Irradiation of a Thermoelectric Detector by Pulsed Broadband Radiation from a Continuous Optical Discharge

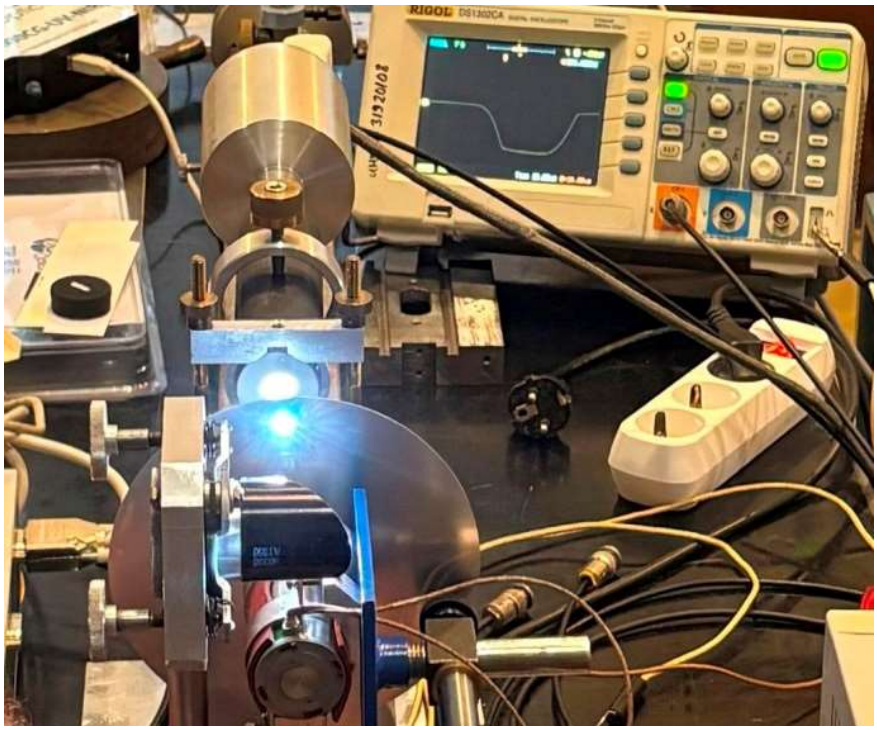
F. V. Filippov, M. Yu. Yakimov, V. N. Androsenko, M. A. Kotov, N. G. Solovyov, A. N. Shemyakin

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS,
Moscow, 119526, Russia
filippov@ipmnet.ru

Abstract

This article is dedicated to studying the characteristics of a thermoelectric detector with thermopower anisotropy in GeTe-based films when exposed to pulsed broadband radiation from a continuous optical discharge. The radiation power and its spectral characteristics were measured. The time response of the thermoelectric detector and its reaction to broadband radiation were determined using apertures of various shapes and areas. The detector signal steadily increased with increasing irradiation power. It was established that the investigated thermoelectric detector exhibits high speed and can be used in the study of the characteristics of broadband radiation from various light sources.

Key words: heat flux, broadband radiation, continuous optical discharge, heat transfer, thermoselectric detector, thermoEMF



Experimental setup for irradiating a thermoelectric detector with pulsed broadband radiation from a continuous optical discharge

УДК 533.9:536.2

Облучение термоэлектрического детектора импульсным широкополосным излучением непрерывного оптического разряда

Ф. В. Филиппов, М. Ю. Якимов, В. Н. Андросенко, М. А. Котов, Н. Г. Соловьев, А. Н. Шемякин

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
Россия, Москва, 119526, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1
filippov@ipmnet.ru

Аннотация

Статья посвящена исследованию характеристик термоэлектрического детектора с анизотропией термоЭДС в пленках на основе GeTe при его облучении импульсным широкополосным излучением непрерывного оптического разряда. Измерены мощность излучения и его спектральные характеристики. Определены временные зависимости детектора, его реакция на широкополосное излучение при использовании диафрагм, различных по форме и площади. Сигнал детектора стабильно увеличивался при увеличении мощности облучения. Установлено, что термоэлектрический детектор имеет высокое быстродействие и может использоваться в исследовании характеристик широкополосного излучения от различных световых источников.

Ключевые слова: тепловой поток, широкополосное излучение, непрерывный оптический разряд, теплообмен, термоэлектрический детектор, термоЭДС

1. Введение

При исследовании теплообмена для решения научных и инженерных задач необходимо получать достоверные экспериментальные данные об изменении тепловых характеристик: температуры поверхности исследуемых сред и теплового потока, поступающего от них. Термоэлектрические детекторы (в дальнейшем – ТД) находят широкое применение для измерения быстро меняющихся тепловых потоков в импульсных газодинамических процессах [1] и регистрации колебаний мощности лазерного излучения [2]. Принцип действия ТД заключается в возникновении термоЭДС в плоскости анизотропной пленки вследствие температурного градиента, создаваемого нагревом внешней поверхности пленки под воздействием приходящего на него теплового потока. ТД изготавливается в вакуумной камере методом косого напыления пленок на основе хрома, алюминия и других материалов на теплопроводящую кремниевую подложку. В результате возникают столбчатые наклонные монокристаллические структуры (размером в несколько нм) с контактным сопротивлением между ними [3]. Основными преимуществами ТД являются высокое быстродействие, механическая и термическая стабильность чувствительного элемента и возможность применения в условиях заметной ионизации газа [4].

Данная работа посвящена исследованию характеристик ТД с чувствительным элементом на основе пленок GeTe при его облучении широкополосным импульсным излучением непрерывного оптического разряда (в дальнейшем – НОР). Полученные результаты позволяют расширить сферу применения ТД для регистрации радиационных тепловых потоков и исследования характеристик излучения оптических разрядов.

2. Экспериментальная установка

Для исследования характеристик ТД при импульсном облучении была разработана установка, использующая широкополосное излучение НОР [5, 6] в ксеноне высокого давления. Оптическая схема установки представлена на рис. 1.

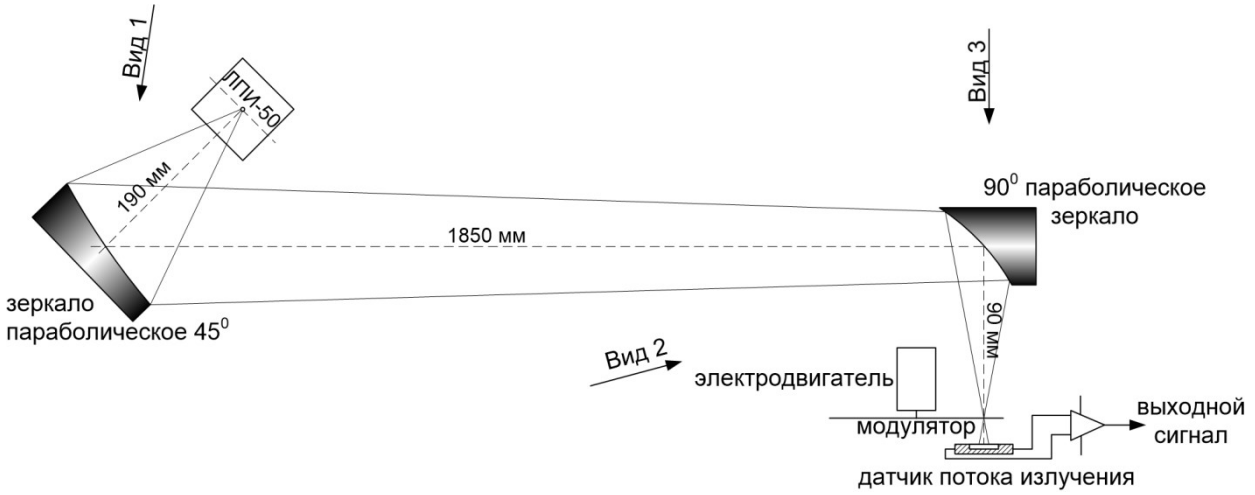


Рис. 1. Оптическая схема установки импульсного облучения ТД широкополосным излучением НОР

В качестве источника излучения использовался прибор ЛПИ-50 [7] на основе НОР. Часть излучения НОР собиралась внеосевым параболическим зеркалом (угол отклонения $\alpha = 45°$, диаметр $D1 = 101.6$ мм, эффективное фокусное расстояние $F1 = 178.55$ мм). Телесный угол сбора излучения составлял 0.25 стерадиан. Собранное излучение направлялось на второе внеосевое параболическое зеркало ($\alpha = 90°$, $D2 = 38.1$ мм, $F2 = 101.6$ мм), облучающее ТД. Облучающее зеркало создавало увеличенное изображение плазмы в плоскости механического модулятора с вращающимся диском. После модулятора расширяющийся пучок излучения попадал на ТД, который устанавливался на таком расстоянии от зеркала, чтобы диаметр пятна излучения соответствовал размеру его приемной площадки. Для стабилизации температуры ТД был установлен на алюминиевом радиаторе. Фотография узла с излучателем ЛПИ-50 и зеркалом сбора излучения показана на рис. 2.

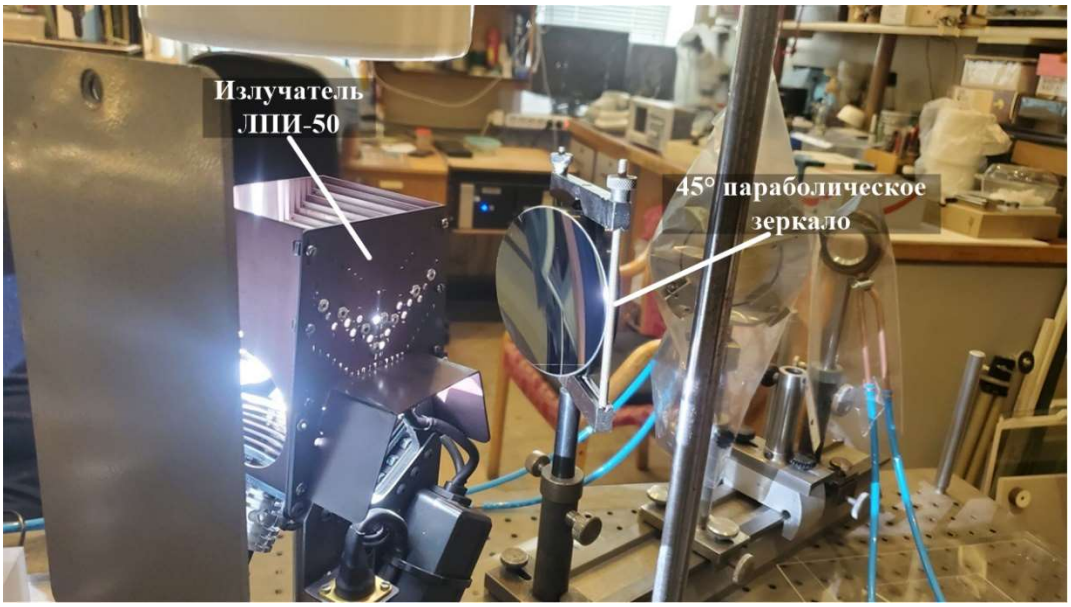


Рис. 2. Фото узла с излучателем ЛПИ-50 и зеркалом сбора излучения (Вид 1)

На рис. 3 изображено фото узла с облучающим зеркалом, модулятором излучения и установленным ТД.

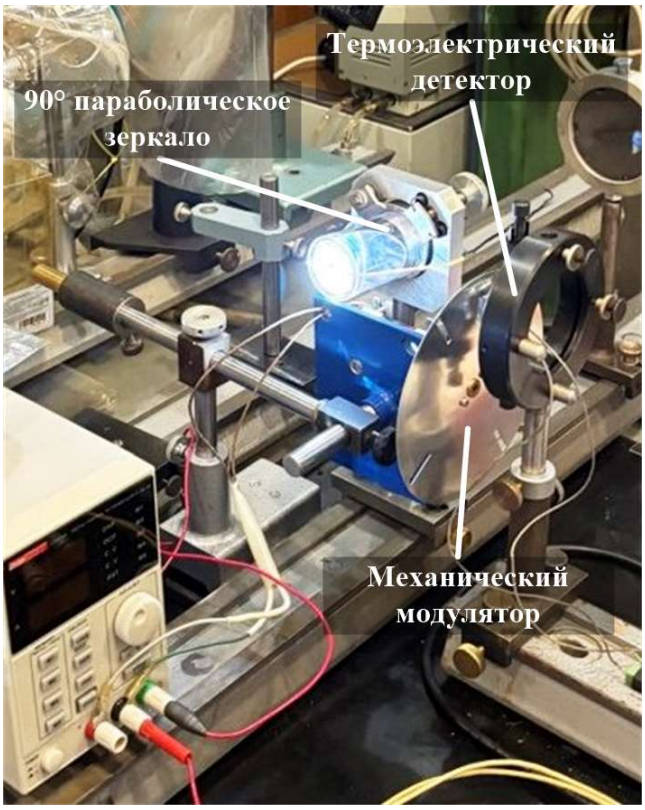


Рис. 3. Фото узла с облучающим зеркалом, модулятором излучения и установленным ТД (Вид 2)

Для модуляции излучения был изготовлен диск с четырьмя отверстиями, расположенными симметрично относительно центра (рис. 4). Модулятор устанавливался таким образом, чтобы при вращении диска модуляция излучения происходила в плоскости изображений оптической системы.

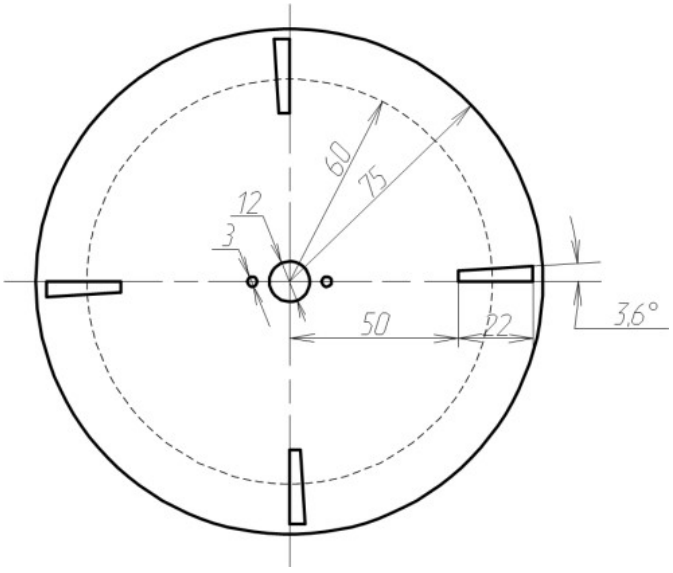


Рис. 4. Диск механического модулятора широкополосного излучения. Пунктирной линией показана траектория пятна излучения НОР при вращении диска

Скорость вращения модулятора равнялась 6000 ± 200 об/мин. Каждое отверстие модулятора представляло собой участок сектора с углом 3.6° (1/100 полного круга).

Линейная скорость перемещения края отверстия модулятора в зоне перетяжки пучка излучения при частоте вращения диска 100 Гц определяется по формуле

$$v = 2\pi \cdot R \cdot f_{\text{диска}} = 2 \cdot 3.1416 \cdot 0.06 \cdot 100 \approx 37.7 \text{ м/с}$$

При характерных размерах изображения плазмы, создаваемого оптической системой в плоскости диска, около 1.2 мм профиль генерируемого оптического импульса приобретает симметричную трапециевидную форму. Длительность переднего и заднего фронтов (фазы нарастания и спада сигнала от 0 до 100 %), определяемая временем полного пересечения изображения границей отверстия $t_{\text{фронт}} = d/v$, составляет 31.8 мкс с учетом биения диска (его поперечного смещения относительно фокуса) и оптических аберраций системы.

3. Измерение импульсов широкополосного излучения

Измерение формируемых импульсов широкополосного излучения НОР проводилось двумя методами: фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) ФЭУ-68 и измерителем светового потока на быстродействующем фотодиоде SFH-203P. На рис. 5 представлена схема измерения импульсов излучения ФЭУ-68 с чувствительностью в видимой области.

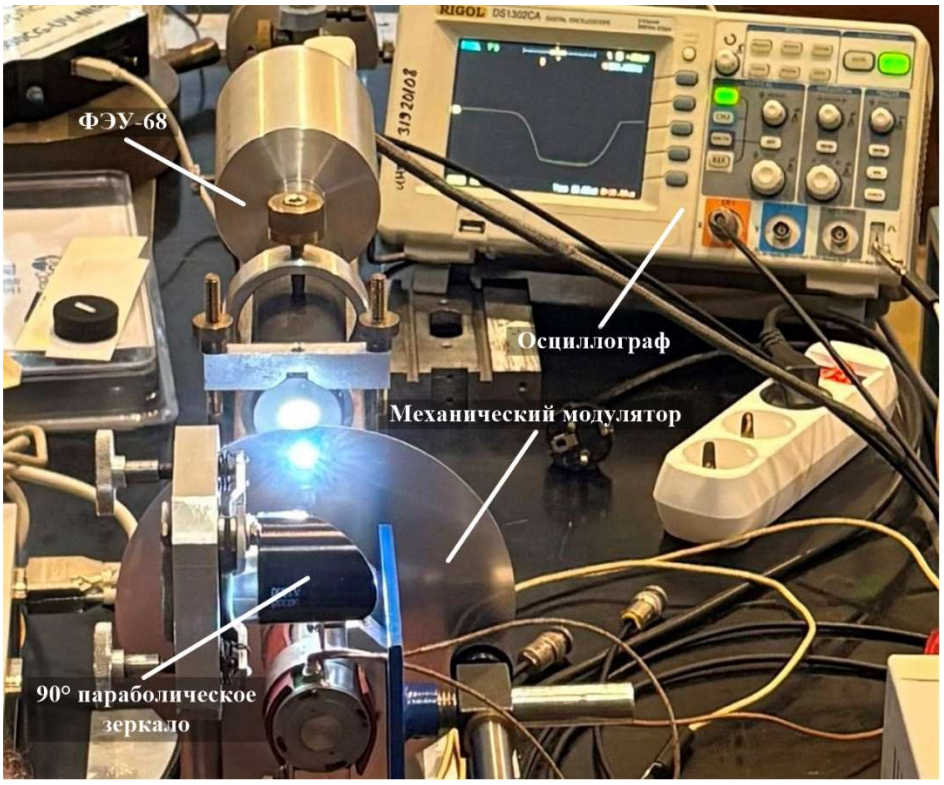


Рис. 5. Узел фокусировки широкополосного излучения НОР, механический модулятор с вращающимся диском, рассеивающий экран, фотоэлектронный умножитель ФЭУ-68 и осциллограф для измерения импульсных характеристик излучения (Вид 3)

Для точной передачи фронтов импульсных сигналов на выходе ФЭУ был установлен повторитель сигнала с нагрузкой на сопротивление $R_{\text{вых}} = 50$ Ом. На место датчика широкополосного излучения устанавливался матовый рассеивающий экран, за которым на некотором расстоянии устанавливался фотокатод ФЭУ. Для работы в области линейности ФЭУ подбиралось расстояние от экрана до фотокатода. Оптический путь от рассеивающего экрана до фотокатода проходил внутри светонепроницаемой трубки для того, чтобы исключить засветку фотокатода посторонним излучением.

Измеритель светового потока разработан на быстродействующем фотодиоде SFH-203P со временем нарастания-спада выходного сигнала 5 нс [8] и высокоскоростном ОУ типа LM7171 [9]. Схема измерителя показана на рис. 6.

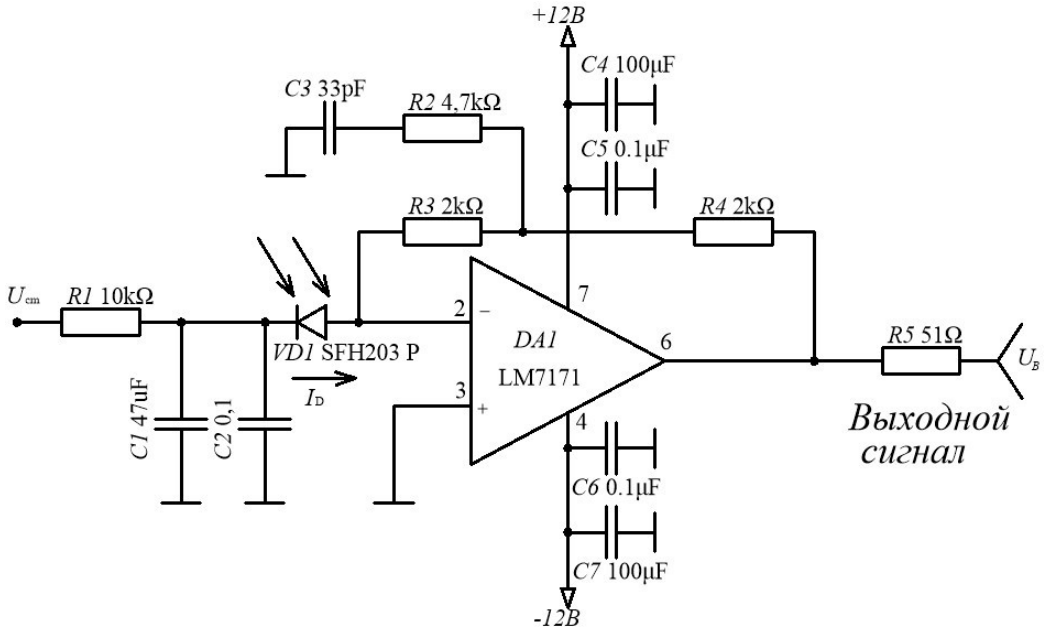


Рис. 6. Схема измерителя светового потока

Фотодиод *VD1* работает в режиме генератора тока, а высокоскоростной ОУ DA1 обеспечивает преобразование этого тока в напряжение [10]. Сигналы с ФЭУ и измерителя светового потока регистрировались двухканальным осциллографом с 8-разрядным разрешением Hantek DSO5202P [11] и записывались в файлы *".csv"*. Результаты измерений показаны на рис. 7.

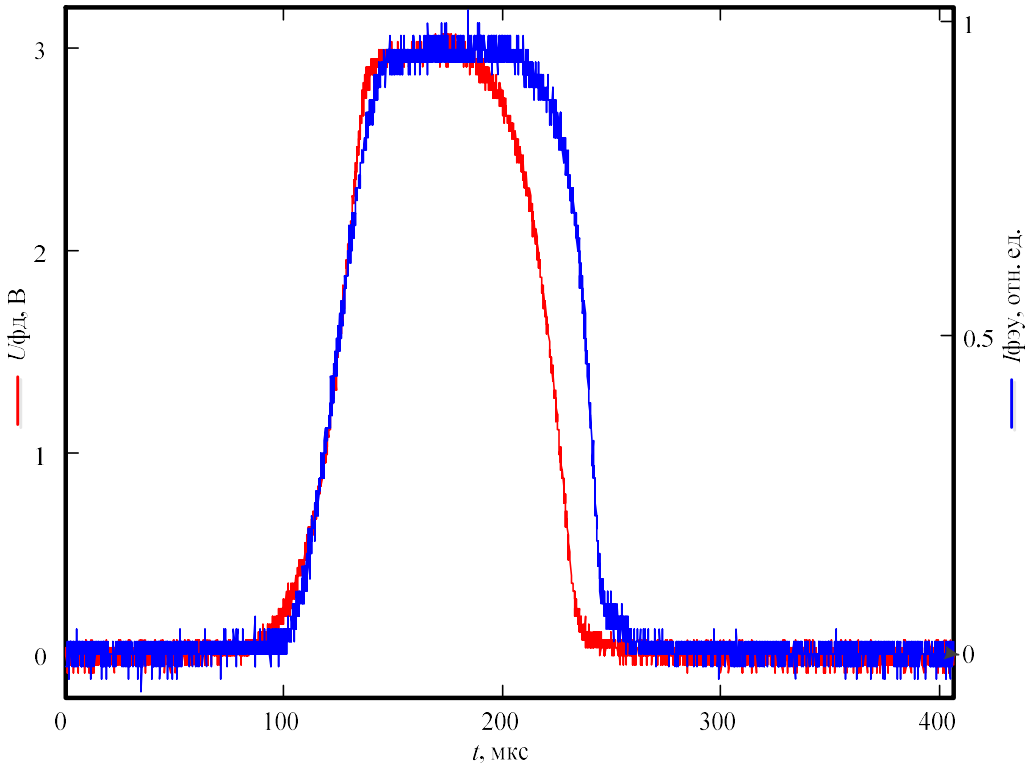


Рис. 7. Импульсы излучения, зарегистрированные ФЭУ (синий) и измерителем светового потока (красный)

На рис. 7 импульсы излучения совмещены во времени по уровню 50% от амплитуды сигналов, так как именно в этот момент производился запуск развертки осциллографа. Результаты эксперимента обрабатывались программой, написанной в пакете компьютерной математики Mathcad 15 [12]. Записанные файлы *".csv"* считывались в массив функцией *READCSV("Имя_файла.csv")*. Исходный массив напряжений измерителя светового потока в мВ переводился в вольты, а массив напряжений ФЭУ в относительные единицы путем деления на 1000. Функцией submatrix выделялся массив начала сигнала, а с помощью mean определялось среднее значение его смещения для последующего вычитания из исходных данных. Затем эта же функция submatrix извлекала массив амплитудных значений в зоне максимума, после чего mean вычисляла их среднее значение. Для расчета временных параметров графически определялись ширина импульса излучения, длительность импульса по уровню 50 % и скорость его нарастания-спада в диапазоне $10 \div 90$ % от амплитуды. Временные параметры импульса широкополосного излучения, сглаженного по 9 точкам функцией medsmooth, для измерителя светового потока показаны на рис. 8.

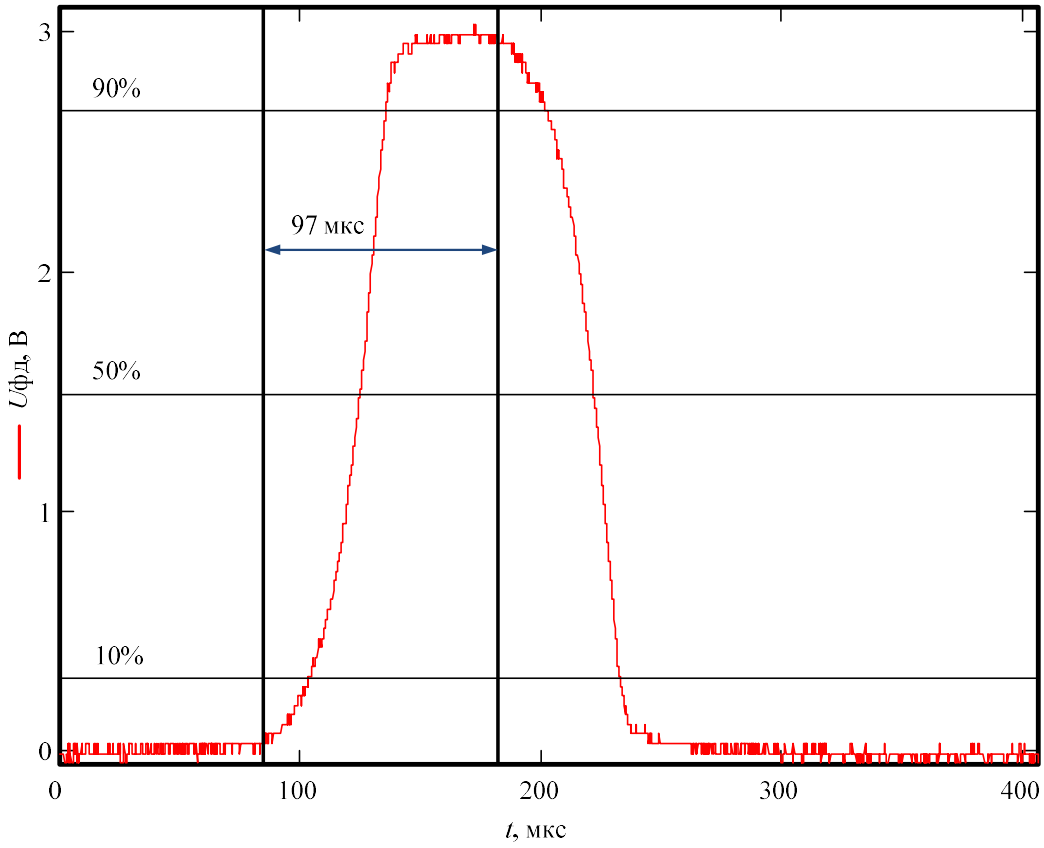


Рис. 8. Временные параметры импульса широкополосного излучения, сглаженного по 9 точкам, для измерителя светового потока

На рис. 8 показана экспериментальная ширина импульса излучения, равная 97 мкс. Частота импульсов излучения в эксперименте составила 405 Гц. Тогда расчетная ширина импульса излучения t_l в мкс равна

$$t_l = \frac{1 \cdot 4 \cdot 3.6 \cdot 1000000}{405 \cdot 360}, \quad t_l = 98.8 \,\text{мкс}\,.$$

По аналогичной методике определены временные параметры импульса широкополосного излучения для ФЭУ. Результаты вычислений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Временные параметры импульса широкополосного излучения для измерителя светового потока и ФЭУ

Сигнал	Ширина импульса излучения, мкс	Длительность импульса 50%, мкс	Время нарастания 10÷90 %, мкс	Время спада 90÷10 %, мкс
Измеритель светового потока	97	97.2	32.6	31.7
ФЭУ	107.4	113.7	30.6	21.6

Ширина импульса излучения, измеренная ФЭУ, оказалась больше расчетного значения. Вероятно, это связано с тем, что в эксперименте ФЭУ работал в режиме близком к насыщению. Поэтому для оценки воздействия импульсного широкополосного излучения НОР на ТД в качестве сигнала для сравнения был выбран сигнал измерителя светового потока.

4. Измерение мощности и спектральных характеристик излучения НОР

Для импульсов широкополосного излучения НОР были проведены измерения мощности и спектральных характеристик излучения. Использовался стандартный измеритель мощности излучения OPHIR StarLite [13] с термопарным датчиком 50(150)A-BB-SH-26 [14], прокалиброванным в диапазоне длин волн короче 800 нм.

Спектральная освещенность в области расположения тестируемого ТД измерялась оптоволоконным спектрометром Ocean Optics HR4000-CG-UV-NIR в спектральном диапазоне 220÷1020 нм. Излучение в спектрометр подводилось оптоволоконным кабелем типа XSR 450 мкм длиной 2 м и стандартным косинус-корректором с рассеивателем из спектралона на входе. Диаметр входной апертуры равнялся 3.9 мм. Спектрометр вместе с оптоволоконным кабелем и косинус-корректором калибровался с помощью стандартного калибровочного источника DH-2000 (паспортизованный источник широкополосного излучения с дейтериевой и галогенной вольфрамовой лампой). Оптическая схема измерения спектральных характеристик излучения представлена на рис. 9.

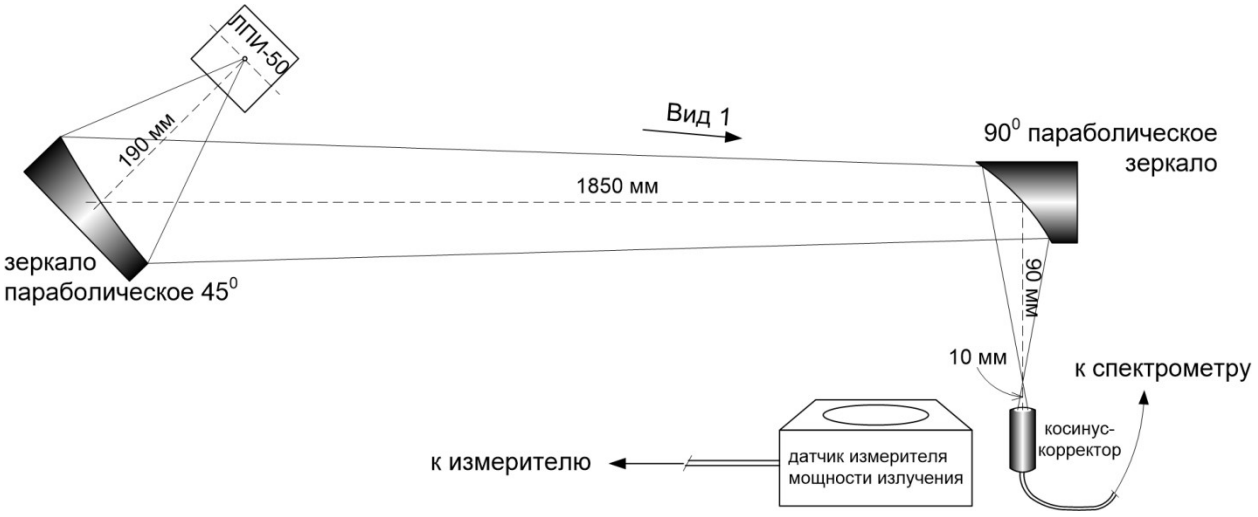


Рис. 9. Оптическая схема измерения спектральной освещенности и интегральной мощности широкополосного излучения НОР

Входная апертура оптоволоконного спектрометра устанавливалась на расстоянии 90 мм от второго параболического зеркала, в плоскости расположения приемной поверхности тестируемого ТД (рис. 10).

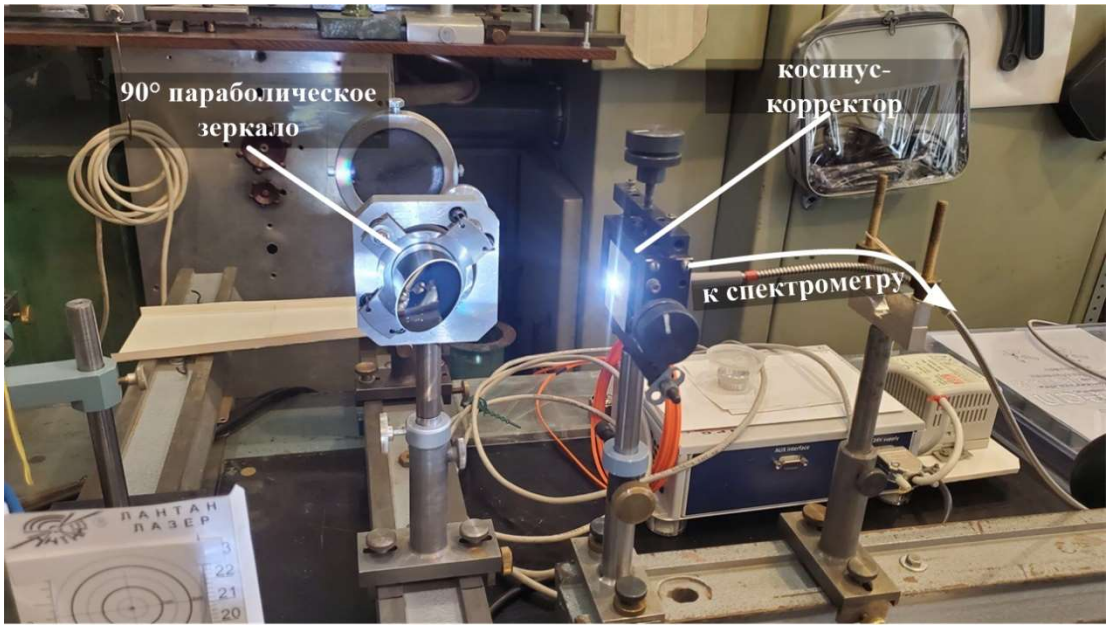


Рис. 10. Фото с датчиком измерения спектральной освещенности

Для измерения полной мощности широкополосного излучения вместо входной апертуры спектрометра устанавливался датчик измерителя мощности с апертурой диаметром 26 мм (рис. 11).

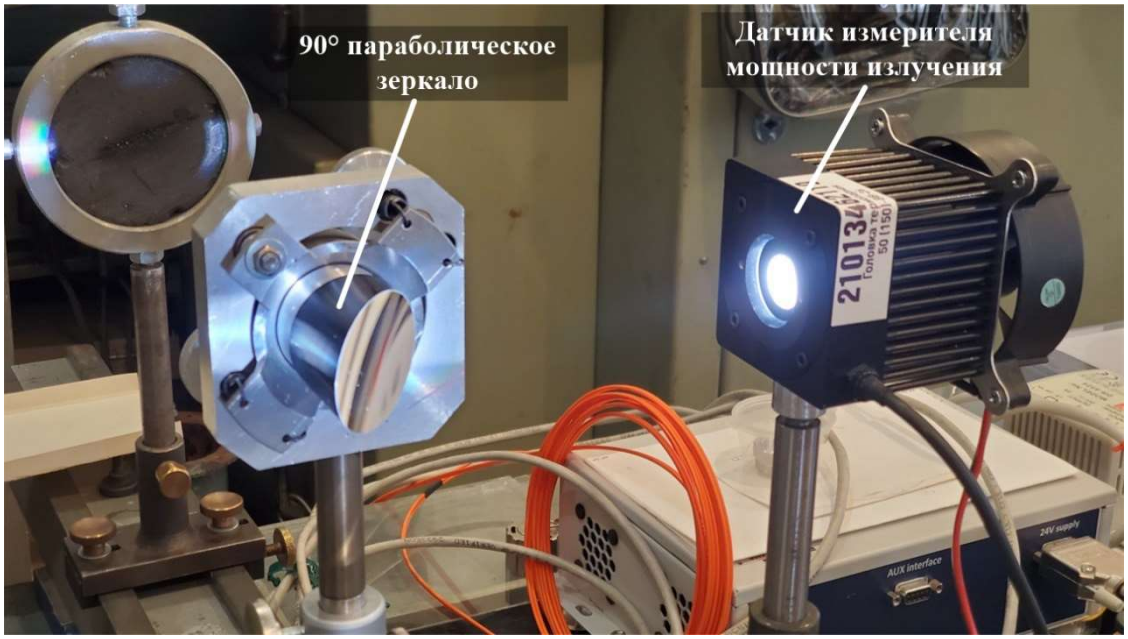


Рис. 11. Фото с измерителем интегральной мощности широкополосного излучения

Проводились измерения спектральной освещенности ТД и интегральной мощности падающего излучения при трех режимах работы:

1) Обычный режим работы источника ЛПИ-50 сразу после его включения, мощность потока излучения 200 мВт.
2) Обычный режим работы после 20 минут прогрева источника ЛПИ-50, мощность потока излучения 215 мВт.
3) Режим работы источника ЛПИ-50 с повышенным током лазерных диодов, мощность потока излучения 300 мВт.

Полученные данные по спектральной освещенности входной апертуры спектрометра для указанных режимов работы источника ЛПИ-50 в диапазонах длин волн 220÷750 нм и 720÷1020 нм приведены на рисунках 12 и 13.

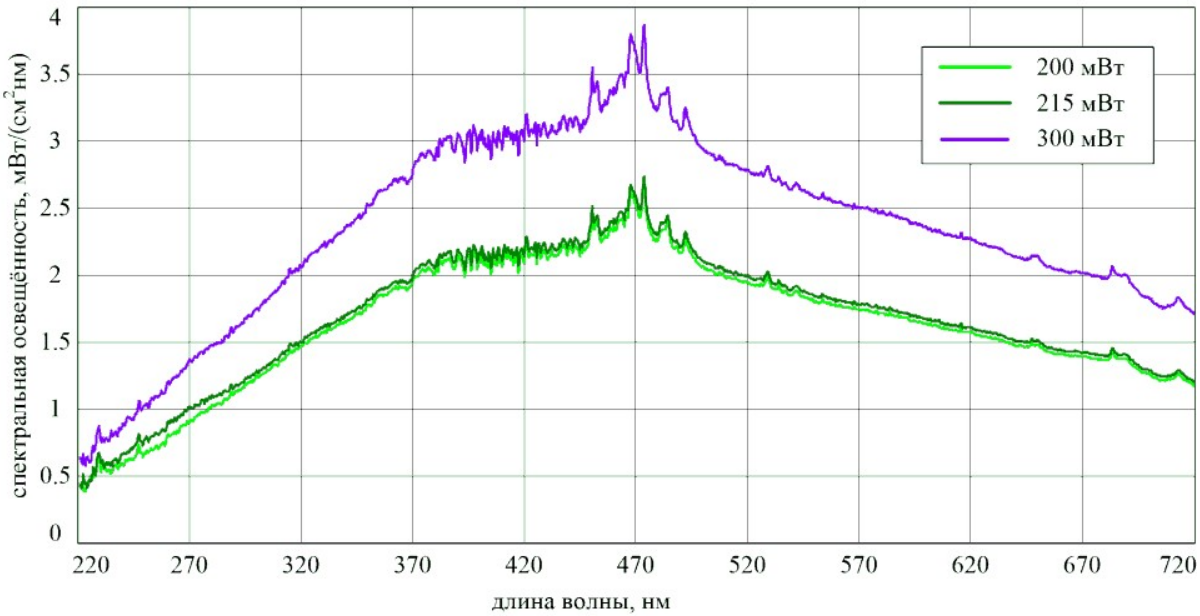


Рис. 12. Спектральная освещенность исследуемого ТД в диапазоне 220÷720 нм

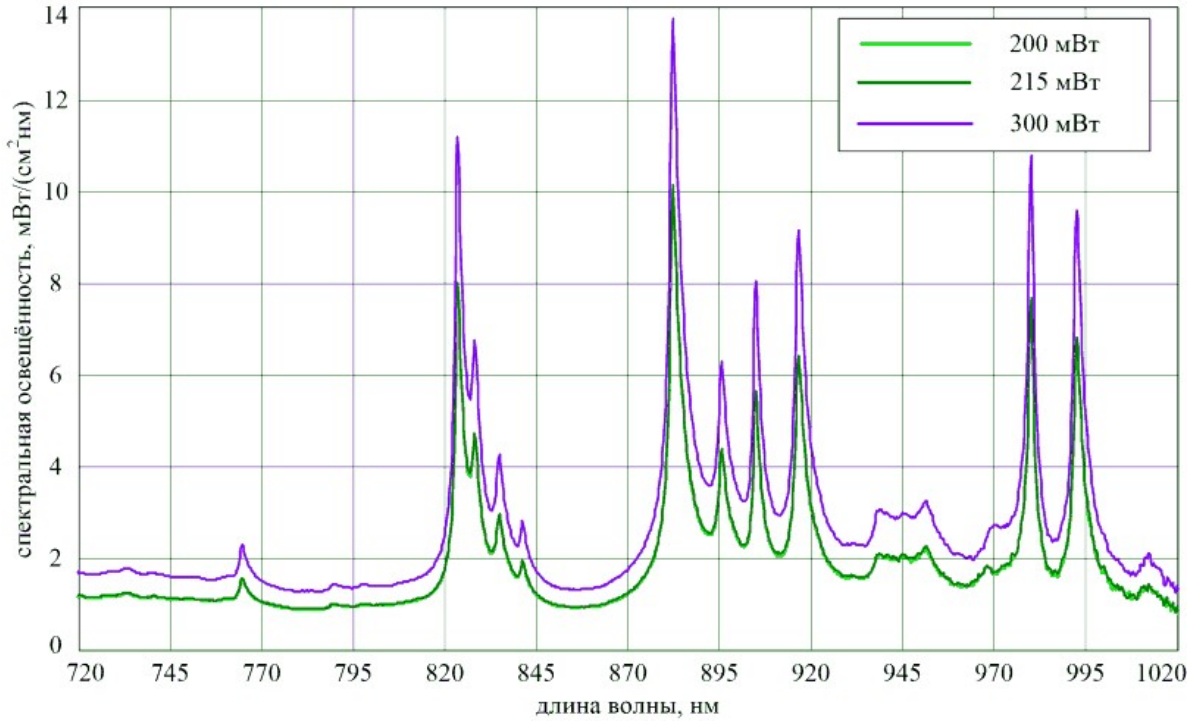


Рис. 13. Спектральная освещенность тестируемого термоэлектрического детектора в диапазоне 720÷1020 нм

В первом режиме работы источника зарегистрирована мощность потока интегрального излучения 200 мВт. Во втором режиме работы после прогрева источника ЛПИ-50 наблюдается повышение мощности потока излучения до 215 мВт и соответствующий рост спектральной освещенности во всем спектральном диапазоне. В диапазоне 230÷300 нм рост интенсивности составляет в среднем выше, чем во всем спектральном диапазоне. Третий режим позволяет на короткое время повысить мощность НОР в ЛПИ-50 до 300 мВт.

5. Измерение характеристик ТД при облучении импульсным широкополосным излучением НОР

Засветка мест пайки ТД приводит к искажению сигнала [15], поэтому в первом эксперименте облучение ТД GeTe с внутренним сопротивлением 1056 Ом проводилось через прямоугольную диафрагму 3 × 1 мм и круглую диафрагму диаметром 3 мм. Мощность излучения, определенная измерителем OPHIR StarLite [13], составила 168 мВт для прямоугольной и 205 мВт для круглой диафрагмы. Сигнал, полученный с ТД, после усиления в ~340 раз регистрировался двухканальным цифровым осциллографом Hantek DSO 5202P [11]. Записанные файлы *".csv"* считывались в массив функцией *READCSV("Имя_файла.csv")*. Исходный массив напряжений ТД переводился в мВ делением на коэффициент усиления и обрабатывался по методике, изложенной выше для сигнала измерителя светового потока. Осциллограммы сигналов ТД представлены на рис. 14.

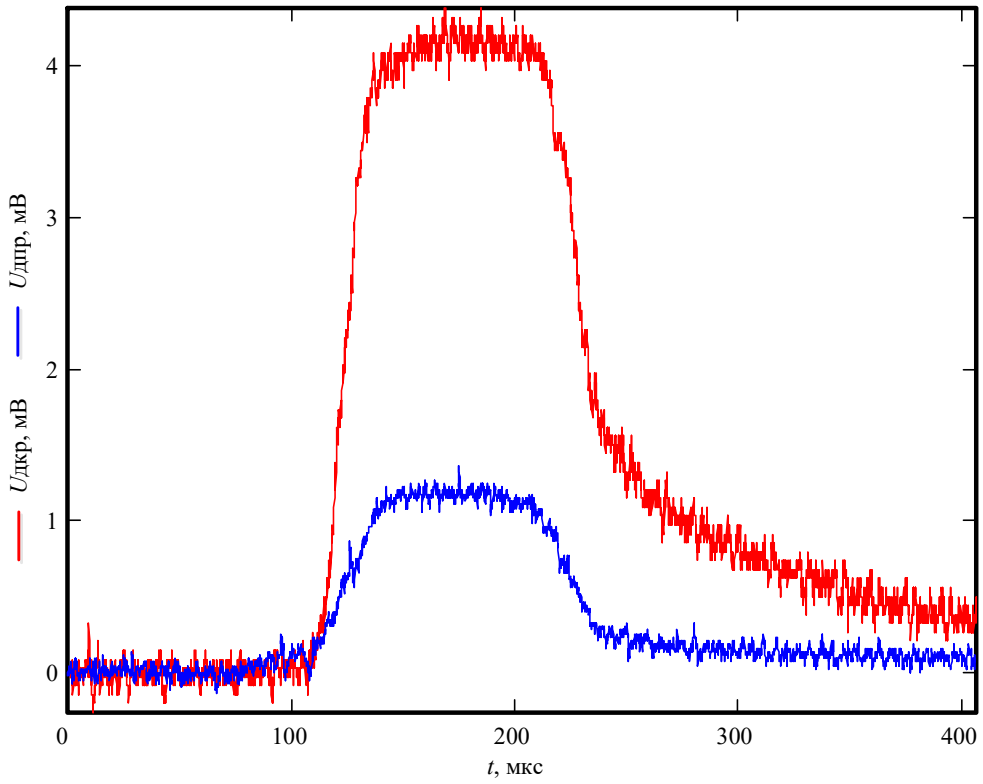


Рис. 14. Осциллограммы сигналов ТД с круглой (красный) и прямоугольной (синий) диафрагмами

В этой и последующих осциллограммах сигналы совмещены во времени по уровню 50 % от их амплитудного значения, что соответствует уровню запуска на осциллографе. На рис. 15 показан сигнал ТД с прямоугольной диафрагмой, совмещенный с импульсом излучения, зарегистрированным измерителем светового потока.

Сигнал ТД с прямоугольной диафрагмой хорошо согласуется с импульсом излучения, но за время измерения не возвращается на нулевой уровень. Вероятно, это связано с прогревом диэлектрической подложки ТД. На рис. 16 показан сигнал ТД с круглой диафрагмой, совмещенный с импульсом излучения, зарегистрированным измерителем светового потока.

Сигнал ТД с круглой диафрагмой увеличился по амплитуде, так как площадь круглой диафрагмы больше, чем прямоугольной. Сигнал ТД имеет задержку по отношению к импульсу излучения и не возвращается к нулевому уровню.

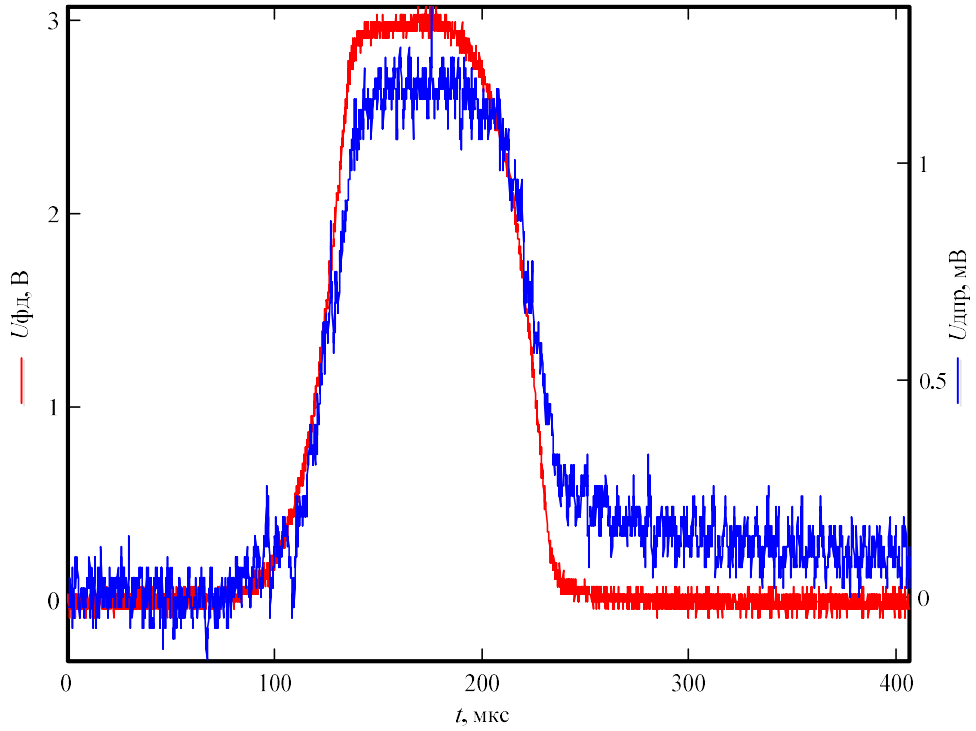


Рис. 15. Осциллограммы сигналов измерителя светового потока (красный) и ТД с прямоугольной диафрагмой (синий)

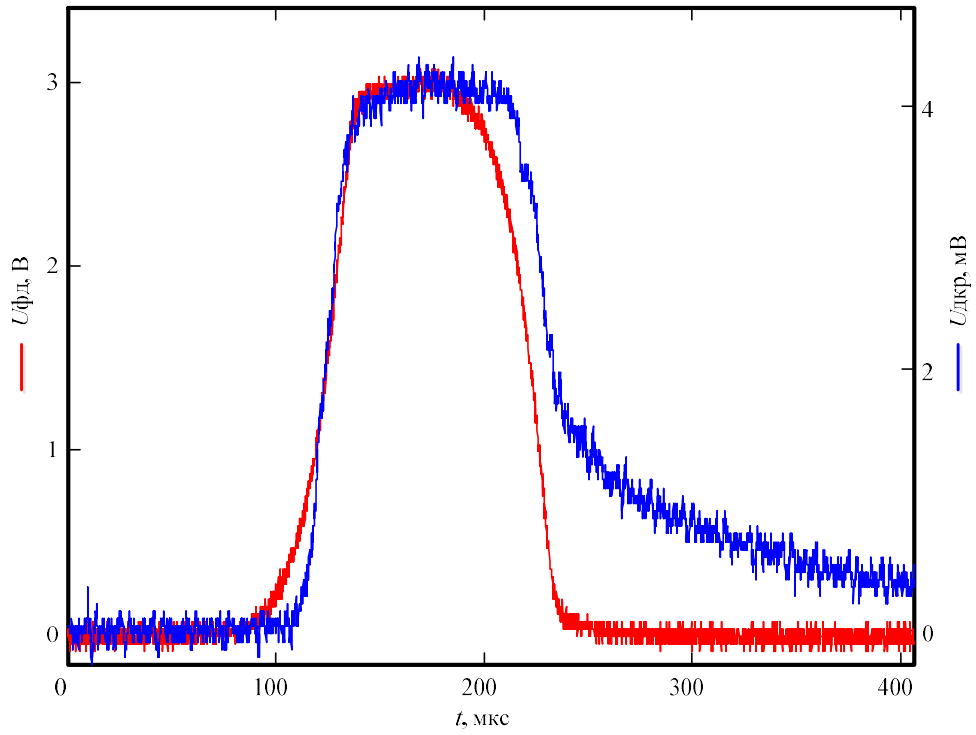


Рис. 16. Осциллограммы импульса излучения (красный) и ТД с круглой диафрагмой (синий)

Во втором эксперименте проведено облучение ТД GeTe с внутренним сопротивлением 1356 Ом без диафрагмы. Использовалась максимальная площадь поверхности ТД, при этом места пайки были экранированы от излучения. Сигнал ТД, усиленный в ~275 раз, регистрировался двухканальным цифровым осциллографом Hantek DSO 5202P. Измерения проводились для мощности излучения 215 и 300 мВт.

На рис. 17 показан сигнал ТД при мощности излучения 215 мВт, совмещенный с импульсом излучения, зарегистрированным измерителем светового потока.

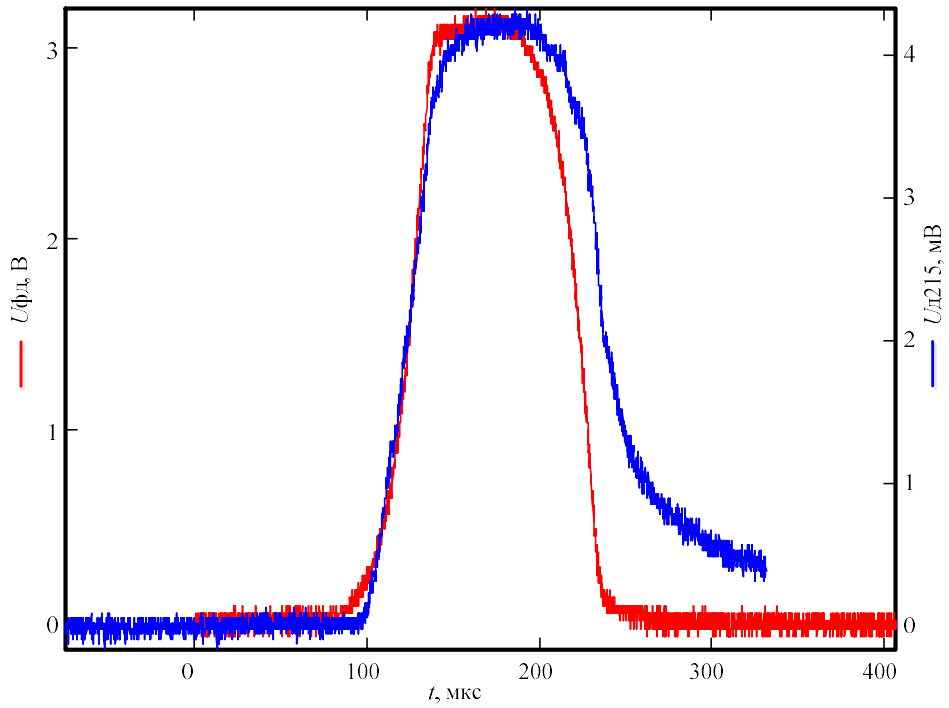


Рис. 17. Осциллограммы импульса излучения (красный) и ТД (синий) при мощности излучения 215 мВт

Сигнал ТД в начале хорошо согласуется с импульсом излучения, но затем начинает отставать и по-прежнему не возвращается на нулевой уровень. Амплитуда сигнала ТД составила 4.2 мВ. На рис. 18 показан сигнал ТД при мощности излучения 300 мВт.

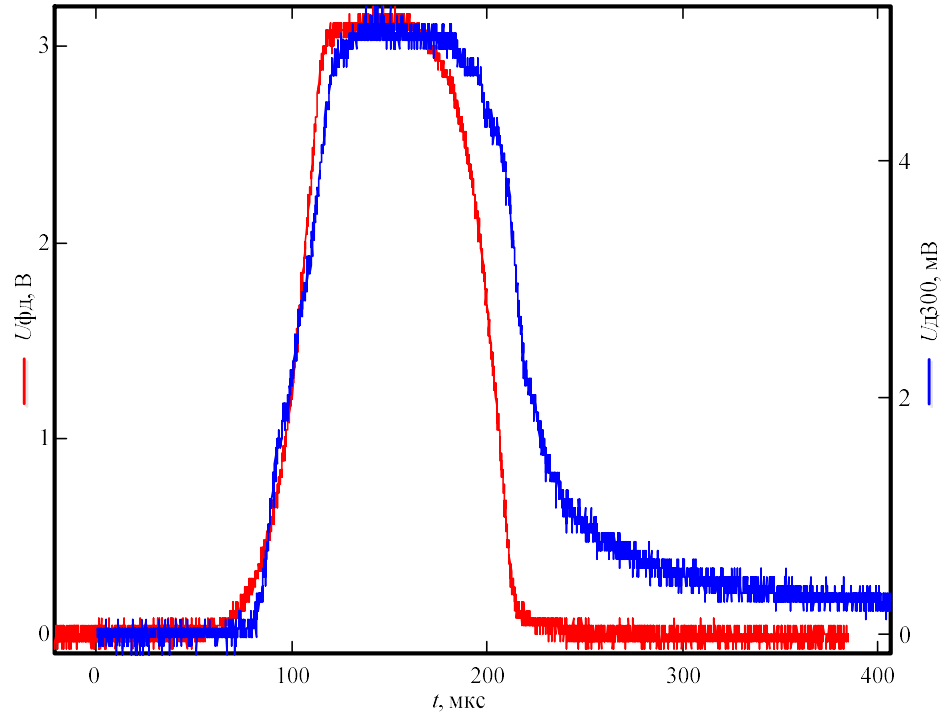


Рис. 18. Осциллограммы импульса излучения (красный) и ТД (синий) при мощности излучения 300 мВт

Сигнал ТД увеличился по амплитуде, отстает от импульса излучения и возвращается на нулевой уровень после рассматриваемого промежутка времени (см. рис. 18, $t > 400$ мкс). Амплитуда сигнала ТД составила 5.1 мВ. При многократном повторении эксперимента соотношение амплитуд сигналов ТД для мощности излучения НОР 300 и 215 мВт составило $1.21 \div 1.27$ раз, что указывает на хорошую повторяемость результатов. Исследование линейности ТД будет задачей дальнейших экспериментов.

Временные параметры импульса излучения и сигналов ТД приведены в табл. 2.

Таблица 2

Временные параметры импульсов широкополосного излучения и сигналов ТД

Сигнал	Ширина импульса излучения, мкс	Длительность импульса 50%, мкс	Время нарастания $10 \div 90$ %, мкс	Время спада $90 \div 10$ %, мкс	Мощность излучения, мВт
Импульс излучения, эксперимент 1	97	97.2	32.6	31.7	
ТД круглая диафрагма	97.5	109	19.5	159.5	205
ТД прямоугольная диафрагма	114.7	101.7	27	135.9	168
Импульс излучения, эксперимент 2	99.3	98.5	32.5	32.2	
ТД, 215 мВт	97	111.8	36.7	102.2	215
ТД, 300 мВт	99.1	114	33.1	109.1	300

6. Заключение

На собранном стенде проведено исследование характеристик ТД с чувствительным элементом на основе пленки GeTe при его облучении импульсным широкополосным излучением НОР. С помощью разработанного модулятора непрерывное излучение НОР преобразовано в импульсное с требуемой шириной импульса. Измерены мощность излучения и его спектральные характеристики. Выбран метод регистрации импульсов излучения измерителем светового потока. Проведенные эксперименты и анализ полученных результатов позволили определить временные характеристики ТД и его реакцию на широкополосное излучение при использовании диафрагм, различных по форме и площади. При многократном повторении эксперимента наблюдалось стабильное линейное увеличение сигнала ТД при пропорциональном увеличении мощности облучения. Установлено, что исследуемый термоэлектрический детектор GeTe имеет высокое быстродействие и может использоваться в исследовании оптических разрядов и параметров излучения, исходящего от других источников.

Благодарности и ссылки на гранты

Работа поддержана грантом РНФ 25-29-01174.

Литература

1. Котов М. А., Соловьев Н. Г., Шемякин А. Н., Якимов М. Ю., Глебов В. Н., Дуброва Г. А, Малютин А. М., Попов П. А., Поняев С. А., Монахов Н. А., Лапушкина Т. А., Сахаров В. А., Козлов П. В., Левашов В. Ю., Герасимов Г. Я. О принципах возникновения термоэдс при регистрации термоэлектрическим детектором тепловых потоков в импульсном газодинамическом эксперименте // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2024. Т.25, вып. 3. http://chemphys.ipmnet.ru/issues/2024-25-3/articles/1114/

2. Шемякин А. Н., Рачков М. Ю., Якимов М. Ю. Измерение мощности лазерного излучения технологического комплекса с несамостоятельным тлеющим разрядом // Машиностроение и инженерное образование. 2009. № 2 (19). С. 22–29.
3. Von Gutfeld R. J. Laser-induced anisotropic thermoelectric voltages in thin films // Applied Physics Letters. 1973. Vol. 23. № 4. Pp. 206–208.
4. Kotov M. A., Kozlov P. V., Gerasimov G. Y., Levashov V. Y., Tereshkin V. S., Solovyov N. G., Shemyakin A. N., Yakimov M. Yu., Glebov V. N., Dubrova G. A., Malyutin A. M. Influence of ionization processes on thermoelectric detector readings at measuring heat fluxes in shock tubes // Acta Astronautica. 2026. Vol. 239. Pp. 939–946.
5. Генералов Н. А., Зимаков В. П., Козлов Г. И., Масюков В. А., Райзер Ю. П. Непрерывно горящий оптический разряд // Письма в ЖЭТФ. 1970. Т. 11, вып. 9. С. 302–304.
6. Androsenko V. N., Kotov M. A., Solovyov N. G., Shemyakin A. N., Yakimov M. Yu. Properties of a continuous optical discharge sustained by short-wave infrared laser radiation in high pressure argon // J. Phys. D: Appl. Phys. 2024. Vol. 57. P. 475203.
7. Зимаков В. П., Кузнецов В. А., Лаврентьев С. Ю., Соловьев Н. Г., Шемякин А. Н., Шилов А. О., Якимов М. Ю. Новые возможности применения оптических разрядов в аэрофизическом эксперименте // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2016. Т. 17, вып. 2. http://chemphys.edu.ru/issues/2016-17-2/articles/653/
8. Малоемкостный быстродействующий фотодиод SFH203P. https://www.chipdip.ru/product/sfh-203p-fotodiod-5mm-tht-400-1100nm-150-150mvt-osram-8029282148?ysclid=msixvfehco437477578.
9. Операционный усилитель LM7171. https://static.chipdip.ru/lib/555/DOC012555592.pdf.
10. Нестеренко Б. К. Интегральные операционные усилители: Справочное пособие по применению. Энергоиздат, 1982. 128 с.
11. Серия DSO5000. Цифровой запоминающий осциллограф. Руководство пользователя. https://www.hantek.ru/products/mans/DSO5000B_manual_rus.pdf
12. Дьяконов В.П. Mathcad 11/12/13 в математике. Справочник. М.: Горячая линия. Телеком, 2007. 958 с.
13. Портативный измеритель мощности/энергии лазерного излучения StarLite https://lenlasers.ru/product/portativnyy-izmeritel-moshchnosti-energii-lazernogo-izlucheniya-starlite/?ysclid=micde6eef7172209067
14. Датчик для измерения тепловой мощности 50(150)A-BB-26. https://www.ophiropt.com/ru/p/7Z07123
15. Филиппов Ф. В., Котов М. А., Соловьев Н. Г., Глебов В. Н., Дуброва Г. А., Малютин А. М. Особенности калибровки термоэлектрического детектора с использованием импульсного лазерного воздействия // Письма в Журнал технической физики. 2024. Т. 50. №. 23. С. 50–53.

References

1. Kotov M. A., Solovyov N. G., Shemyakin A. N., Yakimov M. Yu., Glebov V. N., Dubrova G. A., Malyutin A. M., Popov P. A., Poniaev S. A., Monakhov N. A., Lapushkina T. A., Sakharov V. A., Kozlov P. V., Levashov V. Y., Gerasimov G. Y., On the Principles of Thermo Emf Arise during Heat Flux Registration by a Thermoelectric Detector in a Pulse Gas Dynamic Experiment, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2024, vol. 25, issue 3 [in Russian]. http://chemphys.ipmnet.ru/issues/2024-25-3/articles/1114/
2. Shemyakin A. N., Rachkov M. Yu., Yakimov M. Yu., Measurement of laser radiation power of a technological complex with a non-self-sustained glow discharge, *Mechanical engineering and engineering education*, 2009, vol. 2 (19), pp. 22–29 [in Russian].
3. Von Gutfeld R.J., Laser-induced anisotropic thermoelectric voltages in thin films, *Applied Physics Letters*, 1973, vol. 23, issue 4, pp. 206–208. https://doi.org/10.1063/1.1654860

4. Kotov M. A., Kozlov P. V., Gerasimov G. Y., Levashov V. Y., Tereshkin V. S., Solovyov N. G., Shemyakin A. N., Yakimov M. Yu., Glebov V. N., Dubrova G. A., Malyutin A. M., Influence of ionization processes on thermoelectric detector readings at measuring heat fluxes in shock tubes, *Acta Astronautica*, 2026, vol. 239, pp. 939–946. DOI:10.1016/j.actaastro.2025.11.051
5. Generalov N. A, Zimakov V. P, Kozlov G. I, Masuykov V. A and Raizer Y. P., Continuous optical discharge, *Sov. Phys. J. Lett*., 1970, vol. 11, pp. 302–304.
6. Androsenko V. N., Kotov M. A., Solovyov N. G., Shemyakin A. N., Yakimov M. Yu., Properties of a continuous optical discharge sustained by short-wave infrared laser radiation in high pressure argon, *J. Phys. D: Appl. Phys*., 2024, vol. 57, issue 47, p. 475203. DOI:10.1088/1361-6463/ad6f23
7. Zimakov V. P., Kuznetsov V. A., Lavrentyev S. Yu., Solovyov N. G., Shemyakin A. N., Shilov A. O., Yakimov M. Yu., New Possibilities for Applying Optical Discharges to Aerophysical Experiments, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2016, vol. 17, issue 2 [in Russian]. http://chemphys.edu.ru/issues/2016-17-2/articles/653/
8. High-speed photodiode with low capacitance SFH203P. https://www.chipdip.ru/product/sfh-203p-fotodiod-5mm-tht-400-1100nm-150-150mvt-osram-8029282148?ysclid=msixvfehco437477578
9. Operational amplifier LM7171. https://static.chipdip.ru/lib/555/DOC012555592.pdf
10. Nesterenko B. K., *Integrated operational amplifiers: Application Reference Guide*, Energoizdat, 1982, 128 p. [in Russian].
11. DSO5000 Series. Digital Storage Oscilloscope. User Manual. https://www.hantek.ru/products/mans/DSO5000B_manual_rus.pdf
12. Dyakonov V. P., *Mathcad 11/12/13 in Mathematics. Handbook*, Moscow: Goryachaya Liniya. Telekom, 2007. 958 p.
13. Portable Laser Power/Energy Meter StarLite. https://lenlasers.ru/product/portativnyy-izmeritel-moshchnosti-energii-lazernogo-izlucheniya-starlite/?ysclid=micde6eef7172209067
14. Thermal power sensor 50(150)A-BB-26. https://www.ophiropt.com/ru/p/7Z07123
15. Filippov F. V, Kotov M. A., Solovyov N. G., Glebov V. N., Dubrova G. A., Malyutin A. M., Features of calibrating a thermoelectric detector using pulsed laser exposure, *Technical physics letters*, 2024, vol. 50, issue 23, pp. 50–53.

Статья поступила в редакцию 2 сентября 2026 г.