

УДК 533.95

ОБ ИСТОЧНИКАХ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОМ ДИОДЕ

Коробкин Ю.В., доцент, МГТУ МИРЭА. E-mail: korobkin@mirea.ru

Романов И.В., снс, Физический институт РАН. E-mail: laser.plasma@gmail.com

Москва, Россия

Аннотация. Цель работы – экспериментальное исследование формирования микропинчей и источников рентгеновского излучения в низковольтных лазерно-индуцированных разрядах с высокой скоростью нарастания тока.

Ключевые слова: плазма; разряд; рентген; микропинч; вакуум; лазер.

ABOUT SOURCES OF X-RAY RADIATION IN THE LASER-PLASMA DIODE

Korobkin Yu.V., assoc. prof., MSTU MIREA, E-mail: korobkin@mirea.ru

Romanov I.V., senior staff scientist, LPI RAS, E-mail: laser.plasma@gmail.com

Moscow, Russia

Abstract. The work purpose is an experimental study of formation micropinches and sources of X-ray radiation in the low-voltage laser induced discharges with high velocity of current rise.

Keywords: plasma; discharge; x-ray; micropinch; vacuum; laser.

1. Постановка задачи и цель работы

Вакуумные разряды, являясь эффективными источниками ионов и рентгеновского излучения, широко исследуются в физике высокотемпературной плазмы на протяжении последних десятилетий. Известно, что в мощных искровых разрядах (при токе $I \geq 100$ кА, скорости его нарастания $dI/dt \geq 10^{11}$ А/с и напряжении $U \geq 10$ кВ) источником корпускулярных потоков и рентгеновского излучения является «горячая точка», возникающая под действием пинч-эффекта в столбе металлической плазмы, перемикающем межэлектродный промежуток [1,2].

Другим типом источников рентгеновского излучения и ускоренных частиц является *бестоковая* плазменная струя, образующаяся при облучении поверхности мишени мощным лазерным импульсом, где нагрев и ускорение частиц плазмы обусловлены поглощением энергии светового импульса. В работе [3] было показано, что если приложить напряжение между мишенью (в качестве катода) и другим электродом (в качестве анода), то в такой лазерно-индуцированной, но уже *токонесущей* плазменной струе также формируются горячие точки, являющиеся источником рентгеновского излучения в диапазоне энергий 0.1 – 10 кэВ. Подчеркнем, что горячие точки в данном случае регистрировались в катодных микроструях на

расстоянии несколько десятков микрон от поверхности катода в при разрядных токах в десятки ампер.

Лазерно-индуцированные вакуумные разряды с относительно небольшими значениями амплитуды тока, напряжения и энергии накопителя (≈ 10 кА, ≤ 20 кВ и 20 Дж соответственно) исследовались авторами в работах [4,5]. Были обнаружены образование горячих точек (микропинчей), являющихся источниками мягкого рентгеновского излучения, а также генерация электронных пучков, бомбардирующих анод. Как и в работе [3], микропинчи формировались в начальной стадии разряда, когда плазма существовала в виде расширяющейся в межэлектродный промежуток катодной струи. При этом, в отличие от «классических» искровых разрядов [1,2], ток разряда в момент образования микропинча был существенно меньше амплитудного значения и составлял лишь около 1 кА.

Целью данной работы было выяснение условий формирования источников рентгеновского излучения и микропинчей в катодной струе лазерно-индуцированного вакуумного разряда и зависимости их параметров от амплитуды разрядного тока и энергии инициирующего лазерного импульса.

2. Схема эксперимента и экспериментальные результаты

Исследования проводились на лабораторной установке, состоящей из вакуумного диода, лазерной системы на неодимовом стекле (длина волны 1,06 мкм), функционирующей в режиме синхронизации мод (энергия импульса $\leq 0,5$ Дж, длительность – 30 пс), диагностических устройств для измерения электрических характеристик разряда и рентгеновского излучения [5]. Ток в разрядной цепи поддерживался накопительной емкостью 0,1 мкФ, заряжаемой до +20 кВ. Общая индуктивность разрядного контура была измерена в режиме короткого замыкания и составляла ~ 120 нГн. Полупериод колебаний тока соответствовал 0,35 мкс. Иницирование разряда осуществлялось излучением лазера, сфокусированным на плоском титановом (Ti) катоде в пятно с диаметром 100 мкм. Титановый анод имел форму конуса с диаметром острия 250 мкм. Межэлектродное расстояние изменялось в диапазоне 1-30 мм. Диод располагался в объеме, где поддерживался вакуум $\sim 10^{-5}$ Торр. Схема эксперимента приведена на рис. 1.

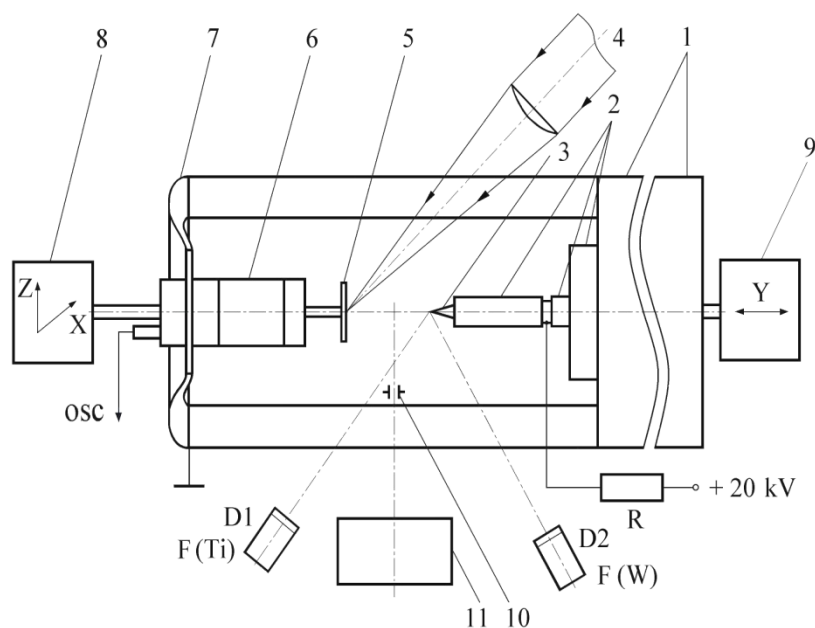


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 - конденсатор емкостью 0,1 мкФ; 2 - диэлектрические вставки; 3 - конический титановый анод; 4 - лазерный луч с $\lambda=1,06$ мкм.; 5 - плоская титановая мишень – катод; 6-коаксиальный шунт 17 мОм; 7 – гибкие токовые подводы; 8,9 – шаговые координатные двигатели; 10 – камера-обскура; 11- система визуализации рентгеновского излучения разрядного промежутка на основе МКП и CCD – камеры; D1 - p-i-n диод с Ti фильтром; D2 - p-i-n диод с W фильтром; R – зарядовое сопротивление - 100МОм.

В ходе проведения экспериментов исследовались временные зависимости тока, рентгеновского излучения анода, пространственное распределение рентгеновского излучения из межэлектродного промежутка в широком диапазоне энергий лазерного импульса [6,7]. Ток разряда измерялся цилиндрическим шунтом с сопротивлением 17 мΩ, установленным в катодном узле, и, в дифференциальном режиме, поясом Роговского на аноде диода и не превышал 10 кА. Измерения выхода и временной структуры рентгеновского излучения осуществлялись с помощью кремниевого *p-i-n* диода с относительной спектральной чувствительностью ~ 1 в диапазоне (1-10) keV, закрытого титановым фильтром толщиной $h = 15 \mu\text{m}$ (пропускающего рентгеновские кванты с энергией $E \geq 2 \text{ keV}$, т.е. тормозного и характеристического излучения Ti). *P-i-n* диод располагался навстречу аноду под углом 30° к геометрической оси вакуумного диода. Геометрия эксперимента исключала возможность регистрации рентгеновской эмиссии из лазерной плазмы. Сигналы регистрировались осциллографом Tektronix TDS5054 В с полосой пропускания 500 МГц.

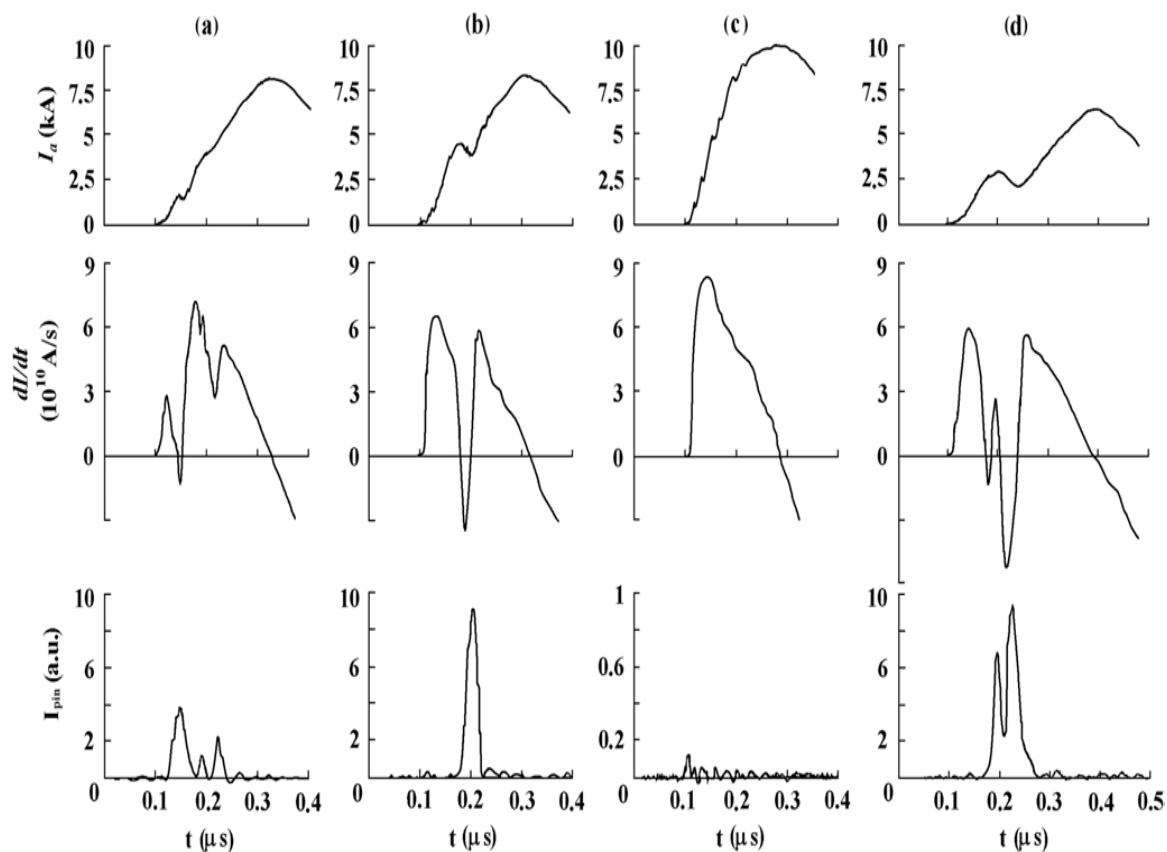


Рис. 2. Осциллограммы разрядного тока (верхний ряд), производной тока (средний ряд) и сигнал от рентгеновского детектора (нижний ряд) при $U = 18$ кВ, $d = 4$ мм и энергии лазерного импульса $W = 1$ мДж (a), 8 мДж (b) и 500 мДж (c); $d = 10$ мм и энергия лазерного импульса $W = 11$ мДж (d).

На рис. 2. представлены временные зависимости тока разряда, его производной и рентгеновского излучения. Анализ осциллограмм показывает, что рентгеновское излучение генерируется в начальной стадии разряда вблизи максимума производной тока. При этом следует заметить, что первый рентгеновский импульс генерируется вследствие бомбардировки анода электронами, эмитированными из лазерной плазмы [6]. Однако вследствие его малой амплитуды, реализующейся при выбранных условиях эксперимента, на осциллограммах он практически не различим.

При энергиях лазерного импульса ($Q \leq 3$ мДж) излучение генерируется в виде последовательности «вспышек», коррелирующих с особенностями на производной тока (Рис. 2.(a)). Варьирование длины разрядного промежутка приводит как к увеличению вероятности генерации нескольких рентгеновских импульсов при увеличении длины, так и, наоборот, к ее уменьшению при уменьшении длины. Увеличение энергии лазерного импульса приводит к снижению вероятности генерации нескольких рентгеновских импульсов, к уменьшению их амплитуды и к увеличению задержки момента их генерации относительно поджига разряда (Рис. 2.(b)). Рис. 2.(c) демонстрирует отсутствие существенных особенностей на производной тока и

генерации рентгеновского излучения соответственно при инициировании разряда лазерным импульсом с $Q = 500$ мДж. При этом видно, что увеличение энергии лазерного импульса с 1 до 500 мДж приводит к увеличению dI/dt в 1,3 раза. На рис. 3. приведены экспериментальные зависимости времени задержки генерации рентгеновского импульса и его амплитуды в относительных единицах от энергии лазерного излучения.

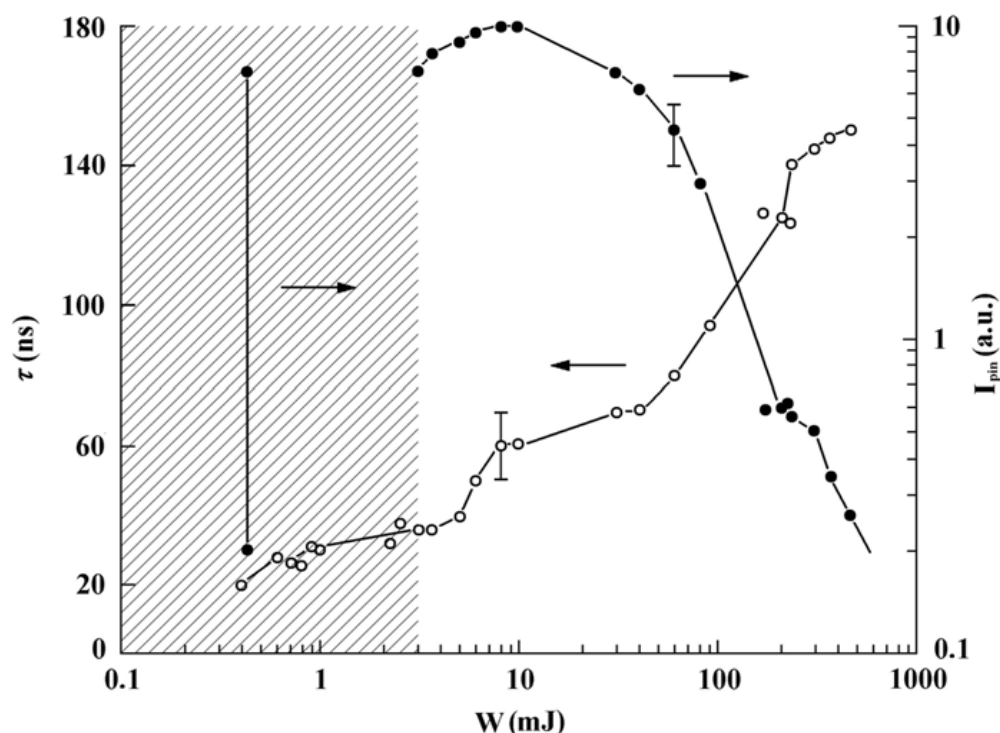


Рис. 3. Зависимости амплитуды рентгеновских импульсов и их задержки относительно момента инициации разряда от энергии лазерного импульса при $U = 18$ кВ and $d = 4$ мм. В заштрихованной области приведены данные для серий из 5 рентгеновских импульсов, причем задержка приведена для первого импульса в серии.

Изображения разрядного промежутка в рентгеновском диапазоне излучения (Рис. 4.) визуализировалось с помощью многоканальной камеры-обскуры и регистратора на основе микроканальной пластины и считывалось с выходного экрана (волоконно-оптической пластины) CCD-камерой. В качестве фильтров использовались полимерные пленки (формвар, полипропилен, полиэтилен) разных толщин, позволяющие, в том числе, регистрировать рентгеновские кванты с $E \geq 50$ эВ. Отверстие камеры-обскуры с диаметром $100 \mu\text{m}$ было выполнено в пластине тантала (Ta) толщиной $h = 300 \mu\text{m}$.

Однако получать контрастные изображения разрядного промежутка удавалось лишь при напряжениях на накопителе ≤ 10 кВ, так как при его увеличении

существенно возростала энергия квантов жесткой компоненты рентгеновского излучения, что вызывало сильную фоновую засветку.

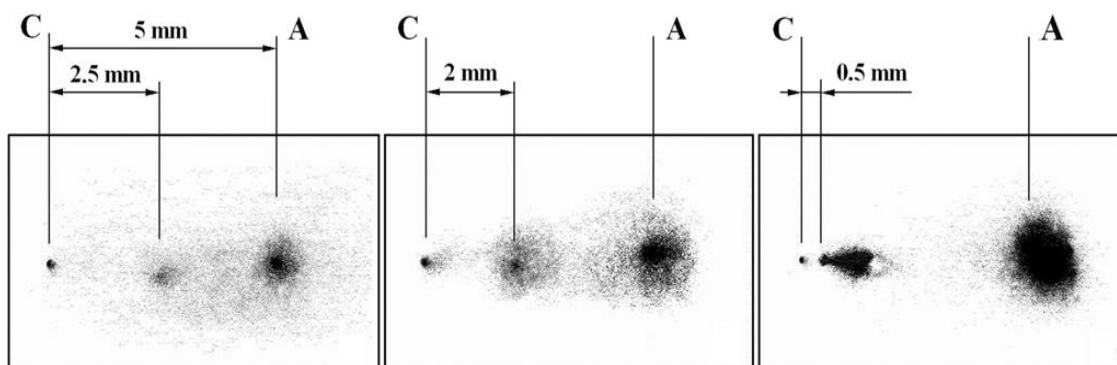


Рис. 4. Рентгеновские изображения разрядного промежутка при энергии квантов более 50 эВ, энергии лазерного излучения $W = 2\text{мДж}$ и амплитуде разрядного тока I_a равного 0.7 кА (a); (b) 1.5 кА и (c) 5 кА.

Полученные изображения показали присутствие одного или нескольких дополнительных источников мягкого рентгеновского излучения, что свидетельствует о возможности возникновения «горячих» областей в плазме катодного факела вследствие действия пинч-эффекта. Из рис. 4. видно, что при $U = 1,25\text{ кВ}$ (амплитудное значение тока $\approx 0,7\text{ кА}$) область излучения имеет вид размытого пятна, расположенного на расстоянии 2,5 мм от катода. Уменьшение напряжения приводит к исчезновению излучающей области. Повышение U от 1,25 до 10 кВ ($\approx 5\text{ кА}$) приводит к возрастанию интенсивности излучения и к увеличению вероятности возникновения нескольких источников. При этом происходит смещение области излучения в сторону катода на расстояние 0,5 мм от него. Количество и интенсивность излучения источников коррелируют с количеством и амплитудой рентгеновских импульсов, регистрируемых $p-i-n$ диодом, возникающих под действием электронных пучков, формируемых в перетяжках катодной струи. Методом фильтров установлено, что при вышеуказанных параметрах разряда и лазерного излучения, скорости нарастания тока $\leq 3 \cdot 10^{10}\text{ А/с}$ максимальная энергия рентгеновских квантов, излучаемых перетяжками, не превышает 200 эВ. В свою очередь, увеличение энергии лазерного импульса приводит к смещению положения перетяжки в сторону анода, снижению ее температуры и при $Q = 500\text{ мДж}$ пинчевание катодной струи не наблюдается.

Заключение

Проведены экспериментальные исследования влияния характеристик лазерной форплазмы на условия формирования катодной струи. Показано, что образование в

струе микропинчевых структур, являющихся источниками мягкого рентгеновского излучения и пучков ускоренных электронов, наблюдается в случае, когда амплитуда разрядного тока и энергия инициирующего лазерного импульса лежат в определенном диапазоне величин. Параметры микропинчей: их локализация в межэлектродном промежутке, степень сжатия плазмы, а также интенсивность рентгеновского излучения и пучков ускоренных электронов, в широком диапазоне величин контролируются энергией инициирующего лазерного импульса и амплитудой разрядного тока.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 15-02-03757) и Минобрнауки (госзадание вузам, проект № 11.144.2014).

Список литературы

1. C.R. Negus, N. J. Peacock. Local regions of high-pressure plasma in a vacuum spark. // J. Phys. D: Appl. Phys. - 1979. - vol.12.-№1.- pp. 91-112.
2. K.N. Koshelev, N.R. Pereira. Plasma points and radiative collapse in vacuum sparks // J. Appl. Phys. -1991. - vol.69. - No.10. - pp. R21-44.
3. Nadja Vogel. The X-ray radiation from vacuum discharges at comparatively low applied voltages // Physics Letters. 1998. - A 248. – V.5-6. - P. 405-411
4. Yu.V. Korobkin, I.V. Romanov, A.A.Rupasov, et al. Hard X-ray emission in laser-induced vacuum discharge // Laser and Particle Beams.- 2005. - vol.23. - pp. 333-336.
5. Ю.В. Коробкин, И.В. Романов, А.А. Рупасов, А.С. Шиканов. Неустойчивости вакуумного разряда при лазерном инициировании катодного пятна // Журнал технической физики. - 2005. - Т. 75. - No.9. - С. 34-40.
6. A.A. Erokhin, A.S. Kisinets, Yu.V. Korobkin et al. Analysis of characteristic X-ray generation induced by laser plasma electrons accelerated by an electric field. // JETP. – 2001. - vol.92. No. 6. - pp.998-1003.
7. Yu.V. Korobkin. Physics of fast laser-induced vacuum discharge. - IRNANO-2009. –Delhi. - PP.145-147