

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Давыдов Николай Владимирович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Измерение тока термоэлектронной эмиссии с поверхности вольфрама при
импульсном лазерном нагреве**

Практикум электричества и магнетизма, 2 курс, группа №18310

Научный руководитель:

к. ф.-м. н. с. н. с. А. А. Шошин

Оценка научного руководителя

«____» _____ 2019 г.

Преподаватель практикума:

Оценка преподавателя практикума

«____» _____ 2019 г.

Куратор практикума:

к. т. н. доцент В. Т. Астрелин

Итоговая оценка

«____» _____ 2019 г.

Новосибирск, 2019

Аннотация

Целью данной работы является измерение тока термоэлектронной эмиссии с вольфрама при импульсном нагреве лазерным излучением. Данное исследование востребовано т. к. импульсный лазерный нагрев эквивалентен импульсному плазменному воздействию на вольфрамовый дивертор в ИТЭР. В ходе работы были разработаны и изготовлены источник высокого напряжения, анод, вакуумный фланец с токовводами. Были рассчитаны ожидаемые плотности тока термоэлектронной эмиссии. В результате была отмечена корреляция импульсов лазерного излучения (а значит и импульсов температуры) и импульсов тока, но экспериментально измеренный ток на несколько порядков превосходит рассчитанный теоретически, что свидетельствует о неоднородности лазерного луча по сечению. Также обнаружен эффект пробоя при высоких энергиях лазерного луча.

Т. о. проведено измерение тока термоэлектронной эмиссии при помощи вакуумного диода, но в силу крайне высокой скорости роста плотности тока с ростом температуры, для вычисления теоретических зависимостей необходимо учитывать неоднородность нагрева поверхности образца.

Ключевые слова: термоэлектронная эмиссия, лазерное излучение, вакуумный диод, термокатод, анод, вольфрам, дивертор ИТЭР.

Оглавление

1	Введение	4
2	Теоретическая часть	4
2.1	Термоэлектронная эмиссия	4
2.2	Электровакуумный диод	5
3	Схема эксперимента	5
4	Обсуждение экспериментальных данных	9
4.1	Расчет временной зависимости плотности тока	9
4.2	Результаты эксперимента	10
5	Заключение	12
	Список литературы	13

1 Введение

Дивертор ИТЭР, целью которого является охлаждение и нейтрализация отводимых внешних слоев плазменного шнура, будет подвержен значительному воздействию высокоскоростных частиц. Он должен выдерживать порядка 1 млн. импульсов плазмы с плотностью энергии 0.6 МДж/м^2 (длительностью 250 мкс) или 0.85 МДж/м^2 (длительностью 500 мкс) [1]. Изучение процесса разрушения вольфрама под воздействием плазмы (или при имитации этого воздействия) крайне важно для конструирования вакуумных камер строящихся и проектируемых термоядерных реакторов-токамаков.

Т. к. для удержания плазмы необходимо создавать сильные магнитные поля, то все эрозийные процессы будут происходить в поле сверхпроводящих электромагнитов. При этом определенную роль в процессе разрушения может играть ток термоэлектронной эмиссии с поверхности вольфрамового дивертора, протекая в расплавленном слое вольфрама данный ток благодаря силе Ампера приводит к движению этого слоя, усиливая таким образом эрозию. Измерение данного тока при импульсном нагреве вольфрамового образца – цель данной работы.

Для реализации данных измерений, из образца, в качестве термокатода, и специального изготовленного анода был сформирован электровакуумный диод. Основными задачами при этом являлись проектирование анода, расчет источника тока, способного обеспечить ток термоэлектронной эмиссии с образца, а также разработка помехоустойчивого измерителя тока, способного в условиях эксперимента зафиксировать данный ток.

2 Теоретическая часть

2.1 Термоэлектронная эмиссия

Для оценки тока термоэлектронной эмиссии обратимся к статистике Ферми-Дирака для электронного газа в металле. Согласно ей средняя концентрация (dn) электронов с импульсом от (p_x, p_y, p_z) до $(p_x + dp_x, p_y + dp_y, p_z + dp_z)$ и

соответствующей энергией ε :

$$dn = \frac{2}{h^3} \frac{dp_x dp_y dp_z}{\exp \frac{\varepsilon - \mu}{kT} + 1},$$

где h – постоянная Планка, μ – энергия Ферми, k – константа Больцмана T – температура системы.

Из данного распределения нетрудно получить следующее соотношение для тока эмиссии:

$$j_{\text{э}} = AT^2 e^{\varphi/kT},$$

где $j_{\text{э}}$ – плотность тока термоэлектронной эмиссии, $A = 4\pi m_e e k^2 / h^3 = 120 \text{ A}/(\text{см}^2 \cdot \text{K}^2)$ – постоянная, одинаковая для всех металлов, φ – работа выхода характеризующая металл, T – температура металла. Это выражение является формулой Ричардсона-Дешмана [2]. Для уточнения в величине тока эмиссии иных характеристик поверхности металла вводят коэффициент проницаемости барьера $\bar{D}$:

$$j_{\text{э}} = \bar{D}AT^2 e^{\varphi/kT}. \quad (1)$$

Для вольфрама данные параметры хорошо известны: $\varphi = 4,54 \text{ эВ}$, $\bar{D}A \simeq 70 \text{ A}/(\text{см}^2 \cdot \text{K}^2)$ [3].

2.2 Электровакуумный диод

Для оценки тока насыщения формируемого диода можно воспользоваться законом трех вторых Ленгмюра:

$$j = GU^{3/2}, \quad (2)$$

где j – плотность тока, протекающего через диод, U – напряжение на диоде, G – параметр, определяемый геометрией электродов [2].

3 Схема эксперимента

В работе [4] показано, что методика моделирования взаимодействия плазмы с поверхностью (будь то использование потока плазмы, электронного пучка

или лазерного излучения) не является ключевым фактором, определяющим характер повреждения. Наиболее значимой оказывается величина тепловой нагрузки, оказываемой на образец. Следовательно, для упрощения эксперимента в данной работе в качестве импульсной тепловой нагрузки возможно использовать инфракрасное лазерное излучение, в качестве источника которого был использован лазер на основе ГОС-1001. ГОС-1001 – промышленный лазер в основе которого лежит генерирующее люминесцирующее стекло с примесным неодимом. Длина волны излучения 1060 нм. На рис. 1 приведена временная зависимость интенсивности излучения ламп накачки и генерации лазера.

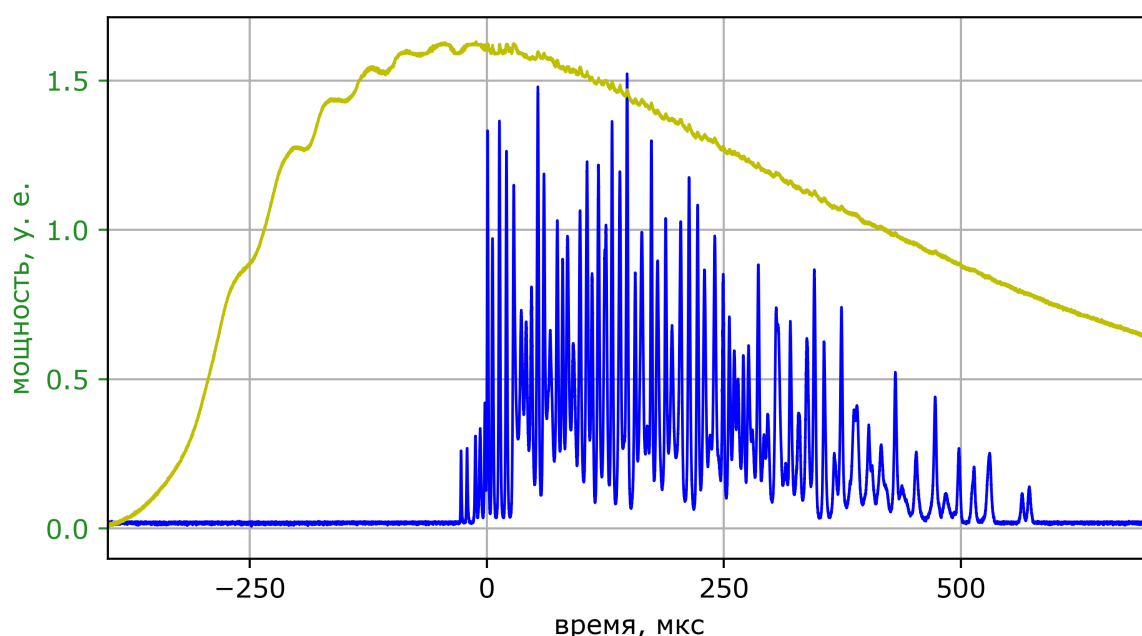


Рис. 1: Временной ход интенсивности излучения ламп накачки (желтый) и генерации лазера (синий)

На следующих схемах показано устройство экспериментального стенда и блока измерения.

На рис. 2 приведена блок-схема экспериментальной установки.

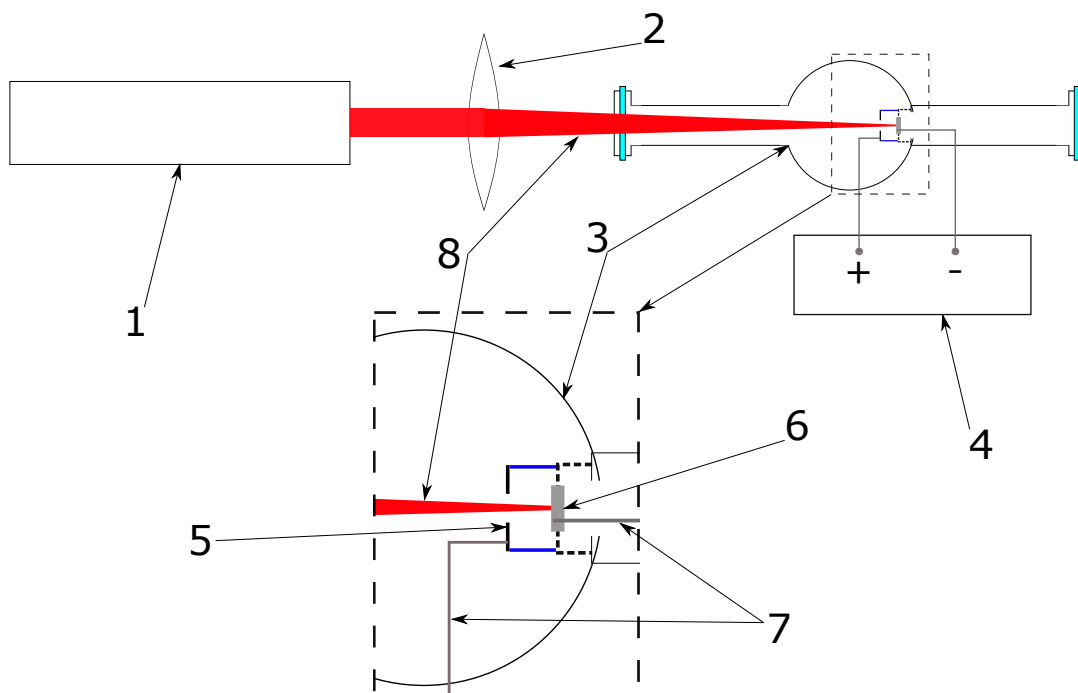


Рис. 2: Схема экспериментальной установки

1 – лазер ГОС-1001, 2 – фокусирующая линза, 3 – вакуумная камера, 4 – измерительный блок, 5 – анод, 6 – вольфрамовый образец-катод, 7 – токоведущие провода, 8 – лазерный луч.

На рис. 3 показан чертеж анода, использованного в измерениях.

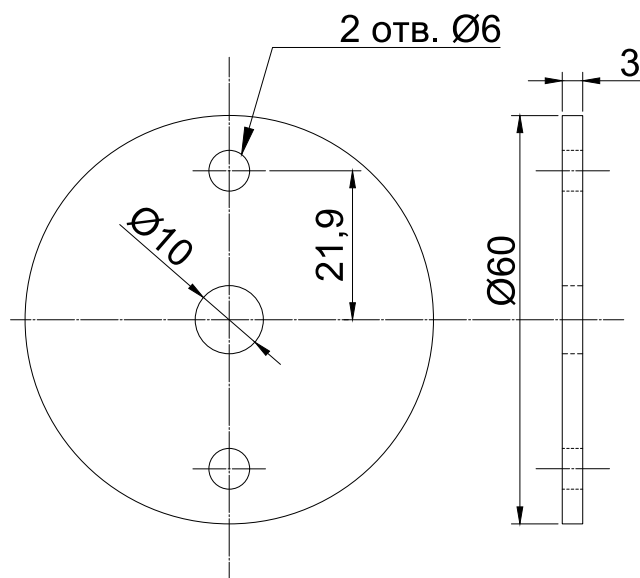


Рис. 3: Чертеж анода (размеры указаны в миллиметрах)

На рис. 4 изображена принципиальная схема измерительного блока.

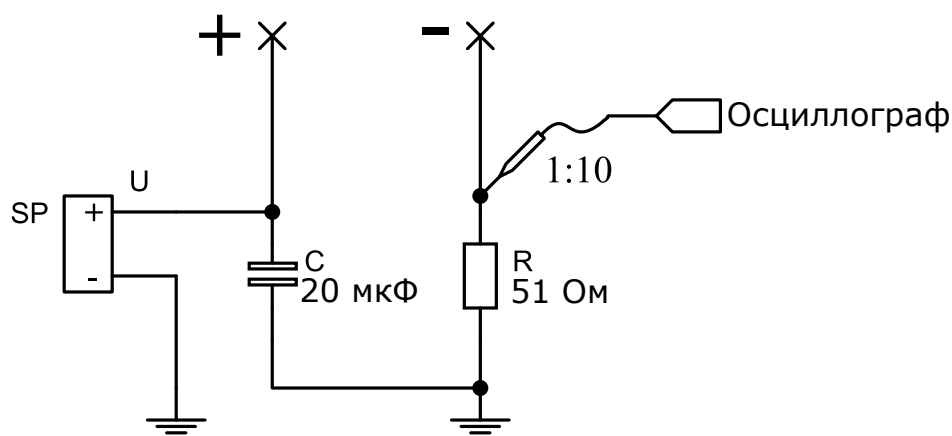


Рис. 4: Схема измерительного блока

Источник напряжения (SP) заряжает конденсатор С до напряжения U . До импульса лазера в системе есть очень слабый ток, обусловленный ненулевой эмиссией электронов при исходной температуре. Согласно формуле (1) данный ток должен быть крайне мал по отношению к токам эмиссии при нагреве вольфрама до температур порядка нескольких тысяч кельвин (согласно предварительным испытаниям, лазер способен разогреть образец до порога плавления) и им можно пренебречь. При импульсе образец-термокатод, нагреваясь инфракрасным излучением, начинает активнее эмитировать электроны. Приложенное к диоду напряжение направляет их на анод. Анодный ток протекает через резистор R (шунт). Напряжение на резисторе R , а значит и ток через него, измеряется при помощи осциллографа и пробника 1:10. Таким образом измеряется временной профиль термоэлектронного тока с вольфрамового образца.

В качестве источника напряжения (SP) использован блок питания АКПП-1103 с преобразователем напряжения EMCO L15A. На вход данного преобразователя подается низковольтное напряжение (от 2 до 12 В), при этом на выходе формируется разность потенциалов пропорциональная входному напряжению (от 250 до 1 500 В). Максимальный выходной ток при этом 1 мА. Для сглаживания пульсаций напряжения параллельно входным контактам присоединен конденсатор емкости 0,44 мкФ, выходным контактам – 3300 пФ, также к каждому из выходных контактов подключен токоограничивающий резистор сопротивлением 1 кОм.

4 Обсуждение экспериментальных данных

4.1 Расчет временной зависимости плотности тока

По известному профилю зависимости генерируемой лазером мощности излучения и полной энергии в импульсе (измеренном калориметром) была рассчитана зависимость температуры поверхности вольфрамового образца от времени (программа написана Поповым Владимиром) (рис. 5).

Энергия в импульсе 37 Дж.

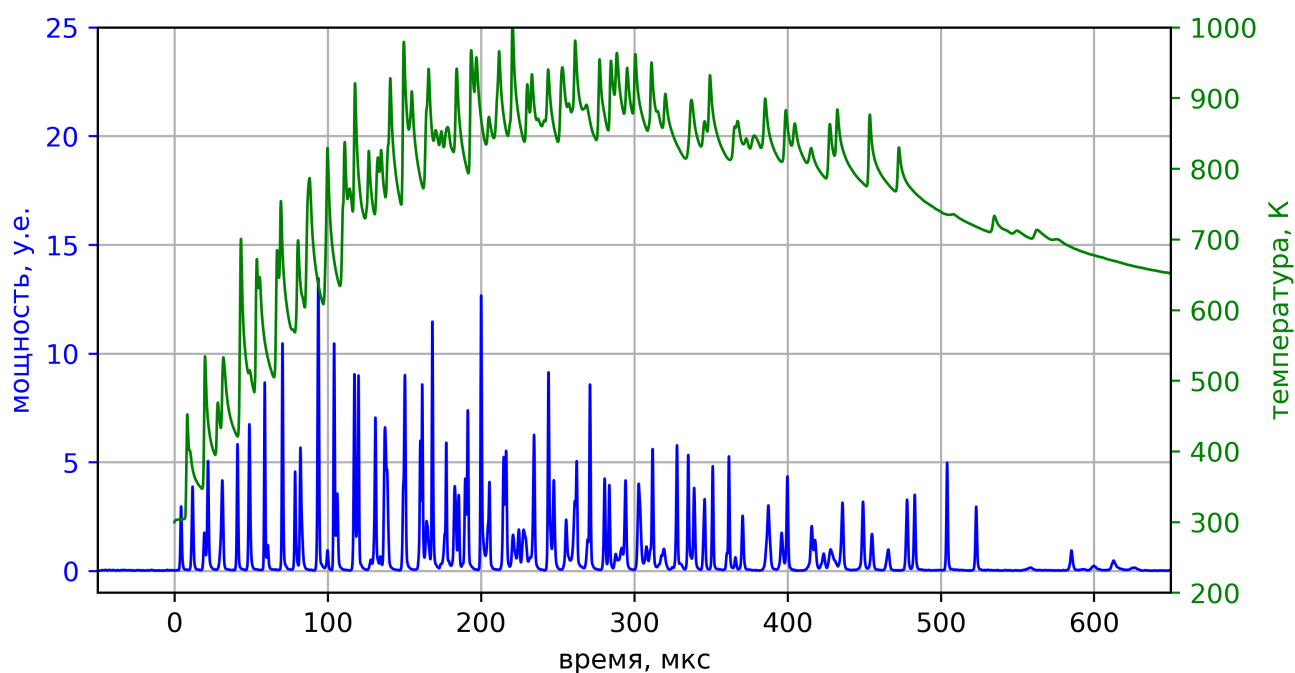


Рис. 5: Рассчитанная зависимости температуры поверхности вольфрамового образца (зеленый) от времени и профиль мощности генерации лазера (синий)

Используя формулу (1), нетрудно рассчитать зависимость плотности тока термоэлектронной эмиссии от времени. На рис. 6 приведены графики зависимости температуры от времени, а так же графики временной зависимости плотности тока.

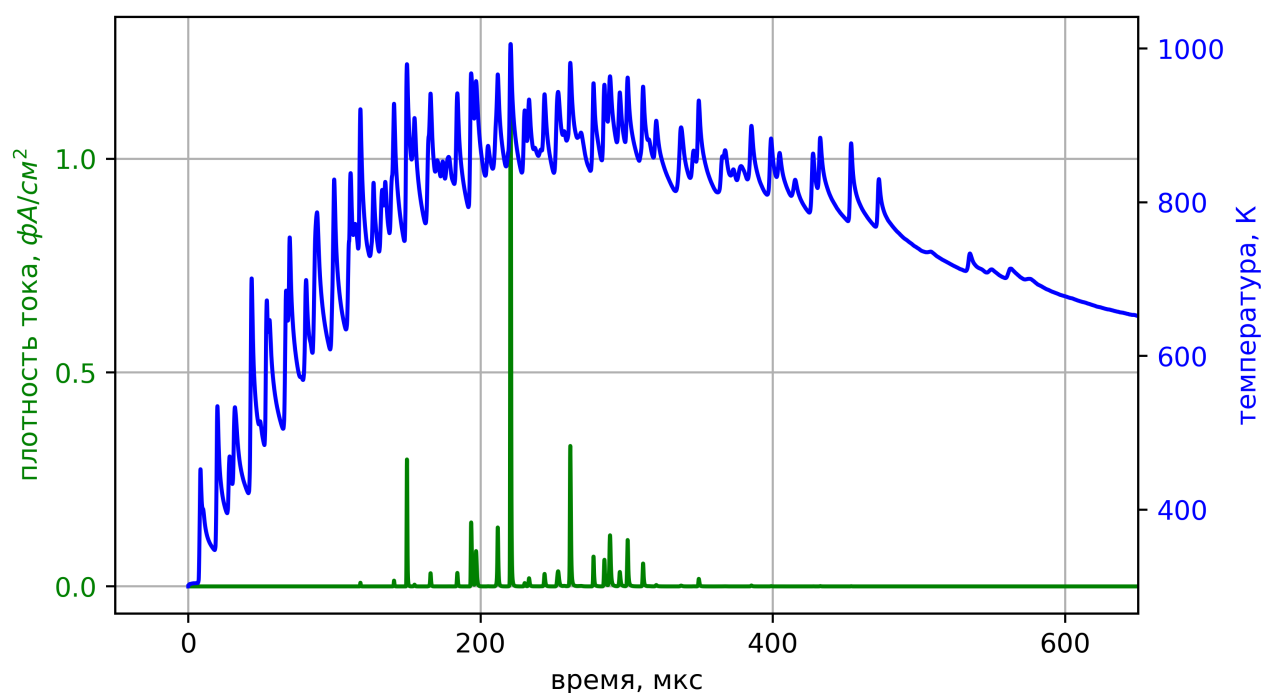


Рис. 6: Рассчитанные зависимости температуры поверхности вольфрамового образца (синий), тока эмиссии (зеленый) от времени

4.2 Результаты эксперимента

Напряжение накопительных конденсаторов 2,4 кВ, энергия в импульсе 37 Дж, напряжение на диоде 0 В.

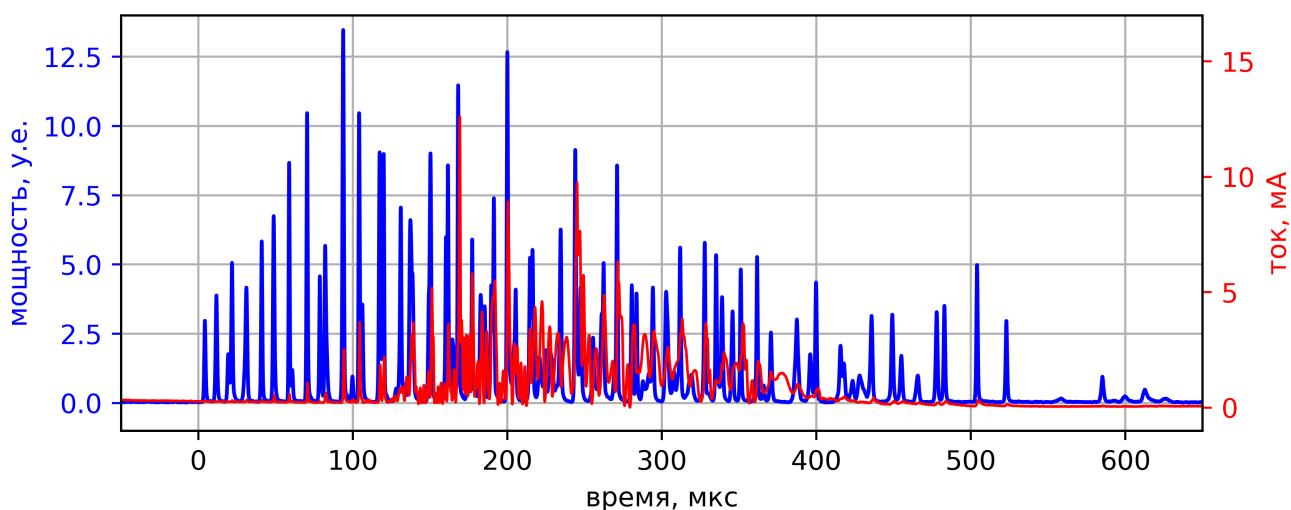


Рис. 7: График анодного тока при энергии импульса 37 Дж и потенциале анода 0 В (красный) и интенсивности генерации лазера (синий) от времени

На рис. 7 хорошо видно, что анодный ток хорошо коррелирует с пиками интенсивности лазерного излучения. Однако, принимая во внимание, что площадь нагреваемой области не превосходит квадратного сантиметра, достаточно очевидно несовпадение теоретической зависимости тока с экспериментально измеренной. Скорее всего это связано с неоднородностью лазерного луча по сечению (в подтверждение данной теории можно привести тот факт, что на вольфрамовом образце после нескольких выстрелов образовались области оплавления). Т. к. зависимость 1 является крайне быстрорастущей (при 3600 К (температура близкая к температуре плавления вольфрама) плотность тока составляет 400 ампер с квадратного сантиметра), то даже незначительная область перегрева образца приводит к значительному изменению анодного тока.

Напряжение накопительных конденсаторов 2,23 кВ, энергия в импульсе 13 Дж, напряжение на диоде 235 В.

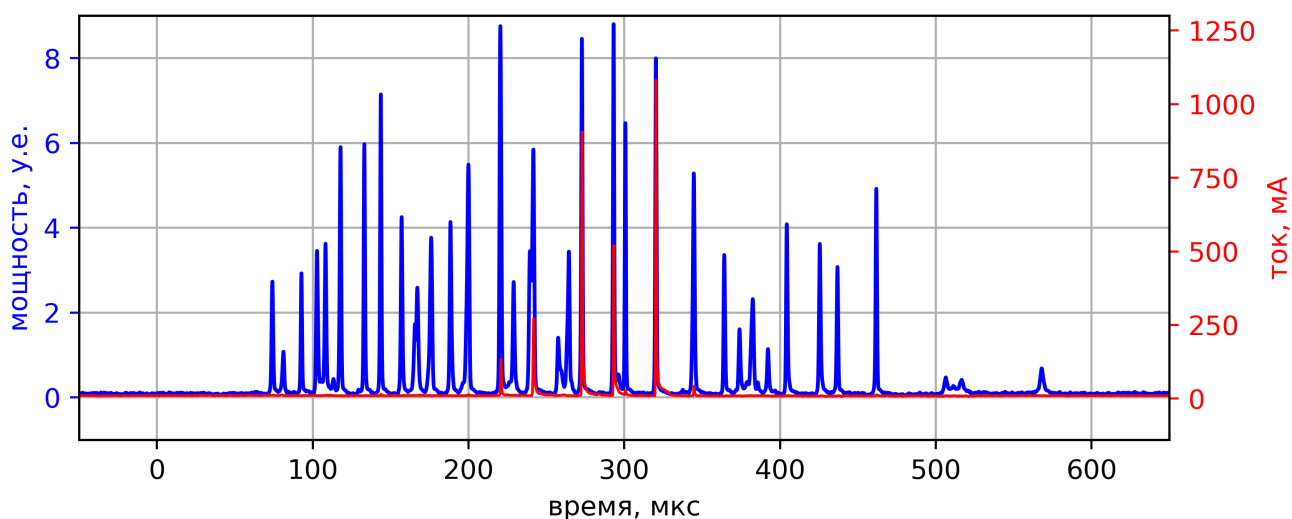


Рис. 8: График анодного тока при энергии импульса 13 Дж и потенциале анода 235 В (красный) и интенсивности генерации лазера (синий) от времени

Рис. 8 демонстрирует корреляцию всплесков интенсивности излучения лазера и всплесков регистрируемого тока, а также значительное превышение теоретически рассчитанного тока.

Дальнейшее повышение напряжения не представляет интереса, т. к. напряжение насыщение диода при плотности тока, соответствующей порогу плавления, рассчитанное с помощью (2) в приближении плоского диода составляет сотни киловольт, что в условиях данного эксперимента недостижимо.

При дальнейшем повышении напряжения накопительных конденсаторов (до 2.3 кВ) (и соответственно интенсивности генерации) в диоде возникает пробой. Вероятно, пространство между катодом-образцом и анодом заполняется парами вольфрама и поверхностных примесей, что приводит к значительному повышению проводимости диода.

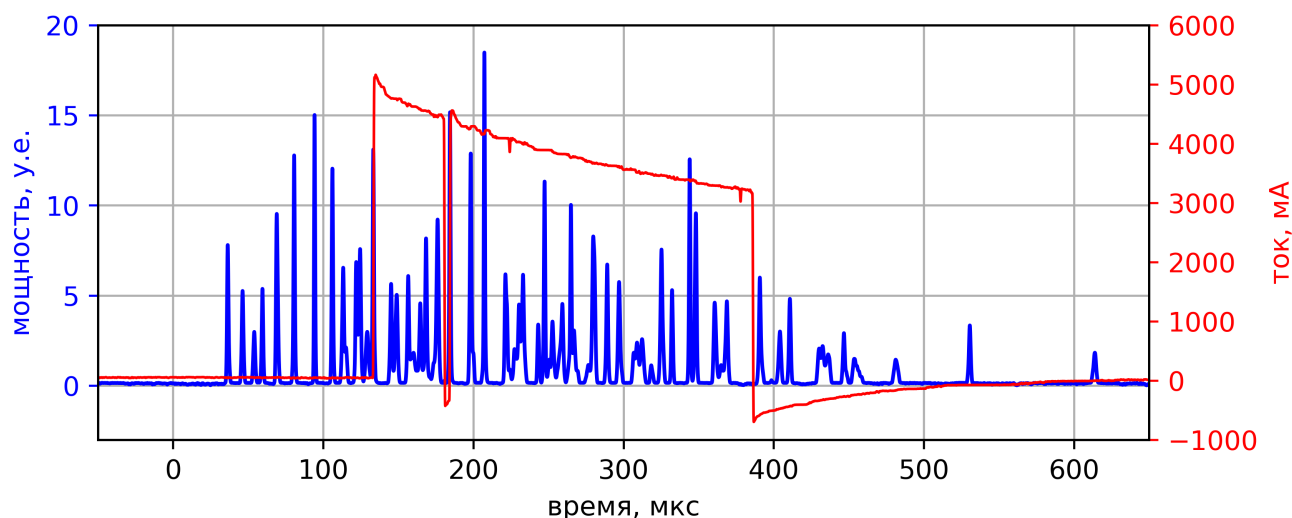


Рис. 9: График пробоя при энергии импульса 23 Дж и потенциале анода 235 В (красный) и зависимости генерации лазера от времени (синий)

На рис. 9 хорошо видно, что происходит длительное значительное повышение тока через измерительный шунт, а также явную экспоненциальную зависимость этого тока. Из этого можно сделать вывод, что происходит резистивная разрядка питающего конденсатора через пробой диода.

5 Заключение

В ходе выполнения работы были измерены токи протекающие через диод при различных напряжениях и энергиях лазерного импульса. В силу неоднородности лазерного луча по сечению, экспериментальные данные значительно отклонились от теоретических расчетов, однако было показано, что метод измерения тока термоэлектронной эмиссии – реализуем.

Факт образования пробоя и, соответственно, плазмы при сравнительно небольших начальных напряжениях на электроде интересен и требует более детального изучения. Этот факт даёт надежду найти простой способ управления направле-

нием тока, связанного с термоэлектронной эмиссией, в расплаве на поверхности. При наличии достаточно сильного внешнего магнитного поля и при наличии информации о величине и направлении плотности тока в расплаве появится сравнения экспериментальных данных о движении расплава с численным моделированием.

Кроме того, были изучены элементы теории измерения токов высокой частоты, теории диодов и базовые понятия вакуумной техники, а также начала лазерной оптики.

Список литературы

- [1] Loarte, A., et al. Transient heat loads in current fusion experiments, extrapolation to ИТЭР and consequences for its operation. // Physica Scripta. 2007. T128. P. 222-228
- [2] Сивухин Д. В. Общий курс физики. Том 3. Электричество / М.: ФИЗМАТ-ЛИТ, 2015, 656 с.
- [3] Таблицы физических величин. Справочник. / Под ред. акад. Кикоина И. К. М.: Атомиздат, 1976, 1008 с.
- [4] Arakcheev A. S., et al. Theoretical investigation of crack formation in tungsten after heat loads. // Journal of nuclear materials. 2015. Vol. 463. P. 246-249.