Письма в ЖЭТФ, том 103, вып. 5, с. 402 – 407 © 2016 г. 10 марта

Проекционная рентгенография высокого разрешения острийного катода в сильноточном вакуумном диоде в излучении X-пинча

Е. В. Паркевич[+*1)], *И. Н. Тиликин*[+], *А. В. Агафонов*[+×], *Т. А. Шелковенко*[+], *В. М. Романова*[+], *А. Р. Мингалеев*[+], *С. Ю. Савинов*[+], *Г. А. Месяц*[+], *С. А. Пикуз*[+]

[+] *Физический институт им. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия*

[*] *Московский физико-технический институт, 141700 Долгопрудный, Россия*

[×] *Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 115409 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 20 января 2016 г.

Для исследования процессов, протекающих в сильноточном вакуумном диоде с катодом в виде одиночного острия из металлической проволочки диаметром 20–30 мкм, применен метод проекционной рентгенографии высокого разрешения в излучении гибридного X-пинча. Обнаружена сильная неоднородность энерговклада в материал проволочки, причем наименьший энерговклад наблюдался в районе конца острия, где напряженность электрического поля максимальна. Наблюдались жесткое рентгеновское излучение и выброс вещества с анода, что свидетельствует о генерации электронного пучка с параметрами, характерными для взрывной электронной эмиссии (ВЭЭ) в диоде с данной конфигурацией. Полученные данные свидетельствуют о сложных процессах, протекающих в диоде. Рассмотрены возможные сценарии их развития.

DOI: 10.7868/S0370274X16050131

Введение. Острийные эмиттеры служат источниками электронов в вакуумных диодах, в том числе сильноточных, которые широко используются для получения электронных пучков и рентгеновского излучения [1]. В основе работы сильноточных диодов лежит явление взрывной электронной эмиссии (ВЭЭ). Суть данного явления согласно абсолютному большинству имеющихся моделей заключается в быстром нагреве микрообъема поверхности катода, приводящем к его перегреву и взрыву. В результате формируется плазма, служащая источником электронов. При этом ВЭЭ предшествует стадия автоэлектронной эмиссии (АЭЭ) с микровыступов или микроострий на поверхности катода. При высокой напряженности электрического поля ($>10^8$ В/см) плотность тока АЭЭ с микроострий на катоде может достигать 10^9 А/см^2. В результате за время порядка 10^{-9} с за счет джоулева разогрева происходит взрыв этих микроострий. Взрыв сопровождается появлением плотного облака плазмы с плотностью вещества вблизи поверхности 10^{19}–10^{20} см^3, степень ионизации которого может быть невелика, но вполне достаточна для формирования сильноточных электронных пучков [1–3].

Целью данной работы было изучение динамики процессов, протекающих в диоде с геометрией острие–плоскость. Для визуализации процессов, протекающих в диоде, впервые был применен метод проекционной рентгенографии высокого разрешения [4–6]. Источником зондирующего излучения служила горячая точка (ГТ) гибридных X-пинчей [7]. Острие изготавливалось из тонких проволочек диаметром от 20 до 30 мкм из молибдена и меди. Следует отметить, что в использованной геометрии эксперимент в первом приближении может рассматриваться как модель процессов взрывной эмиссии микроострий.

Схема эксперимента. Эксперименты проводились на установке БИН (быстрый импульсный накопитель), позволяющей получать импульсы тока с амплитудой до 270 кА, фронтом импульса 100 нс при длительности 200 нс (по уровню 0.1) [6]. Схема эксперимента, в котором две нагрузки (источник излучения и объект исследования) питались от одного генератора, приведена на рис. 1а. Гибридный X-пинч (ГХП), используемый в качестве источника зондирующего излучения для проекционной рентгенографии, служил основной нагрузкой установки, через которую протекал весь ток генератора. Исследуемый диод помещался в цепи обратного тока. Через него протекало порядка трети выходного тока генератора.

1) e-mail: v754@rambler.ru

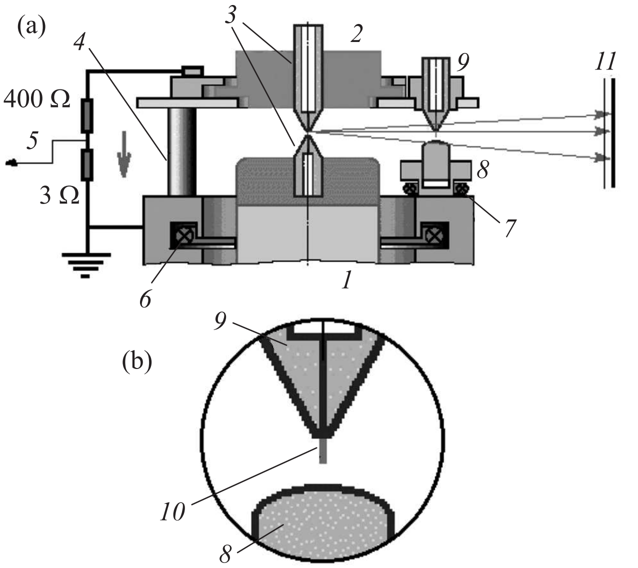

Рис. 1. Схема эксперимента на установке БИН (a) и схема исследуемого диода (b): *1* – катод основной нагрузки (гибридного X-пинча), *2* – анод основной нагрузки, *3* – W/Cu электроды, *4* – стержень цепи обратного тока, *5* – делитель напряжения, *6* – пояс Роговского-1 (регистрирует общий ток электрической цепи), *7* – пояс Роговского-2 (регистрирует ток, протекающий через исследуемый диод с острием), *8* – анод исследуемого диода, *9* – катод исследуемого диода, *10* – острие, *11* – фотопленка

Схема исследуемого диода с геометрией острие–плоскость приведена на рис. 1b. Острие изготавливалось из медной или молибденовой проволочки диаметром 20 или 30 мкм фирмы California Fine Wires с высоким качеством обработки поверхности. Плоский анод диаметром 8 мм был сделан из нержавеющей стали. Длина проволочек изменялась от 1 до 4 мм, величина зазора между концом проволочки и анодом – от 0 до 3 мм. Для лучшего электрического контакта проволочки припаивались к вершине латунного конуса, который являлся катодом исследуемого диода. Диод был установлен симметрично относительно двух латунных стержней диаметром 6 мм, служащих обратными токопроводами в нагрузке генератора БИН (рис. 1a). Выходной ток установки после протекания через основную нагрузку (X-пинч) разделялся на три части, одна из которых протекала через исследуемый диод. При этом конфигурация цепи обеспечивала жесткую синхронизацию исследуемого процесса с импульсом зондирующего излучения ГХП.

Откачка вакуумной камеры производилась турбомолекулярным насосом до давления 10^{-5} торр. Электрические сигналы с датчиков регистрировались цифровыми осциллографами Tektronix TDS 3054B с полосой пропускания 500 МГц. С помощью неинтегрирующих поясов Роговского измерялись производные токов, протекающих через гибридный X-пинч и через исследуемый диод. Расположение поясов Роговского показано на рис. 1a. Напряжение на анодной пластине основной нагрузки измерялось с помощью широкополосного делителя (см. рис. 1a), изготовленного из резисторов марки ТВО. В силу того что суммарная индуктивность стержней обратного тока была меньше индуктивности электродов исследуемого диода и в реальности делитель располагался на минимально возможном расстоянии от диода, показываемое им напряжение близко соответствовало напряжению на исследуемом диоде.

Для калибровки измерительной системы был использован дополнительный генератор ГВП-1 (зарядное напряжение до 20 кВ, максимальный ток 10 кА, скорость нарастания тока до 50 А/нс) [8, 9]. Импульс тока генератора через малоиндуктивный ввод подавался в вакуумную камеру установки БИН в цепь нагрузки, в которую дополнительно был включен калиброванный низкоомный коаксиальный шунт. Сопоставление калибровочных сигналов с поясов Роговского и шунта позволяло установить соответствующие коэффициенты пересчета и обеспечивало точность измерения токов не хуже 10 %.

Временные характеристики излучения ГХП контролировались алмазными датчиками с фотопроводимостью (ФПД) с фильтрами из титановой фольги толщиной 12.5 мкм и пленкой из лавсана толщиной 6 мкм, регистрирующими МРИ горячей точки ГХП. Для регистрации тормозного излучения в исследуемом диоде использовался кремниевый датчик (ППД) с фильтром из алюминиевой фольги толщиной 50 мкм и энергией отсечки 5 кэВ, расположенный на расстоянии 15 мм от острия. Датчик был изолирован свинцовым экраном, перекрывающим случайное попадание излучения от ГХП.

Рентгенограммы исследуемого диода с увеличением ×7.4 регистрировались на фотопленку Kodak DR. Пленка была закрыта от видимого света и для фильтрации излучения ГХП титановой фольгой толщиной 12.5 мкм и размещалась в кассете, закрепленной на боковой поверхности вакуумной камеры. Источником зондирующего излучения в данных экспериментах являлась горячая точка (ГТ) гибридного X-пинча с молибденовыми проволочками диаметром 25 мкм. Титановый фильтр имел окно пропускания в интервале энергий от 2.5 до 5 кэВ, что обеспечивало получение изображений в излучении континуума горячей точки X-пинча, там, где излучающая область последнего имеет минимальные размеры (порядка 1 мкм [10]). Пространственное разрешение изображений определялось дифракционным пределом, составляющим в нашем случае примерно 2–3 мкм. Чувствительность метода составляла 30 мкг/см^2 [11]. Время экспозиции (30–50 пс) определялось длительностью импульса рентгеновского излучения ГТ в используемом диапазоне энергий [12]. Момент регистрации изображения на рентгенограммах фиксировался по времени появления сигнала МРИ на ФПД. В гибридном X-пинче, как правило, наблюдалась одна ГТ, что соответствовало регистрации в эксперименте одного изображения. Однако иногда могли образовываться две (или более) ГТ, каждая из которых давала свое изображение. При этом несколько ГТ могли дать изображения сопоставимого качества. В тех случаях, когда они были достаточно разнесены во времени и в пространстве, удавалось наблюдать динамику процессов, т.е. система становилась многокадровой.

Экспериментальные результаты. Уже первые эксперименты, несмотря на то что еще не все измерения были отлажены надлежащим образом, дали неожиданный результат. На рис. 2 показаны рентгенограммы исследуемого диода, полученные при различных расстояниях от конца острия до анода. Острия были сделаны из молибденовой проволочки диаметром 20–35 мкм. При расстоянии порядка 1–1.5 мм на изображении (рис. 2a) не видно никаких изменений формы и размеров острия. Однако на аноде появился характерный отпечаток электронного пучка диаметром около миллиметра, а на изображении виден выброс анодного вещества. При уменьшении расстояния до 0.6–0.2 мм (рис. 2b) на изображении набюдается небольшое неравномерное расширение керна (остова) проволочки, причем самый конец острия (0.1–0.2 мм) остается неизменённым. При замыкании зазора (касании острием анода) остов проволочки имеет вид, характерный для экспериментов по взрыву проволочек в вакууме [13–15]. Естественно предположить, что в диоде формируется структура керн–корона и весь процесс разряда следует в основном сценарию взрыва проволочки. Однако и в этом случае взрыва конца острия не наблюдается. Не видно также выброса анодного вещества, что свидетельствует об отсутствии в данном случае интенсивного электронного пучка.

На рис. 3a приведена рентгенограмма острия из молибденовой проволочки диаметром 30 мкм, полученная на 63-й нс от начала импульса общего тока. Соответствующие сигналы с основных датчиков показаны на рис. 3b и c. Причина осцилляций на фронте импульса напряжения на исследуемом диоде и

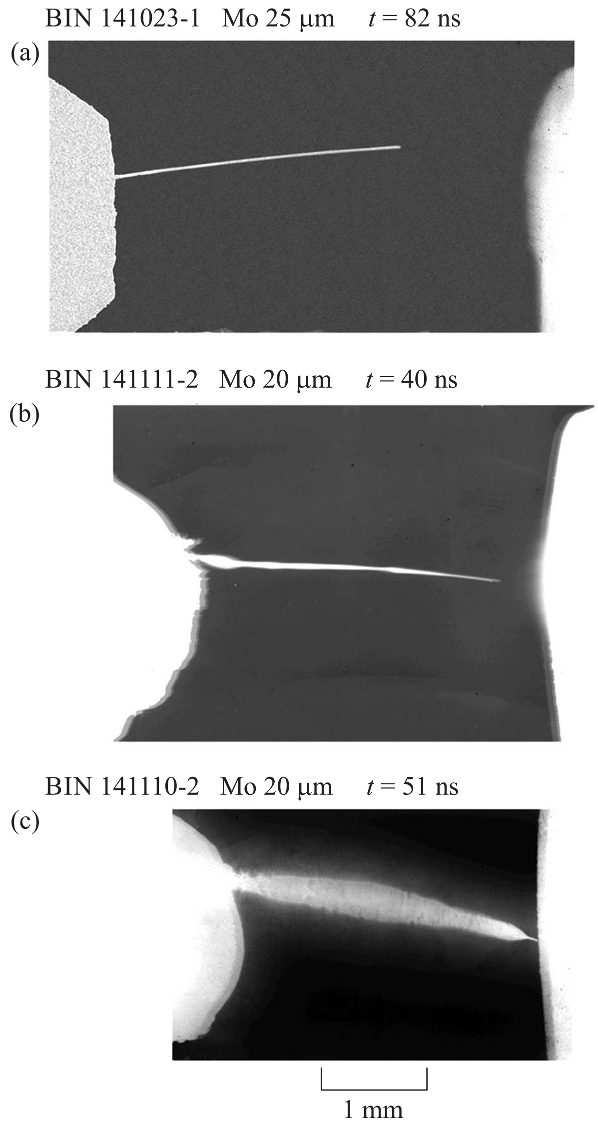

Рис. 2. Рентгенограммы острий из молибденовой проволочки при различных расстояниях до анода

рентгеновском сигнале пока неясна, поскольку они могут быть связаны с реальными осцилляциями тока как в нагрузках, так и в измерительной системе. Однако тот факт, что эти осцилляции начинаются синхронно, свидетельствует об их связи с процессами в системе.

На рентгеновском изображении диода хорошо виден выброс плотного вещества с анода, образующийся в результате действия ускоренного электронного пучка, а также в процессе последующего разогрева вещества на поверхности током, замыкающим ускоряющий промежуток. О присутствии ускоренного пучка в межэлектродном зазоре свидетельствует сигнал жесткого излучения с ППД (рис. 3b), который возникает и исчезает практически синхронно

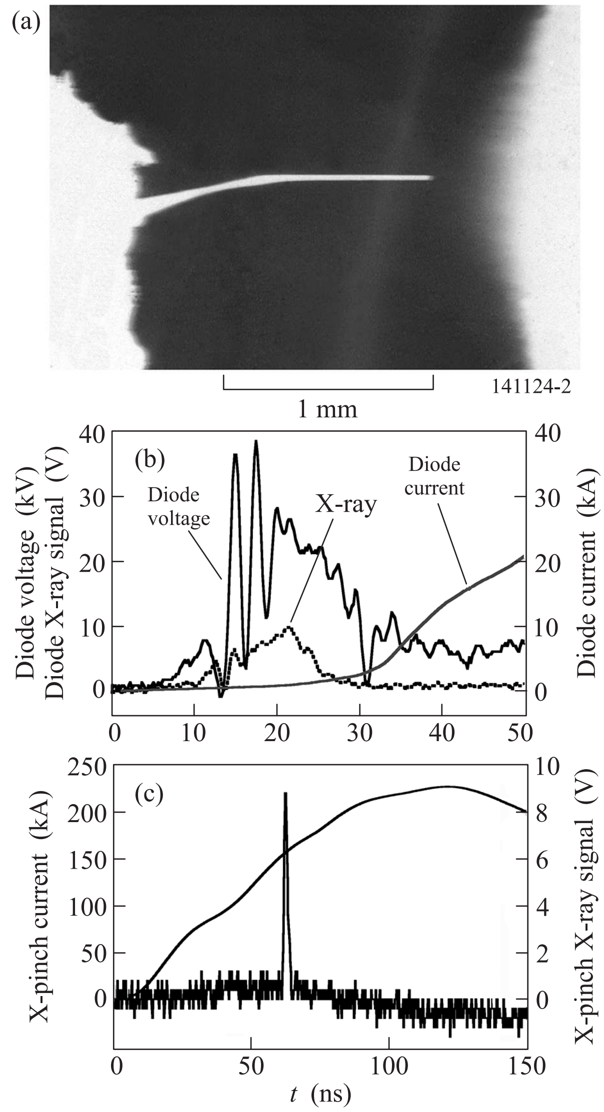

Рис. 3. (a) – Рентгенограмма острия из молибденовой проволочки диаметром 30 мкм на 63-й нс после начала импульса общего тока. Сигналы с основных датчиков: ток, напряжение и рентгеновское излучение исследуемого диода (b); ток и рентгеновский сигнал X-пинча (c)

с напряжением на диоде (5 и 30 нс соответственно). В течение указанного интервала времени ток, регистрируемый в диоде, возрастает от 41 А до 5 кА. Все это, как и отсутствие "пучкового" сигнала с ППД в более поздние моменты времени, говорит о перемыкании диода плазмой. Плазма, заполняющая диод, достаточно редкая. Поэтому она прозрачна для МРИ. В начальной стадии разряда определяющая роль в развитии пробоя должна принадлежать автоэлектронной эмиссии. Однако из-за небольшого расстояния от конца проволочки до анода (0.3–0.4 мм) ее влияние существенно ограничено по времени. Автоэлектронная эмиссия инициирует в ближайшей к аноду части, где напряженность электрического поля наиболее велика, нагрев и взрыв неоднородностей, мелкомасштабных по сравнению с диаметром проволочки, т.е. запускает процесс взрывной эмиссии. Перемыкание диода анодной плазмой первоначально происходит на участке поверхность анода–конец острия. Если проволочка к этому моменту времени находится в "холодном" состоянии, т.е. в состоянии, близком к первоначальному, система может перейти в режим "взрывающейся проволочки". Возросший ток начинает течь по проволочке. Происходит ее нагревание. Далее имеет место пробой по поверхности проволочки с образованием керна и короны [13–15]. В дальнейшем ток в основном течет по плазме короны. К моменту получения рентгенограммы исследуемого диода эмиссия электронов давно закончена, диод заполнен плазмой и по короне проволочки течет ток около 30 кА. Следует, однако, заметить, что такой сценарий справедлив при очень небольших зазорах острие–анод (порядка 0.1–0.5 мм).

Характерной особенностью изображения на рис. 3 (так же как и других аналогичных рентгенограмм) является неравномерность расширения керна проволочки. Диаметр проволочки заметно увеличивается по направлению к катоду, что свидетельствует о большем энерговкладе в проволочку в области, прилежащей к катоду. В данном случае средний диаметр расширенной катодной части острия составил около 65 мкм, а его обращенной к аноду части – 30 мкм (что совпадает с начальным диаметром острия). Таким образом, с точностью до погрешности измерения, составляющей ~ 3 мкм, можно утверждать, что со стороны анода проволочка не расширилась вообще, несмотря на то что изображение относится к достаточно позднему моменту времени, когда ее "собственный" взрыв должен был давно завершиться. Об окончании этого процесса, приводящего, как известно, к полной потере проводником проводимости и вытеснению тока из керна в окружающую плазму (шунтированию), свидетельствует заметное возрастание тока через диод с 83 до 514 А, происходящее приблизительно между 17-й и 22-й нс, т.е. задолго до момента получения рентгенограммы. Именно в это время, как было отмечено выше, начинается быстрое уменьшение сигнала с ППД, а плавное увеличение тока сменяется его резким ростом. Скорее всего, примерно в этот момент времени происходят образование плазменной перемычки между острием и анодом и пробой по поверхности проволочки, по которой начинает течь ток, что подтверждает большое значение тока. Наблюдаемому времени перемыкания (20–30 нс) соответствует скорость плазмы $(1-5)\cdot 10^6$ см/с, что является обычным для плазмы с температурой порядка десятка эВ.

Рентгенограммы взрыва острия из медной проволочки диаметром 20 мкм приведены на рис. 4a. Характерные сигналы с датчиков в этом выстреле

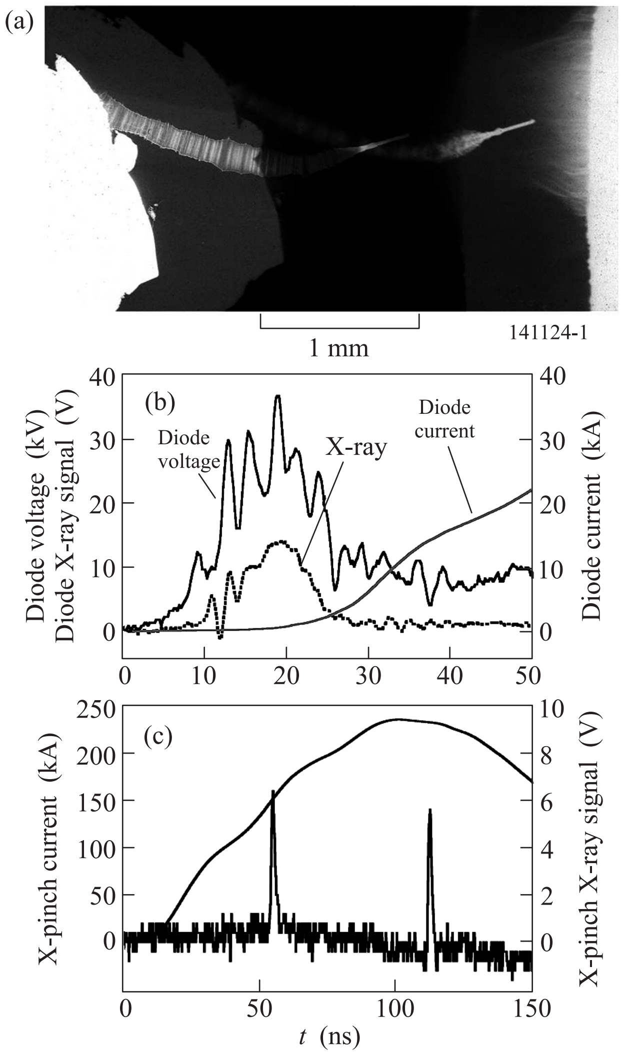

Рис. 4. (a) – Рентгенограммы острия из молибденовой проволочки диаметром 20 мкм на 55-й и 115-й нс после начала импульса общего тока. Сигналы с основных датчиков: ток, напряжение, рентгеновское излучение исследуемого диода (b); ток и рентгеновский сигнал X-пинча (c)

изображены на рис. 4b и c.

Особенностью данного кадра является наличие на нем двух изображений, разнесенных по времени на 60 нс. В этом случае в пинче сформировались две ГТ: первая на 55-й и вторая, чуть менее яркая – на 115-й нс после начала импульса общего тока. Из-за пространственного сдвига между источниками излучения на рентгенограмме хорошо видны две последовательные стадии взрыва острия. На раннем изображении керн имеет очень резкую границу, а также отчетливо выраженную систему поперечных страт. Структура керна в целом похожа на аналогичные структуры, образующиеся при взрыве одиночных проволочек и проволочных сборок [9, 16,]. Средний диаметр расширенной части керна составляет примерно 150 мкм независимо от расстояния от катода. К 115-й нс страты уже полностью разрушены, а границы становятся размытыми. При этом диаметр керна остается примерно тем же, что аналогично поведению кернов в проволочных сборках [17]. Резким на обоих изображениях является лишь ближайший к аноду участок проволочки длиной около 300 мкм. Его диаметр, как и в случае молибденового острия, практически не отличается от начального (20 мкм). Отметим также, что, как и в предыдущем выстреле, на изображении на рис. 4a виден выброс вещества из анода, т.е. в диоде генерируется электронный пучок. При этом длительность пучка, оцениваемая по длительности рентгеновского сигнала, составляет те же 15–20 нс.

Заключение. Полученные результаты свидетельствуют о том, что даже при сравнительно простой конфигурации в сильноточном диоде с острием имеют место сложные и разнообразные процессы: генерация электронного пучка, выброс вещества с анода, образование из проволочки структуры керн–корона, генерация рентгеновского излучения. При этом важным является тот факт, что конец острия длительное время сохраняет свою форму и местоположение, что свидетельствует об очень низком энерговкладе в проволочку в данной области. Объяснить последнее можно тем, что вблизи острия очень быстро образуется плазма, шунтирующая ток, протекающий по проволочке. Механизм образования этой плазмы пока не вполне ясен. Весьма вероятно, что он связан с автоэлектронной эмиссией с торца проволочки, а также с содержащихся на нем микроострий, так как напряженность электрического поля там максимальна. С точки зрения моделирования процессов ВЭЭ необходимы дальнейшие исследования, в частности с остриями меньших размеров.

Работа поддержана грантом РНФ 14-22-00273.

1. Г. А. Месяц, *Взрывная электронная эмиссия*, Физматлит, М. (2011), 280 с.
2. Г. А. Месяц, УФН **165**(6), 601 (1995).

3. С. И. Бугаев, Е. А. Литвинов, Г. А. Месяц, Д. И. Проскуровский, УФН **115**(1), 101 (1975).
4. T. A. Shelkovenko, S. A. Pikuz, A. R. Mingaleev, and D. A. Hammer, Rev. Sci. Instrum. **70**, 667 (1999).
5. С. А. Пикуз, Т. А. Шелковенко, Д. А. Хаммер, Физика плазмы **41**(4), 319 (2015).
6. С. А. Пикуз, Т. А. Шелковенко, Д. А. Хаммер, Физика плазмы **41**(6), 483 (2015).
7. Т. А. Шелковенко, И. Н. Тиликин, Г. В. Иваненков, В. Степниевски, А. Р. Мингалеев, В. М. Романова, А. В. Агафонов, А. Д. Кахилл, К. Л. Хойт, П. А. Гордан, Д. А. Хаммер, С. А. Пикуз, Физика плазмы **41**(1), 54 (2015).
8. С. И. Ткаченко, А. Р. Мингалеев, В. М. Романова, А. Е. Тер-Оганесьян, Т. А. Шелковенко, С. А. Пикуз, Физика плазмы **35**(9), 798 (2009).
9. В. М. Романова, Г. В. Иваненков, А. Р. Мингалеев, А. Е. Тер-Оганесьян, Т. А. Шелковенко, С. А. Пикуз, Физика плазмы **41**(8), 671 (2015).
10. B. M. Song, S. A. Pikuz, T. A. Shelkovenko, and D. A. Hammer, Appl. Optics **44**(12), 2349 (2005).
11. C. A. Pikuz, T. A. Shelkovenko, A. R. Mingaleev, D. A. Hammer, and H. P. Neves, Phys. Plasmas **6**, 4272 (1999).
12. С. А. Пикуз, Т. А. Шелковенко, Д. Б. Синарс, Д. А. Наммер, Физика плазмы **32**(12), 1106 (2006).
13. Г. В. Иваненков, А. Р. Мингалеев, С. А. Пикуз, В. М. Романова, Т. А. Шелковенко, В. Степневски, Д. А. Хаммер, ЖЭТФ **114**, 1215 (1998).
14. S. A. Pikuz, T. A. Shelkovenko, D. B. Sinars, J. B. Greenly, Y. S. Dimant, and D. A. Hammer, PRL **83**(21), 4313 (1999).
15. D. B. Sinars, M. Hu, K. M. Chandler, T. A. Shelkovenko, S. A. Pikuz, J. B. Greenly, D. A. Hammer, and B. R. Kusse, Phys. Plasmas **8**(1), 216 (2001).
16. С. Ю. Гуськов, Г. В. Иваненков, А. Р. Мингалеев, С. А. Пикуз, Т. А. Шелковенко, Д. А. Хаммер, Письма в ЖЭТФ **67**(8), 531 (1998).
17. T. A. Shelkovenko, S. A. Pikuz, J. D. Douglass, I. C. Blesener, J. B. Greenly, R. D. McBride, D. A. Hammer, and B. R. Hammer, Phys. Plasmas **14**, 102702 (2007).