

## Спектры излучения плазмы в оптическом диапазоне при скиновом взрыве проводников в мегагауссных магнитных полях

*И.М. Дацко<sup>1,\*</sup>, С.А. Чайковский<sup>2</sup>, А.Г. Русских<sup>1</sup>, В.А. Ванькевич<sup>1</sup>, А.С. Жигалин<sup>1</sup>,  
В.И. Орешкин<sup>1</sup>, А.М. Кузьминых<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup>Институт Электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

\**datsko@vpe.hcei.tsc.ru*

**Абстракт.** На тераваттном генераторе МИГ при наносекундном взрыве цилиндрических и плоских проводников получены интегральные спектры излучения в оптическом диапазоне и спектры с временным разрешением. На интегральных спектрограммах, полученных за все время излучения плазмы при взрыве Cu и Al проводников с начальным диаметром 3 мм, на фоне сплошного спектра в диапазоне длин волн 200–1100 нм присутствуют спектральные линии вещества проводника различной степени ионизации. На временной зависимости спектра излучения таких же проводников при временной развертке 500 нс линейчатое излучение в видимом диапазоне отсутствовало.

**Ключевые слова:** электрический взрыв проводников, спектры излучения, нагрев плазмы.

### 1. Введение

Интерес к электрическому взрыву проводников связан с различными приложениями. Во-первых, это генерация сильных магнитных полей [1–3], в которых при индукции выше 1 мегагаусса превышаются все прочностные и тепловые пределы для всех известных материалов. Во-вторых, сжатие в геометрии Z-пинча тяжелых металлических лайнеров, внутри которых могут быть реализованы экстремальные состояния с давлениями 1÷100 Мбар [2, 4]. В-третьих, исследования по транспортировке электромагнитной энергии в передающих магнито-изолированных линиях, которые будут использоваться в разрабатываемых мультитераваттных генераторах [5, 6–8].

### 2. Методика экспериментов

Эксперименты по электрическому взрыву проводников проводились на сильноточном генераторе тераваттного диапазона МИГ при уровне тока до 2.5 МА и фронте его нарастания до 100 нс [1]. Импульс тока в нагрузке имеет предимпульс, который начинается примерно за 250 нс до начала основного импульса, нарастает приблизительно линейно и достигает значений 3% от амплитуды основного импульса. При работе генератора МИГ с нагрузками в виде Z-пинчей длиной более 1 см, примерно на максимуме обратной полуволны напряжения на них, происходит перекрытие вакуумной поверхности проходного изолятора вода-вакуум. Вследствие «захвата» магнитного потока в вакуумной передающей линии, ток нагрузки на 130÷150-ой нс приобретает форму слабо спадающей экспоненты с характерным временем спада несколько микросекунд.

Диагностика, использованная в экспериментах, включала в себя электротехнические измерения тока и напряжения. Для получения изображения проводников в видимом диапазоне спектра в различные моменты времени от начала протекания тока использовалась четырехкадровая оптическая камера HSFC Pro с минимальной длительностью экспозиции одного кадра 3 нс (п.2 на рис. 1). Интегральные по времени спектры в диапазоне 200–1100 нм регистрировались спектрометром VISIO2GO VISNIR с спектральным разрешением 2 нм и с регулируемой выдержкой 10 мкс – 4000 мс. Спектральные измерения с временным разрешением производились с помощью камеры «Universal streak camera C10910-05 Hamamatsu Photonics», синхронизированной с установкой МИГ. В эту камеру был установлен спектрограф «Action Spectra PRO SP-2300 Princeton Instruments» (п.1 на рис. 1). Временная

синхронизация спектрографа с током генератора МИГ осуществлялась с помощью вакуумных фотоэмиссионных диодов (ВРД). Начало изображения на развертке спектрографа коррелировалось с началом сигнала ВРД, привязанного к току через нагрузку. При съемках использовалась спектральная развертка длительностью 500 нс.

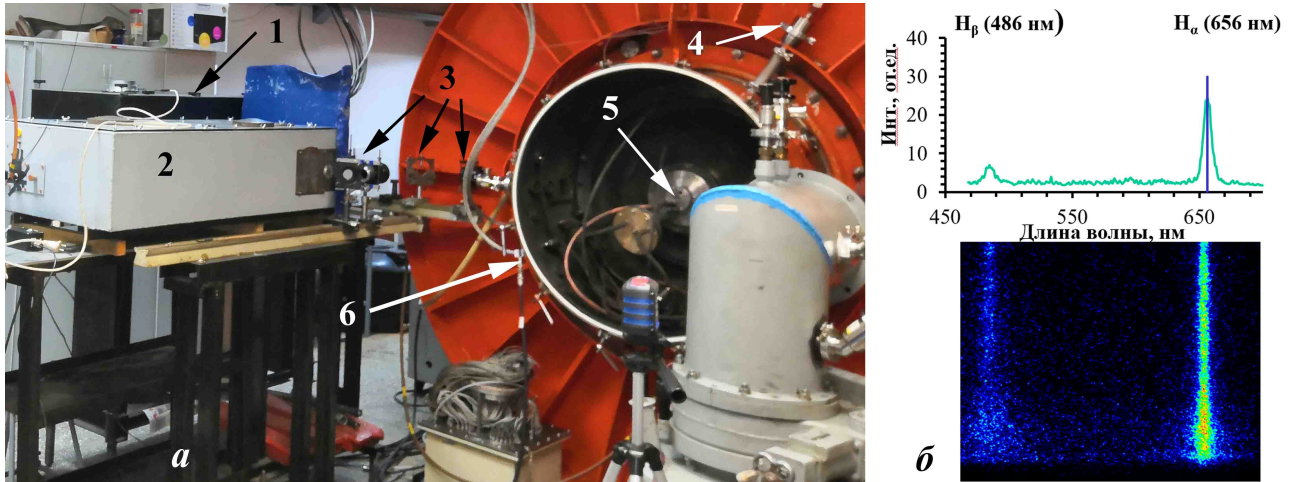


Рис. 1. Фотография вакуумной камеры и узла нагрузки генератора МИГ (а). 1 – спектрограф + streak camera; 2 – 4-х кадровая камера HSFC Pro; 3 – линзы и зеркала оптического тракта; 4 – фотоэмиссионный диод ВРД; 5 – узел нагрузки генератора МИГ; 6 – вакуумная камера генератора МИГ; (б) – Калибровка спектрографа с временным разрешением плазмой H $_2$ .

Калибровка спектрометра по длинам волн осуществлялась по линиям H $\alpha$  и H $\beta$ , получаемым при помощи искрового разряда в атмосфере водорода в той же геометрии. На рисунке 1б приводятся результаты такой калибровки. В экспериментах изображение взрывающихся проводников с помощью объектива Industar-37 строилось с увеличением в 5 раз в плоскости  $x$ - $z$ , которая была параллельна плоскости расположения входной щели спектрометра (входная щель спектрометра была ориентирована поперек оси  $z$  проводника (и, соответственно, поперек направления протекания тока) и располагалась в центре межэлектродного промежутка для исключения регистрации приэлектродных процессов. Используя диафрагму перед входной щелью спектрографа, ориентированную вдоль оси  $z$  проводника, в экспериментах мог регистрироваться спектр любого участка проводника по его диаметру. Длина участка проводника, с которого регистрировался спектр, определялась шириной входной щели спектрометра и была  $\approx 200$  мкм с учетом  $K_{ув}$  объектива. Спектральное разрешение прибора составляло 8 нм.

### 3. Результаты экспериментов и обсуждение

Интегральный по времени спектр излучения плазмы в оптическом диапазоне при скиновом взрыве Cu проводника диаметром 2 мм с выдержкой спектрометра 10 мкс приведен на рисунке 2. На фоне непрерывного спектра теплового излучения поверхности нагрузки отчетливо регистрируются линии меди второй степени ионизации. На рисунке 3 представлены снимки собственного свечения при взрыве медного проводника диаметром 2 мм в различные моменты времени (а) и поведение спектра излучения этого же проводника во времени в диапазоне 340–650 нм (б), то есть в области наибольшей интенсивности излучения на интегральном спектре. Как видно из рис. 3б, при временном разрешении 15 нс/мм, линейчатое излучение не регистрируется в данном диапазоне длин волн и в данном временном промежутке от начала пропуска тока по проводнику. Непрерывный спектр теплового излучения поверхности нагрузок имеет вид зависимости мощности излучения

черного тела от длины волны с температурой до 1 эВ. При этом датчики в ультрафиолетовом диапазоне регистрировали температуру порядка 10 эВ в приближении абсолютно черного тела.

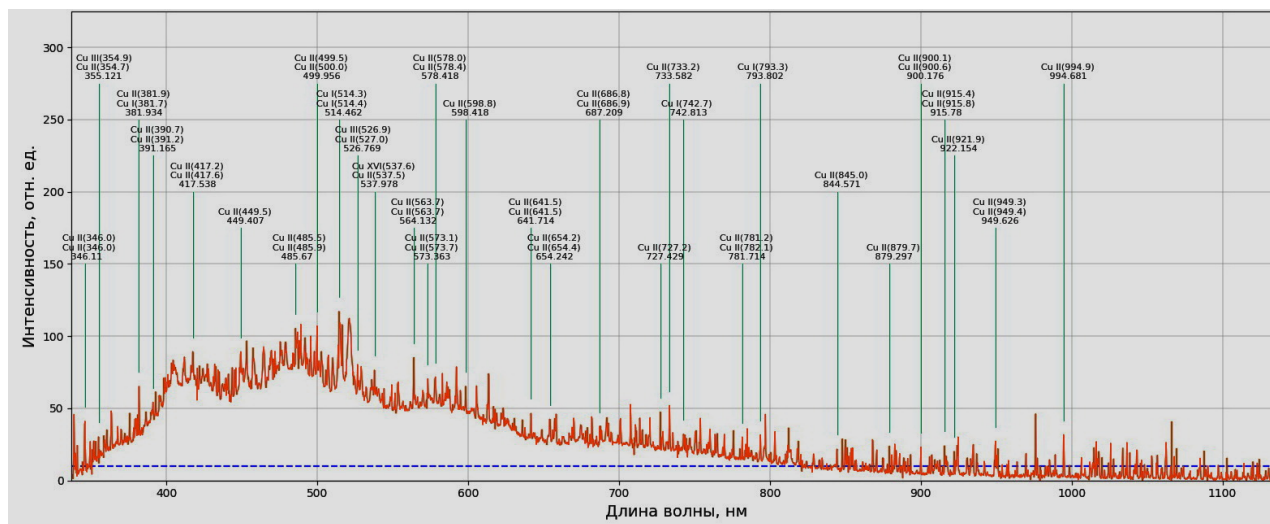


Рис. 2. Интегральный спектр излучения плазмы Cu проводника диаметром 2 мм в оптическом диапазоне.

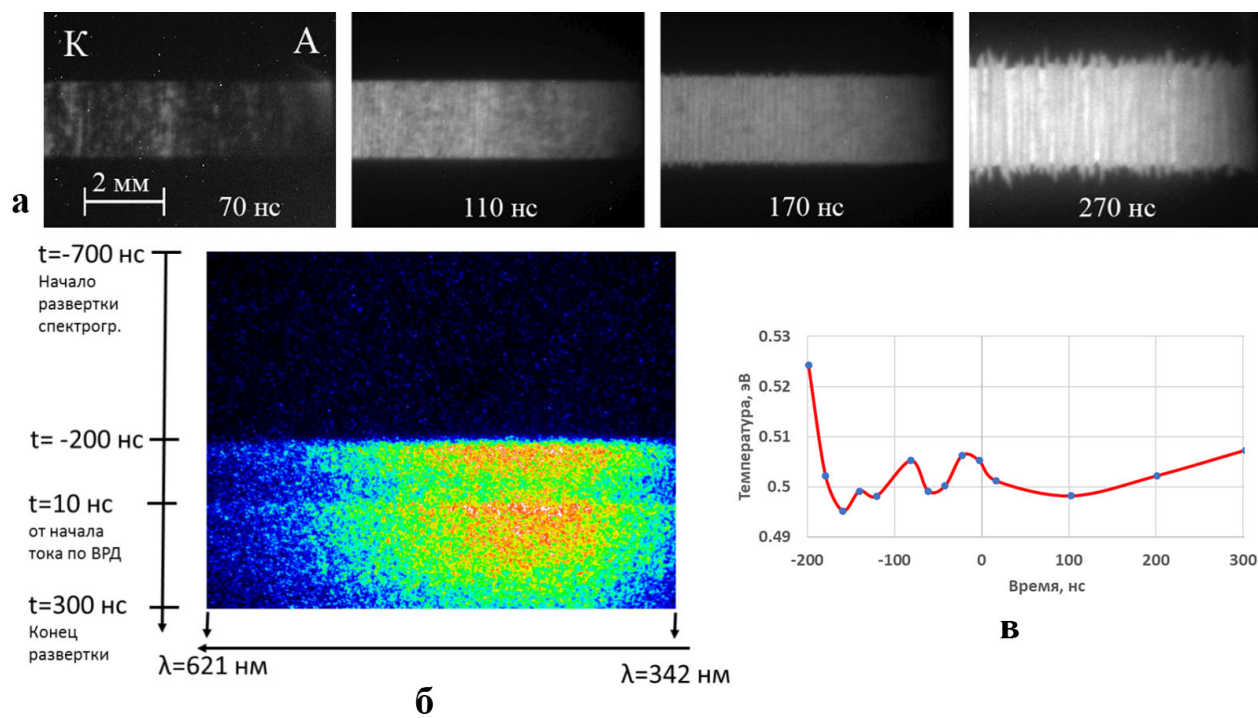


Рис. 3. Снимки собственного свечения при взрыве медного проводника диаметром 2 мм в различные моменты времени (а); изменение спектра излучения этого же проводника во времени в диапазоне 340–650 нм (б); поведение температуры в приближении черного тела на длине волны максимальной интенсивности излучения проводника (в).

По-видимому, нагрев плазмы протекающим током в большей степени происходит внутри проводника, что подтверждают расчеты распределения плотности тока по радиусу во времени [9–11]. По излучающему в видимом диапазоне внешнему малоплотному слою разлетающейся плазмы (рис. 3а), подверженному развитию неустойчивостей, протекает

небольшая часть тока, поддерживающая температуру поверхности в приближении черного тела на уровне 0.5–1 эВ. Спектральные измерения излучения при взрыве проводников на установке ИМРИ-5 (амплитуда тока 450 кА, фронт нарастания тока 500 нс.) подтвердили отсутствие линейчатого излучения у цилиндрических проводников с большим (1–3 мм) диаметром. Линейчатое излучение плазмы на этом генераторе появлялось при уменьшении диаметра взрывааемых проводников до определенных значений (менее 200 мкм). Ожидается появление и регистрация линейчатого излучения плазмы в видимом диапазоне при уменьшении диаметра взрываемого проводника и на генераторе МИГ. Такие эксперименты проводятся в данный момент.

#### 4. Заключение

На тераваттном генераторе МИГ проведены исследования излучения плазмы в видимом диапазоне при наносекундном взрыве цилиндрических проводников различных диаметров. Получены интегральные спектры излучения в оптическом диапазоне и спектры с временным разрешением. На интегральных спектрограммах, полученных за все время излучения плазмы при взрыве Cu и Al проводников с начальным диаметром 2–3 мм, наряду с непрерывным спектром в диапазоне длин волн 200–1100 нм присутствуют спектральные линии вещества проводника различной степени ионизации. На временной же зависимости спектра излучения таких же проводников при временной развертке 500 нс линейчатое излучение в видимом диапазоне отсутствует.

#### Благодарность

Исследование выполнено за счет грантов Российского научного фонда № 22-19-00686, <https://rscf.ru/project/22-19-00686/> и № 20-19-00364, <https://rscf.ru/project/20-19-00364/>

#### 5. Литература

- [1] A.D. Sakharov, Magneto implosive generators, *Soviet Physics Uspekhi*, vol. **9**(2), 294–299, 1966, doi: 10.1070/PU1966v009n02ABEH002876
- [2] H. Knoepfel, *Pulsed high magnetic fields: physical effects and generation methods concerning pulsed fields up to the megagauss level*, Amsterdam: North Holland Publishing Company, 1970.
- [3] S. Krivosheev, V. Titkov, and G. Shneerson, Two-dimensional field diffusion and magnetohydrodynamic flow in an electric explosion of a miniature single-turn solenoid in a megagauss magnetic field, *Technical Physics*, vol. **42** (4), 352–366, 1997, doi: 10.1134/1.1258833
- [4] V.I. Oreshkin, S.A. Chaikovskii, N.A. Labetskaya, Y.F. Ivanova, K.V. Khishchenko, P.R. Levashov, N.I. Kuskova, and A.D. Rud, Phase Transformations of Carbon under Extreme Energy Action, *Technical Physics*, vol. **57**(2), 198–202, 2012, doi: 10.1134/S106378421202017X
- [5] W.A. Stygar, M. Cuneo, D. Headley, H. Ives, R. Leeper., M. Mazarakis, C. Olson, J. Porter, T. Wagoner, and J. Woodworth, Architecture of petawatt-class z-pinch accelerators, *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, vol. **10**(3), 030401, 2007, doi: 10.1103/PhysRevSTAB.10.030401
- [6] А.В. Браницкий, Е.В. Грабовский, В.В. Джангобегов, Я.Н. Лаухин, К.Н. Митрофанов, Г.М. Олейник, П.В. Сасоров, С.И. Ткаченко, И.Н. Фролов, Исследование процессов, происходящих при протекании субмикросекундного импульса тока с линейной плотностью до 3 МА/см по толстостенному электроду из нержавеющей стали, *Физика плазмы*, 42(4), 342–351, 2016, doi: 10.7868/S0367292116040028

- [7] В.В. Александров, А.В. Браницкий, Е.В. Грабовский, Г.М. Олейник, Е.И. Предкова, А.А. Самохин, С.И. Ткаченко, И.Н. Фролов, К.В. Хищенко, А.О. Шишлов, Моделирование эволюции гетерофазного токопровода вакуумной транспортирующей линии при пропускании мощного импульса тока, *Физика плазмы*, **47**(4), 327–333, 2021, doi: 10.31857/S0367292121040028
- [8] В.В. Александров, Е.В. Грабовский, Я.Н. Лаухин, К.Н. Митрофанов, Г.М. Олейник, Е.И. Предкова, О.Б. Решетняк, С.И., Ткаченко И.Н. Фролов, Плазмообразование на токнесущих электродах установки Ангара-5-1, *Физика плазмы*, **48**(2), 121–130, 2022, doi: 10.31857/S0367292122020019
- [9] S.A. Chaikovsky, V.I. Oreshkin, I.M. Datsko, N.A. Labetskaya, N.A. Ratakhin, Skin explosion of double-layer conductors in fast-rising high magnetic fields, *Phys. Plasmas*, vol. **21**, 042706, 2014, doi: 10.1063/1.4871719
- [10] I.M. Datsko, N.A. Labetskaya, S.A. Chaikovsky, V.V. Shugurov, Skin Electric Explosion in Double-Layer Conductors with a Low-Conductivity Deposited Layer, *Technical Physics*, vol. **61**(6), 855–859, 2016, doi: 10.1134/S1063784216060049
- [11] И.М. Дацко, Н.А. Лабецкая, С.А. Чайковский, В.В. Шугуров, Скиновый электрический взрыв двуслойных проводников с напыленным низкопроводящим слоем, *ЖТФ*, **86**(6), 57–62, 2016.