

Исследование развития тока в энтроне и оптимизация его параметров для накачки лазеров

П.А. Бохан, П.П. Гугин, Д.Э. Закревский, В.А. Ким, М.А. Лаврухин,
И.В. Швейгерт

*Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН
630090, Новосибирск, Россия, пр. Академика Лаврентьева, 13, lavrukhin@isp.nsc.ru*

Представлены результаты экспериментальных исследований и моделирования развития тока в коммутаторах на основе щелевого разряда с плазменным катодом (энтронах). Продемонстрировано, что применение дополнительного ионизирующего импульса в катодной области коммутатора, а также увеличение частоты следования импульсов способствуют уменьшению двухстадийного характера нарастания тока. На примере лазера на парах меди показано влияние дополнительной ионизации катодной области энтрона на частотно-энергетические характеристики генерации.

Ключевые слова: разряд, энтрон, наносекундная коммутация, капиллярный разряд, лазеры на самоограниченных переходах, лазер на парах меди; eptron, nanosecond switching, capillary discharge, self-terminating lasers, copper vapor laser.

Введение

Одним из ключевых направлений улучшения частотно-энергетических характеристик лазеров на самоограниченных переходах является оптимизация генераторов накачки, направленная на формирование электронной температуры, обеспечивающей преимущественное заселение верхнего лазерного уровня. В частности, применение коммутаторов на основе открытого разряда (кивотронов) [1, 2], а также устройств с капиллярным или щелевым разрядом и плазменным катодом (энтронов) [3, 4] позволяет значительно увеличить среднюю мощность лазерного излучения. Это достигается за счет сохранения энергии импульсов генерации на высоких частотах следования, в отличие от применения менее быстродействующих коммутаторов, таких как тиратроны, IGBT- или MOSFET-модули с линиями магнитного сжатия [5–7].

Существенным недостатком энтронов является двухстадийный характер развития тока, приводящий к увеличению времени коммутации и снижению ее эффективности. Для решения этой проблемы предложены различные подходы, включая использование дополнительного ионизирующего импульса или работу на повышенных частотах повторения [8, 9]. В настоящей работе представлены результаты исследования начальной стадии развития тока в энтроне с целью улучшения частотно-энергетических характеристик лазеров на самоограниченных переходах при использовании энтронов в цепи их возбуждения.

Описание экспериментальной установки

Исследования начальной стадии развития тока и влияния вспомогательного ионизирующего импульса проводились на энтроне со щелевым разрядным каналом меандрического типа, имеющим сечение щели 1Ч15 мм и длину 50 мм. В первом варианте конструкции использовался полый катод из карбида кремния SiC длиной 24 мм с внутренним диаметром 28 мм, что соответствовало объему 15 см³. Во втором варианте применялся катод из нержавеющей стали SS с длиной 11 мм и внутренним диаметром 13 мм (объем 1,5 см³). Коммутация осуществлялась на омическую нагрузку R_L , сопротивление которой варьировалось в диапазоне от 0,1 до 5000 Ом. В качестве рабочих газов использовались гелий, неон, водород и их смеси.

Для изучения особенностей развития тока при различных частотах следования импульсов была разработана аналогичная конструкция, но с прямоугольной щелью размерами 60 × 6 × 0,15 мм. В этом случае катодный узел представлял собой полый цилиндр из нержавеющей стали с внутренним диаметром 2,2 см и длиной 10,2 см. В боковой поверхности цилиндра было выфрезеровано прямоугольное отверстие, в которое устанавливалась щелевая структура.

Частотно-энергетические характеристики лазера исследовались с использованием газоразрядной трубки (ГРТ) заполненной парами меди и неоном. Конструкция трубки с дополнительной нагревательной спиралью аналогична исследованной в [2]. Внутренний диаметр составлял 2 см, а межэлектродное расстояние — 50 см.

Все эксперименты проводились в режиме цуга импульсов с частотой следования цугов до 10 Гц. Количество импульсов в каждом цуге составляло от 10 до 50, а частота импульсов внутри цуга f изменялась в широких пределах — от единиц килогерц до 300 кГц. Электрическая схема для исследования параметров коммутаторов аналогична применявшейся в [8]. Регистрация всех измерений выполнялась с помощью осциллографа Tektronix MDO3104 с полосой пропускания 1 ГГц.

Экспериментальное исследование развития тока в эптроне

Исследование характеристик коммутации в эптроне для различных газов в диапазоне напряжений 5–30 кВ показало сходные закономерности. На рис. 1, *a* представлены осциллограммы напряжения на нагрузке $R_L = 100$ Ом для ячейки с SiC катодом при частоте импульсов 17,5 кГц и давлении водорода 1 Торр. В отсутствие иницирующего импульса наблюдается двухстадийный пробой: первая стадия характеризуется временем нарастания $\tau_1 \approx 1$ нс, вторая $\tau_2 \approx 1,5$ нс, при этом общее время нарастания составляет $\tau \approx 7–8$ нс. Применение дополнительного ионизирующего импульса сокращает это время до 3–4 нс и увеличивает скорость нарастания напряжения до 12–13 кВ/нс. В случае SS-катода или при повышенной энергии иницирующего импульса для SiC-катода стадии пробоя сливаются с временем нарастания $\approx 1,5–2$ нс. Введение балластного сопротивления 200 Ом разделяет стадии, воспроизводя картину, аналогичную случаю без иницирования.

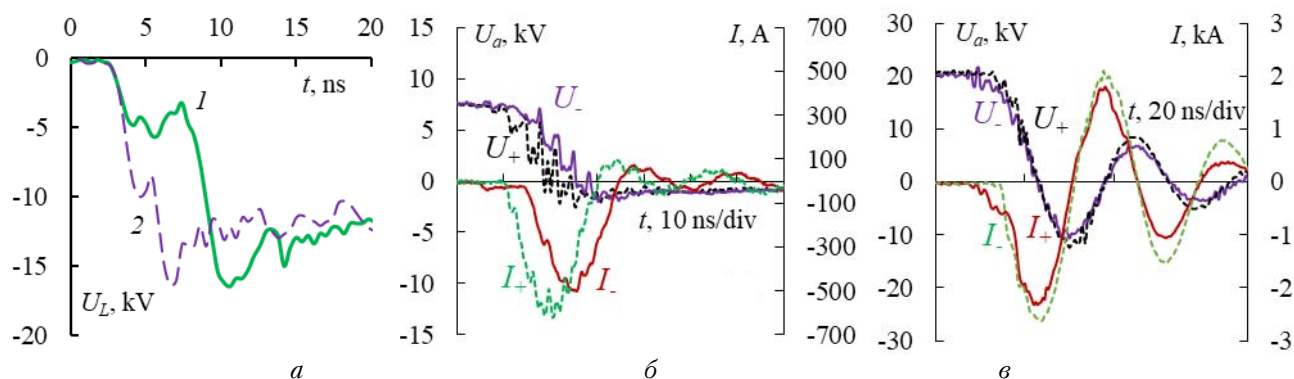


Рис. 1. Осциллограммы напряжения на нагрузке при $f = 17,5$ кГц с дополнительным ионизирующим импульсом (1) и без него (2) (*a*) и осциллограммы напряжения на аноде и тока через эптрон с дополнительным ионизирующим разрядом (U_+ , I_+) и без него (U_- , I_-), $R_L = 0,1$ Ом (*б*, *в*): *б* – ячейка с SiC катодом, $p_{H_2} = 2$ Торр, $f = 2,5$ кГц; *в* – ячейка с SS катодом, $p_{He} = 6$ Торр, $f = 10$ кГц

Исследование характеристик эптрона при работе на короткозамкнутую нагрузку $R_L = 0,1$ Ом выявило различные сценарии развития тока. Без предварительного иницирования наблюдаются три основных режима: быстрый рост тока за ~ 1 нс с последующим спадом в течение 5–10 нс; слабое изменение тока в течение ~ 10 нс после пробоя с последующим резким увеличением; сравнительно медленный рост в течение 5–10 нс с резким ускорением при высоких напряжениях. При включении иницирующего разряда стадии становятся практически неразличимыми, хотя начальная скорость нарастания тока оказывается вдвое ниже последующей.

Сравнение характеристик для разных катодных материалов показало, что в случае SiC-катода с меньшей начальной концентрацией электронов n_{e0} амплитуда колебаний тока значительно выше, чем для катода из нержавеющей стали, где нерегулярности тока практически отсутствуют. Увеличение давления рабочего газа и частоты следования импульсов приводит к подавлению колебаний и практически полному слиянию стадий пробоя.

Анализ осциллограмм напряжения и тока в гелии, неоне, водороде и их смесях показал, что скорость нарастания тока dI/dt превышает сотни А/нс. Наибольшие значения, достигающие 700 А/нс, наблюдаются в смеси He + H₂. При этом скорость роста тока увеличивается быстрее, чем приложенное напряжение, что свидетельствует об отсутствии существенного ограничения со стороны индуктивности разрядного контура (~ 50 нГн) и указывает на возможность достижения еще более высоких значений dI/dt .

Для конструкции эптрона с прямоугольной щелью проведены исследования зависимости рабочих параметров коммутатора от частоты следования импульсов в широком диапазоне $f = 5–100$ кГц. В частности, измерена задержка развития пробоя τ_{del} (рис. 2, *a*), видно, что τ_{del} слабо зависит от f при использовании гелия в качестве рабочего газа во всем измеренном диапазоне f . Представленная зависимость отличается от аналогичной для конструкций с капиллярами круглого сечения [9], где спад τ_{del} при увеличении f гораздо более значительный. Данная особенность является преимуществом выбранной конструкции, т.к. позволяет использовать первичный генератор с фиксированной длительностью зарядки во всем рабочем диапазоне частот.

Осциллограмма тока эптрона через эптрон при изменении ЧСИ перестает меняться после $f \sim 50$ кГц (рис. 2, *б*), при этом исчезает двухстадийный характер пробоя эптрона, наблюдающийся при низких значениях f . Таким образом при высоких ЧСИ отсутствует необходимость в применении дополнительного ионизирующего импульса, что упрощает схему генератора и повышает его общую эффективность.

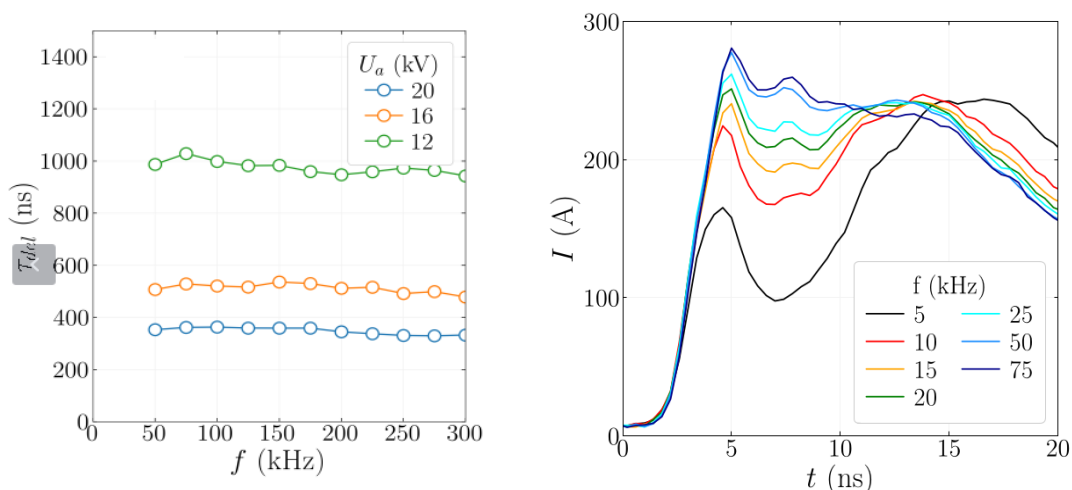


Рис. 2. Зависимости задержки развития пробоя τ_{del} от частоты следования импульсов f (а); осциллограммы начальной стадии развития тока через эптрон при различных частотах следования импульсов (б). $p_{He} = 4$ Торр, $R_L = 51$ Ом

Моделирование развития тока в эптроне

Для исследования природы пробоя и механизма возникновения колебаний было выполнено моделирование начальной стадии разряда. В условиях эптрона разряд развивается в разреженном газе внутри узкого канала, расширяющегося в катодную полость, что требует учета процессов на стенках капилляра и в переходной области между капилляром и катодом. Анод находящийся под положительным потенциалом, расположен в торцевой части диэлектрического капилляра (координата $z = 0$). Катодная полость с нулевым потенциалом расположена на расстоянии 60 мм. Часть капилляра экранирована проводящей поверхностью ($U = 0$). Применен комбинированный подход, сочетающий гидродинамическое и кинетическое описание плазмы, что необходимо для корректного учета высокоэнергетических электронов. Расчетная модель [10] включала уравнение Больцмана для электронов, уравнения непрерывности для заряженных частиц, уравнение Пуассона для электрического поля, а также учет поверхностных зарядов на стенках. Параметры моделирования: коэффициент вторичной электронной эмиссии $\gamma = 0-0,3$, начальная концентрация электронов $n_{e0} = 10^{11}-3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (в катодной полости) и 10^9 см^{-3} (в капилляре), давление гелия 4 Торр, напряжение на аноде до 20 кВ. Напряжение нарастало в течение 120 нс, а его снижение при появлении тока описывалось соотношением $U_a = U_0 - I \cdot R_L$, где $R_L = 65$ Ом.

На рис. 3 представлены распределения потенциала, концентрации электронов, скорости ионизации и средней энергии электронов в момент времени $\Delta t = 80$ нс при напряжении на аноде 12 кВ и начальной концентрации электронов $3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$. На фронте ионизации концентрация электронов достигает 10^{14} см^{-3} при средней энергии около 1 кэВ, что соответствует частоте ионизации $4 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$. Зависимость анодного тока от времени для различных начальных концентраций плазмы показана на рис. 4. Максимальный ток возрастает с увеличением n_{e0} от 170 до 210 А при времени нарастания 1,5 нс. Распространение ионизационного фронта происходит со скоростью $\approx 8 \cdot 10^7 \text{ см/с}$. На границе между капилляром и катодной полостью

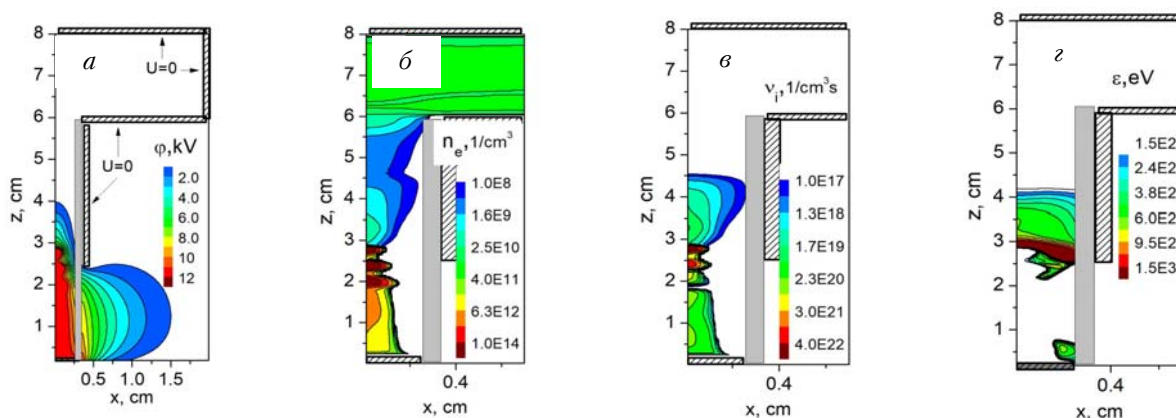


Рис. 3. Распределения электрического потенциала ϕ (а), концентрации электронов n_e (б), скорости ионизации v_i (в) и средней энергии электронов ϵ (г)

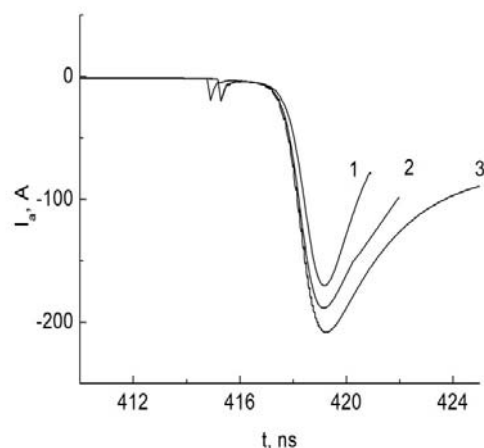


Рис. 4. Временные зависимости тока через эптрон, газ He, $U_a = 20$ кВ. Концентрация электронов в катодной полости: $n_{e0} = 3 \cdot 10^{11}$ (1); $3 \cdot 10^{12}$ (2); $3 \cdot 10^{13}$ (3) см^{-3}

формируется область пониженного потенциала, разделяющая плазменные образования. При приближении фронта к катодной полости распределение потенциала в капилляре становится близким к линейному, при этом в полости сохраняется квазинейтральная плазма. Интенсивная ионизация и рост концентрации плазмы наблюдаются в приграничной области. Изменение коэффициента вторичной эмиссии в исследованном диапазоне не оказывает существенного влияния на развитие разряда. Последующее увеличение тока ограничивается инерционностью процессов вторичной эмиссии с катода, что объясняет наблюдаемое запаздывание второго пика тока, согласующееся с экспериментальными данными.

Исследование частотных характеристик лазера на парах меди

Для лазера на парах меди ($\lambda = 510,5$ и $578,2$ нм) проведено исследование частотно-энергетических характеристик при накачке в схеме с применением эптрона, аналогичной использовавшейся в [4]. На рис. 5 представлены зависимости энергии последнего – 50-го лазерного импульса w_{last} в цуге и среднее значение

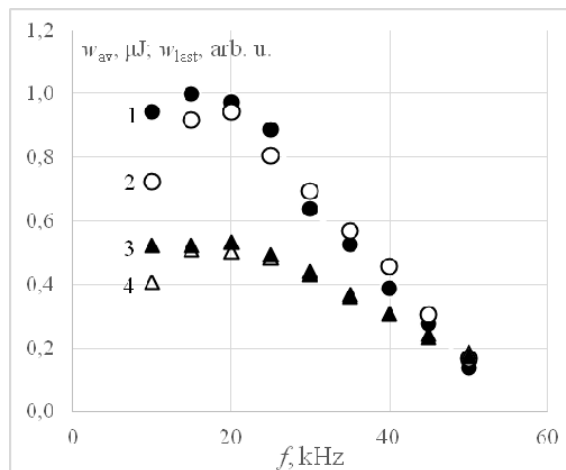


Рис. 5. Зависимости w_{last} (1, 2) и w_{av} (3, 4) от f при использовании дополнительного ионизирующего импульса эптрона и без него

энергии генерации для всех импульсов в течение цуга w_{av} . Данные получены в двух режимах – с использованием дополнительного ионизирующего импульса эптрона и без него. При ЧСИ менее 20 кГц заметно существенное влияние вспомогательного импульса эптрона, что, в частности, выражается в увеличении скорости нарастания тока на ГРТ в начале импульса возбуждения и большем значении энергии генерации. При $f > 20$ кГц энергии генерации в установившемся режиме практически w_{last} сравниваются.

Заключение

Проведенные исследования позволили оптимизировать параметры эптрона для достижения минимального времени коммутации, что особенно важно для повышения эффективности лазеров на самоограниченных

переходах. Установлено, что применение дополнительного ионизирующего импульса и выбор оптимальной конструкции катода позволяют сократить время нарастания тока и минимизировать двухстадийный характер пробоя. Моделирование подтвердило ключевую роль начальной концентрации электронов и скорости распространения ионизационного фронта в динамике разряда. При частотах следования импульсов выше 50 кГц достигается стабильный режим работы без необходимости использования вспомогательного ионизирующего импульса. Результаты экспериментов с лазером на парах меди показали, что оптимизированный эptron обеспечивает увеличение энергии генерации, особенно на низких частотах.

Благодарности. Работа поддержана Российским научным фондом, проект № 24–19–00037.

Финансирование. Часть исследования выполнена в рамках госзадания FWGW-2025-0019.

Список литературы

1. Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин М.А., Казарян М.А., Лябин Н.А. Влияние уменьшения длительности фронта импульса напряжения на частоту следования импульсов генерации лазера на парах меди // Квантовая электроника. 2013. Т. 43, № 8. С. 715–719.
2. Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин М.А. Частотно-энергетические характеристики Cu–Ne-лазера при различной длительности переднего фронта импульса возбуждения // Квантовая электроника. 2019. Т. 49, № 8. С. 749–753.
3. Lavrukhin M.A., Bokhan P.A., Gugin P.P., Zakrevsky Dm.E. 100-kHz RM calcium ion NIR laser // Optics & Laser Technology. 2024. V. 170. P. 110174.
4. Lavrukhin M.A., Bokhan P.A., Gugin P.P., Zakrevsky D.E. Self-terminating barium ion laser at 614.2 nm // Optics & Laser Technology. 2022. V. 149. P. 107625.
5. Metal vapour lasers: physics, engineering and applications / C.E. Little. Chichester New York: Wiley-VCH, 1999.
6. High-Brightness Metal Vapour Lasers: Volume I. Physical Fundamentals and Mathematical Models / V.M. Batenin, V.V. Buchanov, A.M. Boichenko, M.A. Kazaryan, I.I. Klimovskii. Taylor & Francis Group, 2016.
7. Methods and instruments for visual and optical diagnostics of objects and fast processes / G.S. Evtushenko. Nova Science Publishers, 2018.
8. Bokhan P.A., Lavrukhin M.A., Zakrevsky D.E. Influence of the cathode region preionization on the operating parameters of the eptron // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 2064. P. 012125.
9. Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин М.А. Частотные характеристики субнаносекундного плазменного коммутатора // Известия вузов. Физика. 2019. Т. 62, № 11. С. 92–95.
10. Bokhan P.A., Belskaya E.V., Gugin P.P., Lavrukhin M.A., Zakrevsky D.E., Schweigert I.V. Investigation of the characteristics and mechanism of subnanosecond switching of a new type of plasmas switches. II switching devices based on a combination of 'open' and capillary discharges—eptrons // Plasma Sources Science and Technology. 2020. V. 29. P. 084001.

P.A. Bokhan, P.P. Gugin, V.A. Kim, M.A. Lavrukhin, I.V. Schweigert, Dm.E. Zakrevsky. Study of current development in the eptron and optimization of its parameters for laser pumping.

The results of experimental studies and simulations of current development in slit discharge switches with a plasma cathode (eptrons) are presented. It is demonstrated that applying an additional ionizing pulse in the cathode region of the switch, as well as increasing the pulse repetition frequency, helps reduce the two-stage nature of current development. Using a copper vapor laser as an example, the influence of additional cathode region ionization in the eptron on the frequency-energy characteristics of the laser is shown.