

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Физический факультет

Кафедра общей физики

Горенков Иван Алексеевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Калибровка пирозлектрического болометра для измерения
параметров плазмы**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18310

Научный руководитель:

к.ф.-м.н., с.н.с. Солдаткина Е.И.
Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н., с.н.с. Астрелин В.Т.
Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск, 2019

Аннотация

Целью настоящей работы было исследование вольт-ваттной чувствительности болометра, предназначенного для измерения продольных потерь через магнитные пробки на установке Газодинамическая ловушка. Коэффициент чувствительности был вычислен теоретически и измерен экспериментально при калибровке лазерным лучом, работающим в импульсном режиме. Произведён анализ погрешностей и возможных ошибок. Теоретический коэффициент чувствительности болометра совпал с расчётным коэффициентом в пределах установленной погрешности. На основании рассчитанного коэффициента и данных, полученных в ходе эксперимента на установке ГДЛ, вычислено значение плотности мощности потока плазмы, вытекающей через магнитные пробки.

Ключевые слова: магнитное удержание плазмы, открытая ловушка, пироэлектрический болометр, поток плазмы.

Работа выполнена в лаборатории 9-1 Института ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН.

Оглавление

1. Введение.....	4
2. Теоретическая часть.....	5
3. Экспериментальная часть.....	8
3.1. Теоретический расчёт	8
3.2. Экспериментальный расчёт.....	8
4. Погрешности.....	12
5. Плотность энергии плазмы	13
6. Оценка вклада пьезоэлектричества	15
7. Заключение	17
8. Список литературы	17

1. Введение

В середине прошлого века новым направлением в области высоких энергий стал управляемый термоядерный синтез (УТС). Скорость реакции синтеза ввиду малого сечения реакции может быть достигнута лишь при больших температурах вещества (десятки кэВ) и плотностях. Таким образом, реагирующее при данной температуре вещество почти полностью является плазмой – квазинейтральным газом заряженных частиц. Естественной проблемой термоядерного реактора является удержание горячей плазмы и изоляция её от стенок реактора. Распространение получила концепция магнитной ловушки, в которой плазма удерживается магнитным полем. Одной из таких ловушек является пробкотрон – аксиально-симметричная система, магнитное поле в которой однородно и значительно возрастает у торцов, отражая большую часть частиц. Сгущение силовых линий поля у торцов достигается за счёт кольцевых катушек с током, области под которыми и называются пробками.

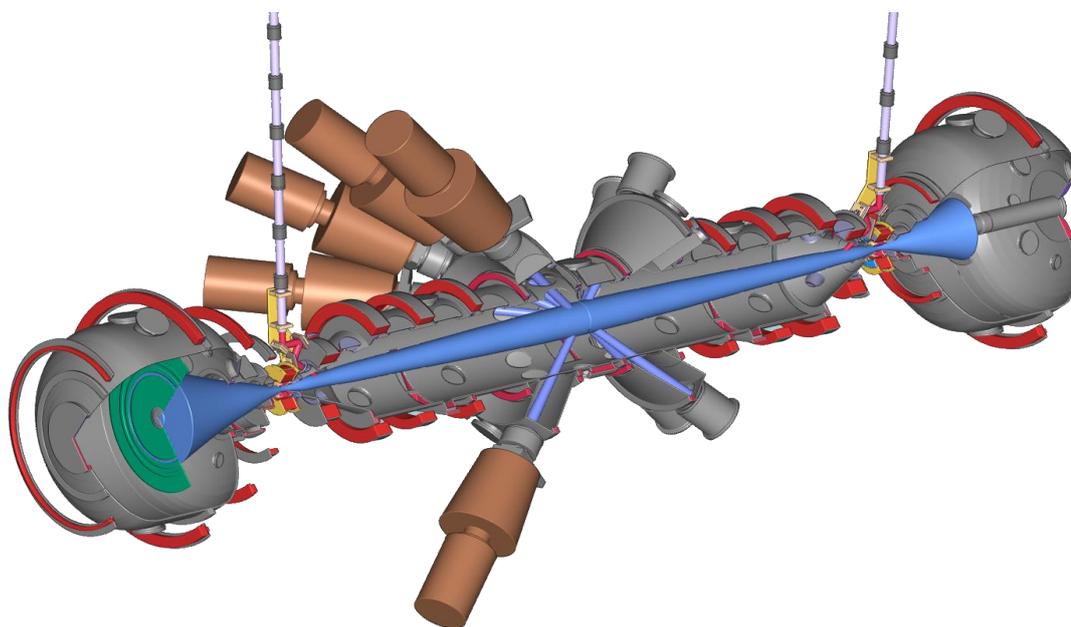


Рис. 1. Трёхмерная модель установки ГДЛ

Пробкотрон характеризуется пробочным отношением, определяющим область удержания частиц в пространстве скоростей. Частицы, оказавшиеся вне этой области (попавшие в конус потерь), вылетают из ловушки и оказываются на плазмоприёмнике пробкотрона. Измерение параметров частиц при помощи

датчиков, установленных на плазмоприёмнике, позволяет делать выводы о текущих параметрах плазмы внутри ловушки и эффективности удержания в ней плазмы [1].

Таким образом, актуальность данной работы обусловлена необходимостью определения точных численных значений энергии, выносимой потоком плазмы в условиях эксперимента на установке ГДЛ, полученных с пироэлектрического болометра. Данная работа посвящена калибровке такого пироэлектрического болометра.

Целью данной курсовой работы является нахождение коэффициента вольт-ваттной чувствительности болометра, используемого на установке Газодинамическая ловушка.

Задачи работы:

1. Рассмотреть теоретическую основу пироэлектрического эффекта и получить аналитическую формулу коэффициента чувствительности.

2. Провести эксперименты по калибровке болометра и произвести практическое вычисление коэффициента чувствительности.

3. Проанализировать соответствие экспериментального коэффициента теоретическому.

4. На основании рассчитанного коэффициента и экспериментальных данных с установки Газодинамическая ловушка определить плотность мощности потока плазмы, вытекающей из пробкотрона.

2. Теоретическая часть

Схема используемого датчика приведена на рис.2. Детектор в калибруемом болометре представляет собой тонкий диск из ниобата лития с пироэлектрическим

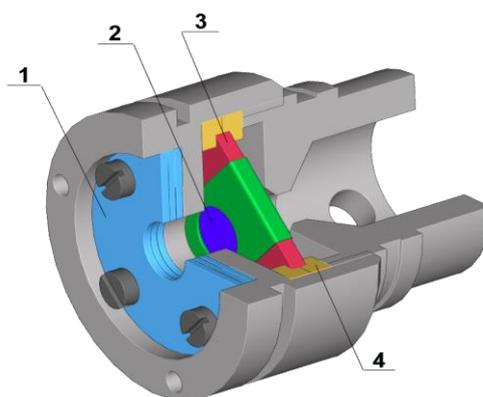


Рис. 2. Болометр: 1 – держатели экранирующих сеток, 2 – пироэлектрическая керамика, 3 – плата усилителя, 4 – вакуумная резина

коэффициентом $\gamma = dP_s / dT$, где P_s – вектор спонтанной поляризации материала диска, направленный по нормали к торцевым поверхностям, на которые нанесены металлические электроды. Можно считать, что в широком диапазоне

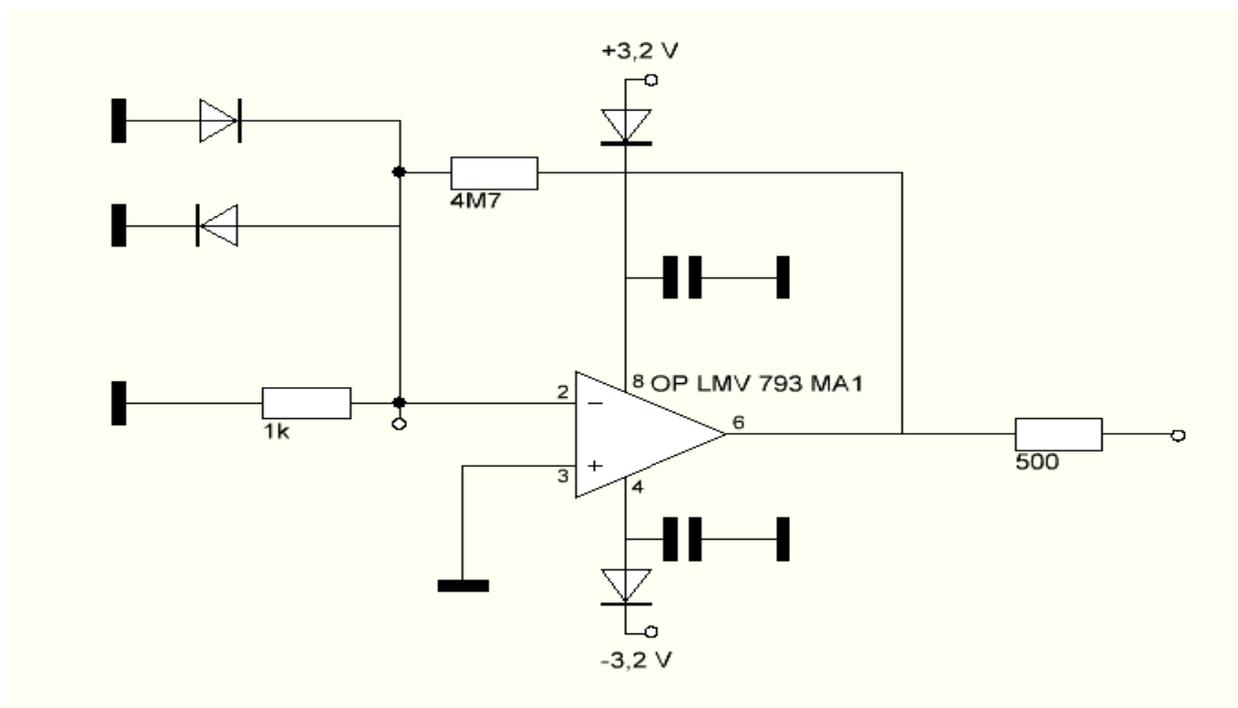


Рис. 3. Электрическая схема усилителя тока с пьезоэлектрика

температур коэффициент γ постоянен. Диск закрывается от колебаний потенциала плазмы металлической сеткой. Усилитель генерируемого детектором сигнала (рис.3), необходимый ввиду малости создаваемого на диске напряжения, расположен непосредственно в корпусе датчика для уменьшения электрических помех. Для демпфирования акустических помех плата зажата между двумя резиновыми кольцами. В схему инвертирующего усилителя включена диодная цепочка для защиты от пробоя.

Рассмотрим работу пьезоэлектрического болометра, включенного в схему операционного усилителя с сопротивлением обратной связи R_f (ёмкостью нагрузки пренебрегается) [2, стр. 28-29]. Отводом энергии от болометра за время измерения в данных условиях можно пренебречь. Введём параметры кристалла: площадь приёмной поверхности – S , толщина – d , мощность, падающая на единицу поверхности, – W , объёмная теплоёмкость кристалла – c_p .

Распределение температуры по глубине диска при импульсном нагреве существенно неоднородно, так как $d \gg \left(\frac{\kappa\tau}{c_p}\right)^{\frac{1}{2}}$, где κ – коэффициент теплопроводности, τ – время измерений. В объёме кристалла выполняется $\text{div } D = 0$ или $\frac{d}{dl}(\varepsilon E(l,t) + 4\pi P_s(l,t)) = 0$, где l отсчитывается от поверхности диска. Из граничного условия на металлическом электроде получим:

$$\varepsilon E(l,t) + 4\pi P_s(l,t) = -4\pi\sigma(t), \quad (1)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость, σ – поверхностная плотность заряда.

Используя очевидные равенства $\int E(l,t)dl + IR_r = 0$ и $-S \frac{d\sigma}{dt} = I$ и интегрируя (1)

по толщине, имеем:

$$-\varepsilon U_R + 4\pi \int P_s(l,t)dl = -4\pi\sigma(t)d, \quad (2)$$

где $U_R = I \cdot R_r$ – падение напряжения на измерительном сопротивлении.

Дифференцируя (2) по времени, получим:

$$-\varepsilon \frac{dU_R}{dt} + 4\pi \int \frac{dP_s}{dt}dl = \frac{4\pi dU_R}{SR_r}.$$

Пренебрегая тепловыми потоками в пироэлектрике вдоль поверхности диска, получим:

$$4\pi \int \frac{dP_s}{dt}dl = 4\pi\gamma \int \frac{dT}{dt}(l,t)dl = 4\pi\gamma \frac{W(t)}{c_p}.$$

Окончательно (2) примет вид:

$$\frac{R_r S \varepsilon}{4\pi d} \cdot \frac{dU_R}{dt} + U_R = \frac{\gamma W(t) S R_r}{c_p d}.$$

В условиях экспериментов на ГДЛ постоянная времени $R_r \cdot C_{\text{крист}} \ll \tau_{\text{имп}}$, и сигнал с детектора равен:

$$U_R = \frac{S\gamma}{c_p d} R_r W(t).$$

Таким образом, искомый коэффициент отношения плотности мощности, попадающей на болометр, к напряжению, создаваемому болометром, равен:

$$K = \frac{W(t)}{U_R} = \frac{1}{R_r} \cdot \frac{c_p d}{S\gamma}. \quad (3)$$

3. Экспериментальная часть

3.1. Теоретический расчёт

Радиус детектора, используемого в болометре, – $r = 0,3$ см, толщина – $d = 0,05$ см. Для используемого детектора $\frac{\gamma}{c_p} = 1,4 \cdot 10^{-9}$ Кл· $\frac{\text{см}}{\text{Дж}}$. Величина сопротивления нагрузки болометра $R_s = 4,7 \cdot 10^6$ Ом. Детектор имеет форму диска, поэтому площадь приёмной поверхности равна $S = \pi r^2 = 0,28$ см².

Для вышеперечисленных параметров теоретический коэффициент чувствительности по (3) равен $K_{\text{теор}} = \frac{1}{4,7 \cdot 10^6} \cdot \frac{0,05}{0,28 \cdot 1,4 \cdot 10^{-9}} = 26,9 \frac{\text{Вт}}{\text{В} \cdot \text{см}^2}$.

3.2. Экспериментальный расчёт

Следует заметить, что в (3) коэффициент чувствительности рассчитан из условия, что энергия попадает на всю поверхность датчика и распределена по ней равномерно. В противном случае нельзя говорить о плотности мощности $W(t)$, но можно говорить о некотором усреднённом её значении по площади детектора, поэтому формула для коэффициента K приобретёт вид:

$$K = \frac{\int W(t) dS}{S \cdot U_R}.$$

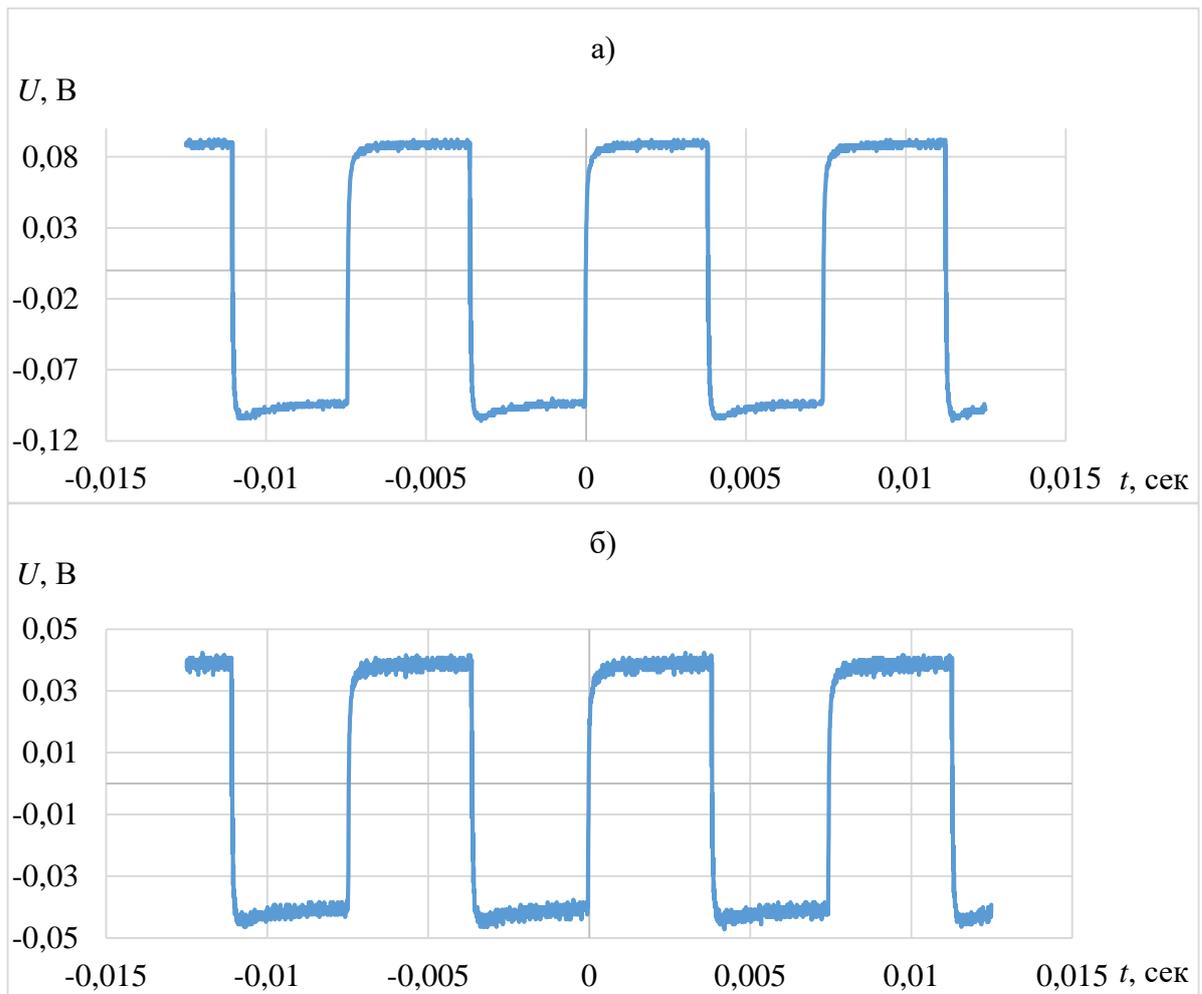


Рис. 2. График напряжения на детекторе от времени: а) детектор без сетки, б) детектор с сеткой

Для экспериментального вычисления чувствительности требуется эталонный источник энергии достаточно высокой плотности, которая может быть сфокусирована в пятно размерами меньше размеров детектора. В качестве подходящего источника энергии была использована лазерная указка с длиной волны 450 нм и мощностью 1,5 Вт.

Установка для калибровки представляет собой держатель болометра, состоящий из толстостенного кольца, и подставку под лазерную указку, расположенную соосно с кольцом. Калибруемый болометр закрепляется в зажиме, на подставку устанавливается лазер. После включения лазерный луч попадает на приёмную поверхность детектора, вызывает изменение поляризации материала и появление напряжения на болометре. Измерение возникающего напряжения производится цифровым осциллографом.

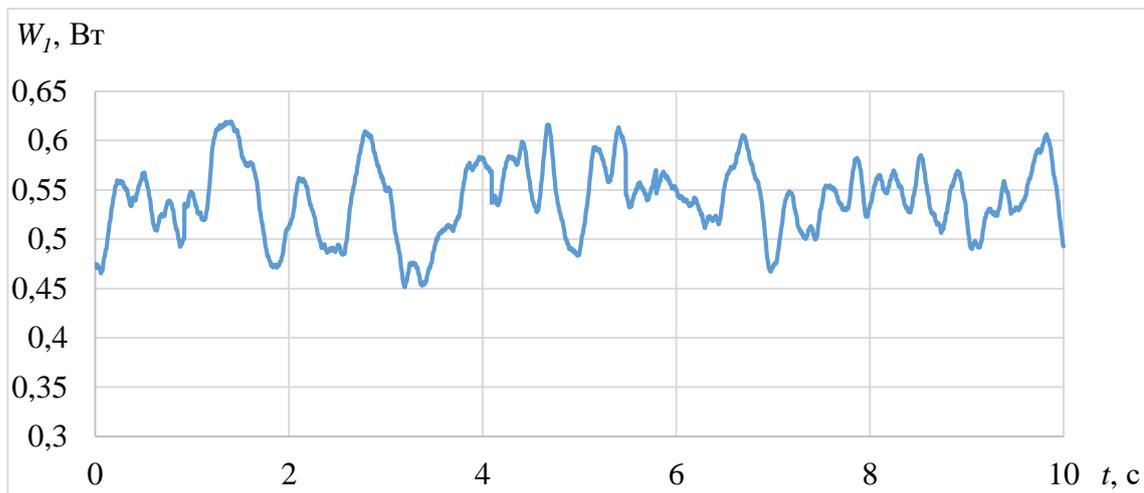


Рис. 3. График усреднённой мощности лазера от времени

Поскольку в калибруемом болометре используется металлическая сетка, которая, однако, не учитывается при теоретическом расчёте коэффициента чувствительности, возникает необходимость нахождения прозрачности используемой сетки. Для определения коэффициента прозрачности были измерены напряжения, возникающие на болометре с установленной сеткой U_g и без неё U_e . По причине исключения влияния переходных процессов в материале детектора после смены знака полярности для вычисления амплитуды сигнала рассматривались горизонтальные участки импульса. Вычисленные амплитуды напряжения на болометре с сеткой $U_g = 0,081$ В, без сетки – $U_e = 0,184$ В.

Коэффициент прозрачности равен $\alpha = \frac{U_g}{U_e} = \frac{0,081}{0,184} = 0,44 = 44\%$.

Для определения количества энергии W , попадающей на поверхность детектора в секунду, использовался цифровой измеритель оптической мощности. Были проведены три измерения средней за 10 секунд мощности W_i и

вычислено усреднённое значение $W_0 = \frac{\sum_{i=1}^3 W_i}{3}$.

Поскольку использованный при калибровке лазер имел импульсный режим работы, из графика зависимости напряжения на болометре от времени можно определить такие характеристики режима лазера, как период сигнала T и

длительность импульса L . Таким образом, скважность сигнала лазера может быть вычислена как $p = T / L$.

Таблица 1. Усредненные по времени измерений мощности W_i , средняя от трёх измерений мощность W_{mean} , программно рассчитанное среднеквадратическое отклонение σ

№ измерения	W , мВт	σ , мВт
W_1	540	37
W_2	553	41
W_3	542	41
W_{mean}	545	40

По осциллограммам зависимости напряжения от времени были вычислены скважности p_i для трёх различных периодов и усреднением определена скважность лазера p . Среднее значение мощности – W_{mean} , поэтому амплитуда мощности лазера вычисляется по формуле:

$$W_A = p \cdot W_{mean} = 2,065 \cdot 0,545 = 1,13 \text{ Вт}.$$

Таблица 2. Скважности p_i для болометра с сеткой и болометра без сетки и среднее значение p

	p_1	p_2	p_3	p
Болометр с сеткой	2,067	2,064	2,061	2,065
Болометр без сетки	2,067	2,061	2,071	

Для минимизации отражения света от поверхности диска проведено ее чернение углеродом. Пленка углерода толщиной 400 нм наносилась при помощи магнетронного распыления. Табличная степень черноты углерода, использованная в данной работе, принималась $A = 0,96$. Таким образом, поскольку луч лазера при калибровке направлялся по нормали к поверхности диска, зависимость поглощательной способности от угла падения излучения можно не учитывать, и степень черноты определяет отношение поглощённой кристаллом мощности к попадающей на поверхность.

Тогда расчётная чувствительность болометра без сетки по определению равна:

$$K_{\text{практ}} = \frac{A \cdot W_A}{S \cdot U_e} = \frac{0,96 \cdot 1,13}{0,184 \cdot 0,28} = 21 \frac{\text{Вт}}{\text{В} \cdot \text{см}^2}.$$

Нахождение коэффициента чувствительности для неэкранированного болометра, несмотря на возможность сверить соответствие экспериментального результата теоретическому, не имеет практической применения ввиду использования указанной выше металлической сетки. Для определения плотности энергии потока плазмы в условиях реального эксперимента был найден коэффициент чувствительности экранированного болометра K_{grid} :

$$K_{grid} = \frac{K_{\text{практ}}}{\alpha} = \frac{21}{0,44} = 47,7 \frac{\text{Вт}}{\text{В} \cdot \text{см}^2}.$$

4. Погрешности

Геометрия образца измерялась штангенциркулем, поэтому уместно принять погрешности измерения радиуса диска ниобата лития и её толщины равными половине цены деления измерительного прибора, т.е. $\Delta r = \Delta d = 0,05 \text{ мм} = 0,005 \text{ см}$. Тогда погрешность значения площади диска равна

$$\delta S = 2 \frac{\Delta r}{r} = 2 \cdot \frac{0,005}{0,3} = 0,03 = 3\%.$$

Погрешность значения сопротивления нагрузки указана производителем и равна $\delta R_r = 5\%$.

Относительная погрешность теоретического коэффициента $K_{\text{теор}}$ равна сумме относительных погрешностей $\delta d = \Delta d / d$ толщины, δS площади и δR_r сопротивления:

$$\delta K_{\text{теор}} = \delta d + \delta R_r + \delta S = \frac{0,005}{0,05} + 0,05 + 0,03 = 0,18 = 18\%.$$

Абсолютная погрешность $\Delta K_{\text{теор}} = 0,18 \cdot 26,9 = 4,8 \frac{\text{Вт}}{\text{В} \cdot \text{см}^2}$.

Ввиду высокой точности осциллографа погрешность измерения напряжения на болометре характеризуется шириной кривой U_w на графике зависимости напряжения от времени (рис. 2).

$$\Delta U_g = U_{wg} = 0,007 \text{ В},$$

$$\Delta U_e = U_{we} = 0,006 \text{ В.}$$

Для определения погрешности измерения скважности рассчитывается среднеквадратическое отклонение средней скважности p по формуле:

$$\Delta p = \sigma p = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (p_i - p)^2} = 0,004.$$

Программное обеспечение цифрового измерителя мощности содержит функцию расчёта среднеквадратического отклонения σ_i для мощности W_i . Погрешность средней мощности W_{mean} по правилу сложения погрешностей равна $\Delta W = \sigma W_{mean} = 40 \text{ мВт} = 0,04 \text{ Вт}$.

Относительная погрешность расчетного коэффициента $K_{\text{практ}}$ равна сумме относительных погрешностей $\delta W = \Delta W / W_{mean}$ мощности, $\delta p = \Delta p / p$ скважности, $\delta U_e = \Delta U_e / U_e$ напряжения, δS площади:

$$\delta K_{\text{практ}} = \delta W + \delta p + \delta U_e + \delta S = \frac{0,04}{0,545} + \frac{0,004}{2,065} + \frac{0,006}{0,184} + 0,03 = 0,14 = 14\%.$$

$$\text{Абсолютная погрешность } \Delta K_{\text{практ}} = 0,14 \cdot 21 = 2,9 \frac{\text{Вт}}{\text{В} \cdot \text{см}^2}.$$

Относительная погрешность коэффициента K_{grid} равна сумме относительных погрешностей $\delta W = \Delta W / W_{mean}$ мощности, $\delta p = \Delta p / p$ скважности, $\delta U_g = \Delta U_g / U_g$ напряжения, δS площади:

$$\delta K_{\text{grid}} = \delta W + \delta p + \delta U_g + \delta S = \frac{0,04}{0,545} + \frac{0,004}{2,065} + \frac{0,007}{0,081} + 0,03 = 0,19 = 19\%.$$

$$\text{Абсолютная погрешность } \Delta K_{\text{grid}} = 0,19 \cdot 47,7 = 9 \frac{\text{Вт}}{\text{В} \cdot \text{см}^2}.$$

5. Плотность энергии плазмы

По результатам эксперимента на установке ГДЛ снята временная зависимость напряжения $U(t)$ на болометре. Для получения зависимости плотности мощности плазмы от времени сигнал был преобразован согласно полученному ранее значению коэффициента K_{grid} по формуле $W(t) = U(t) \cdot K_{grid}$ (рис.6).

Из полученного графика виден характерный сценарий эксперимента на ГДЛ. Для создания предварительной (мишенной) плазмы в интервале 2-4 мс

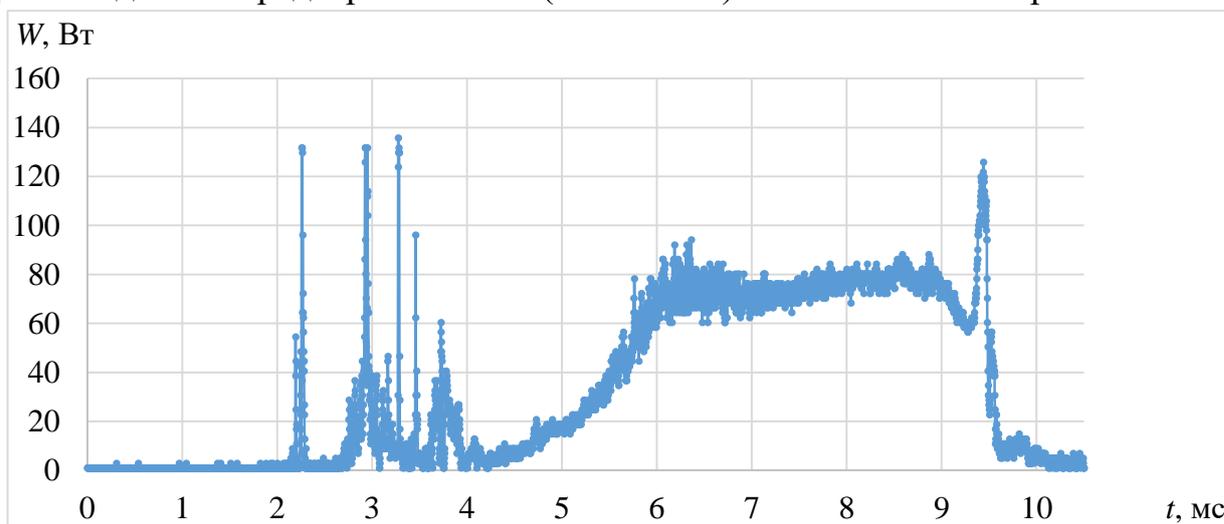


Рис. 6. График временной зависимости плотности энергии, попадающей за единицу времени на болометр

используется гиротрон, генерирующий микроволновое излучение на частоте электронно-циклотронного резонанса 54,5 ГГц. На этапе ЭЦР разряда в плазме генерируются электромагнитные колебания большой амплитуды, которые регистрирует болометр. После этого на интервале 4-9 мс происходит нагрев мишенной плазмы посредством инъекции нейтральных атомов с энергиями до 20 кэВ, отражённый на рис.6 ростом плотности энергии плазмы с последующим выходом на некоторый постоянный уровень. При $t = 9$ мс инжекторы отключаются, и на графике наблюдается спад плотности энергии до нуля [3].

Поскольку наибольший интерес представляет значение плотности мощности на интервале 7 – 9 мс, последующая обработка данных производилась на нём.

Для выбранного временного интервала произведено экспоненциальное сглаживание временной зависимости напряжения на болометре с фактором затухания 0,3, после чего вычислено среднее значение сигнала:

$$U_{mean} = 1,5 \text{ В.} \quad (4)$$

Среднеквадратическое отклонение напряжения $U(t)$ вычислялось по формуле

$$\Delta U_{mean} = \sigma U_{mean} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (U_i - U_{mean})^2}, \text{ где } U_i - i\text{-е значение напряжения в}$$

обрабатываемой выборке, n – количество значений в выборке: $\Delta U_{mean} = 0,004$ В.

Тогда плотность мощности плазмы равна:

$$W_{\text{практ}} = U_{mean} \cdot K_{grid} = 1,5 \cdot 47,7 = 72 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}.$$

Относительная погрешность значения $W_{\text{практ}}$ вычисляется как сумма относительных погрешностей $\delta U_{mean} = \Delta U_{mean} / U_{mean}$ среднего напряжения и δK_{grid} коэффициента чувствительности экранированного болометра и равна:

$$\delta W_{\text{практ}} = \delta U_{mean} + \delta K_{grid} = \frac{0,004}{1,5} + 0,19 = 0,19 = 19\%.$$

Абсолютная погрешность значения $W_{\text{практ}}$ равна $\Delta W_{\text{практ}} = \delta W_{\text{практ}} \cdot W_{\text{практ}} = 0,19 \cdot 72 = 14$ Вт/см².

6. Оценка вклада пьезоэлектричества

Наличие спонтанной поляризации кристаллов ниобата лития способствует проявлению не только пьезоэлектрического, но и пьезоэлектрического эффекта. Таким образом, для получения корректного результата необходимо учесть вклад в сигнал пьезоэлектрического заряда, возникающего на детекторе.

Количественной характеристикой возникающего на поверхности детектора заряда является пьезоэлектрический модуль d_{ij} вещества – коэффициент пропорциональности между возникшей плотностью заряда на поверхности сегнетоэлектрика и механическим напряжением, действующим на материал:

$$q = d_{ij} \cdot F,$$

где q – генерируемый заряд, d_{ij} – изотермический пьезоэлектрический модуль ниобата лития, F – приложенная к поверхности детектора сила. Можно считать, что в калибруемом болометре нормаль поверхности диска параллельна вектору

средней скорости попадающей на поверхность плазмы, поэтому индексы $i, j = 3$, а используемый в формуле модуль – d_{33} .

Плотность тока ионов, попадающих на датчик, равна $j_{33} = qnv$, где q – заряд ионов, n – объёмная концентрация ионов, v – средняя скорость частиц в потоке. Предполагая, что $v \ll c$ ввиду малых энергий вылетающих частиц (~1 кэВ), можно выразить среднюю энергию частиц как $E = mv^2 / 2$, не используя релятивистские поправки. Здесь m – масса частицы (в условиях эксперимента масса дейтрона $m = 3,34 \cdot 10^{-27}$ кг).

Считая, что все падающие частицы остаются на болометре, выразим силу, действующую на датчик:

$$F = \frac{dP}{dt} = \frac{n \cdot v dt \cdot S \cdot mv}{dt} = Smnv^2$$

Выражая переменные n и v , получим:

$$F = Smnv^2 = Sqnv \frac{m}{q} \sqrt{\frac{mv^2}{2} \frac{2}{m}} = j_{33} S \frac{m}{q} \sqrt{\frac{2E}{m}} = \frac{j_{33} S \sqrt{2mE}}{q}$$

Тогда плотность заряда на пластинке равна $\sigma = d_{33} \cdot \frac{F}{S} = d_{33} \cdot j_{33} \cdot \frac{\sqrt{2mE}}{q}$, а напряжение, создаваемое на диске:

$$U = \frac{\sigma}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} d = \left(\frac{\varepsilon_{33}^s}{\varepsilon_0} \right)^{-1} \frac{d_{33} j_{33} \sqrt{2mE}}{\varepsilon_0 q} d. \quad (5)$$

Для оценки используем следующие значения энергии и плотности тока:

$$j_{33} = 50 \frac{\text{мА}}{\text{см}^2} = 500 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}, \quad E = 1 \text{ кэВ} = 1,6 \cdot 10^{-16} \text{ Дж.} \quad \text{Табличное значение}$$

$$d_{33} = 19,22 \cdot 10^{-11} \text{ Кл / Н, диэлектрической постоянной} - \frac{\varepsilon_{33}^s}{\varepsilon_0} = 28.$$

Подставляя переменные в (5), получим $U = 0,0012$ В, что составляет 0,08% от среднего напряжения U_{mean} , вычисленного в (4). Следовательно, в условиях

эксперимента на установке ГДЛ влиянием на сигнал пироэлектрического напряжения можно пренебречь.

7. Заключение

Таким образом, были получены следующие результаты калибровки: теоретический коэффициент чувствительности неэкранированного болометра –

$K_{\text{теор}} = 26,9 \pm 4,8 \frac{\text{Вт}}{\text{В} \cdot \text{см}^2}$, расчётный коэффициент чувствительности

неэкранированного болометра – $K_{\text{практ}} = 21 \pm 2,3 \frac{\text{Вт}}{\text{В} \cdot \text{см}^2}$. На основании этих

расчетов можно заключить, что теоретический и экспериментальный коэффициенты совпадают в пределах установленной погрешности.

Был рассчитан коэффициент вольт-ваттной чувствительности экранированного болометра - $K_{\text{grid}} = 47,7 \pm 9 \frac{\text{Вт}}{\text{В} \cdot \text{см}^2}$

Кроме того, на основании коэффициента K_{grid} была рассчитана плотность мощности потока плазмы в ходе эксперимента на установке ГДЛ:

$W_{\text{практ}} = 72 \pm 14 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$.

В дальнейшем представленный в данной работе коэффициент чувствительности планируется использовать при работе с системой болометров, установленных на плазмоприёмнике ГДЛ, для изучения полной величины потерь энергии из установки с целью их минимизации.

Погрешность измерений коэффициента зависит от параметров лазера, использующегося при калибровке, и может быть значительно уменьшена путём подбора лазерной указки с более равномерным распределением излучения по площади.

8. Список литературы

1. Котельников. И. А. Лекции по физике плазмы. / И. А. Котельников. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 384 с.

2. Багрянский П. А., Бочаров В. Н., Дейчули П. П., Иванов А. А., Карпушов А. Н., Максимов В. В., Рогозин А. И., Саликова Т. В. Диагностический комплекс установки ГДЛ для изучения нагрева плазмы при инжекции мощных атомарных пучков. Новосибирск: ИЯФ СО РАН. 1993. (Препринт / ИЯФ СО РАН; №70).
3. D.V. Yakovlev, A.G. Shalashov, E.D. Gospodchikov, A.L. Solomakhin, V.Ya. Savkin and P.A. Bagryansky. Electron cyclotron plasma startup in the GDT experiment // Nuclear Fusion. 2017. Vol. 57. No. 1.