмы. 2016. Т. 42. № 7. С. 658–670. DOI: 10.1134/S1063780X16070096

- [8] Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин М.А. // ЖТФ. 2015. Т. 85. В. 10. С. 50–57. DOI: 10.1134/S1063784215100096
- [9] Головин А.И., Голубев М.М., Егорова Е.К., Туркин А.В., Шлойд А.И. // ЖТФ. 2014. Т. 84. В. 5. С. 41–45. DOI: 10.1134/S1063784214050089
- [10] Туркин А.В. // ЖТФ. 2014. Т. 84. В. 11. С. 14–20. DOI: 10.1134/S1063784214110255
- [11] Сорокин А.Р. // УФН. 2018. Т. 188. № 12. С. 1354–1360. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.10.038360>
- [12] Карелин А.В., Сорокин А.Р. // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 6. С. 567–571. DOI: 10.1134/1.1947337
- [13] Hartmann P., Matsuo H., Ohtsuka Y., Fukao M., Kando M., Donkó Z. // Jpn. J. Appl. Phys. 2003. V. 42. Pt 1. N 6A. P. 3633–3640. DOI: 10.1143/JJAP.42.3633
- [14] Hayden H.C., Utterback N.G. // Phys. Rev. 1964. V. 135. N 6A. P. A1575–A1579. DOI: 10.1103/PhysRev.135.A1575
- [15] Utterback N.G. // Phys. Rev. 1963. V. 129. N 1. P. 219–224. DOI: 10.1103/PhysRev.129.219
- [16] Бохан П.А. // УФН. 2018. Т. 188. № 12. С. 1361–1366. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.04.038362>