

Irradiation of a CrAl Thermoelectric Detector by a Laser Diode

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

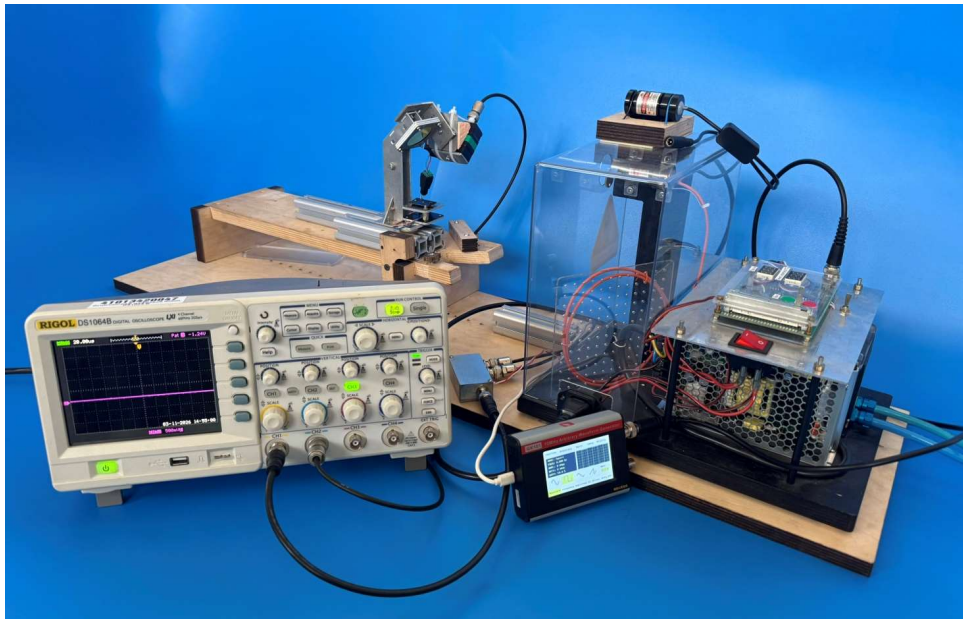
Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, 119526, Russia

filippov@ipmnet.ru

Abstract

This article is dedicated to studying the characteristics of a thermoelectric detector with thermopower anisotropy in CrAl-based films. The DLM-30 laser module was used to deliver radiation with power up to 30 W to the detector. A linear dependence of the thermoelectric detector signal on the radiation power was obtained, and the rise and fall times of the detector signal were determined as functions of the laser radiation power.

Keywords: heat flow, radiation, heat transfer, thermoelectric detector, thermo-EMF.



Experimental stand for irradiating a thermoelectric detector with a laser module

УДК 533.9:533.6.071.8:536.2

Облучение термоэлектрического детектора CrAl лазерным диодом

Ф. В. Филиппов*, М. А. Котов, Н. Г. Соловьев, А. Н. Шемякин

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук
(ИПМех 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 CrAl. Лазерным модулем ДЛМ-30 на детектор подавалось излучение мощностью до 30 Вт. Получена линейная зависимость сигнала термоэлектрического детектора от мощности. Определены времена нарастания и спада сигнала детектора в зависимости от мощности лазерного излучения.

Ключевые слова: тепловой поток, излучение, теплообмен, термоэлектрический детектор, термоЭДС

1. Введение

Термоэлектрические детекторы широко используются в газодинамических экспериментах для регистрации изменения тепловых потоков в течение ультракоротких (до нескольких микросекунд) временных интервалов. Они хорошо зарекомендовали себя при регистрации импульсных газодинамических течений. В работе [1] проводилось измерение теплового потока за отраженной ударной волной малой интенсивности в азоте. Анализ работы различных тепловых детекторов в условиях газодинамического ударно-волнового воздействия показал высокую степень достоверности показаний термоэлектрического детектора [2]. В работе [3] были зарегистрированы большие значения тепловых потоков (до 50 МВт/м²) в ксеноне, нагретом ударной волной, при числах Маха до $M = 8$. В экспериментах по воспламенению горючих смесей в ударной трубе [4, 5] получена зависимость изменения тепловых потоков за отраженной ударной волной при высоких значениях давления газа (более 30 атм). Благодаря высокому быстродействию детекторов, удалось определить времена задержки самовоспламенения пропан-воздушных смесей, что свидетельствует о перспективности использования детекторов в этой области экспериментальных исследований.

В материале, обладающем анизотропией термоЭДС, разность температур создает поперечное термоэлектрическое поле, перпендикулярное градиенту температуры. В тонкой кристаллической пленке детектора вдоль подложки возникают термоэлектрические сигналы под воздействием приходящего на него теплового потока. Активный слой термоэлектрического детектора формируется по специальной технологии вакуумного напыления, позволяющей создавать столбчатые наклонные монокристаллические структуры с размерами в несколько нм. Изготовление термоэлектрического детектора происходит в вакуумной камере посредством косоугольного напыления пленок на основе хрома, алюминия и других материалов на теплопроводящую диэлектрическую подложку. В результате, возникает множество кристаллических проводниковых структур угловой направленности с контактным сопротивлением между ними [6]. Вследствие теплового движения свободные заряженные частицы, находящиеся в этих структурах, создают термоЭДС между верхней и нижней границами пленки [7, 8].

Данная работа посвящена исследованию характеристик термоэлектрического детектора с чувствительным элементом на основе кристаллитов CrAl, при его облучении лазерным диодом, для определения диапазона линейности и быстродействия. Это необходимо для проведения измерений тепловых потоков в газодинамических течениях с высокими градиентами температур, таких, как интенсивные ударно-волновые взаимодействия в наземных и летных условиях [9].

2. Схема эксперимента

Для исследования характеристик при большой мощности светового излучения был разработан стенд на основе лазерного модуля ДЛМ-30 [10], задающий излучение мощностью до 30 Вт в ближней инфракрасной области 970 нм. Экспериментальный стенд (рис. 1) состоит из лазерного источника ДЛМ-30, генератора импульсов JDS-2900 [11], оптической системы формирования светового потока, усилителя сигнала термоэлектрического детектора и двухканального осциллографа с 8-разрядным разрешением Hantek DSO5062B [12].

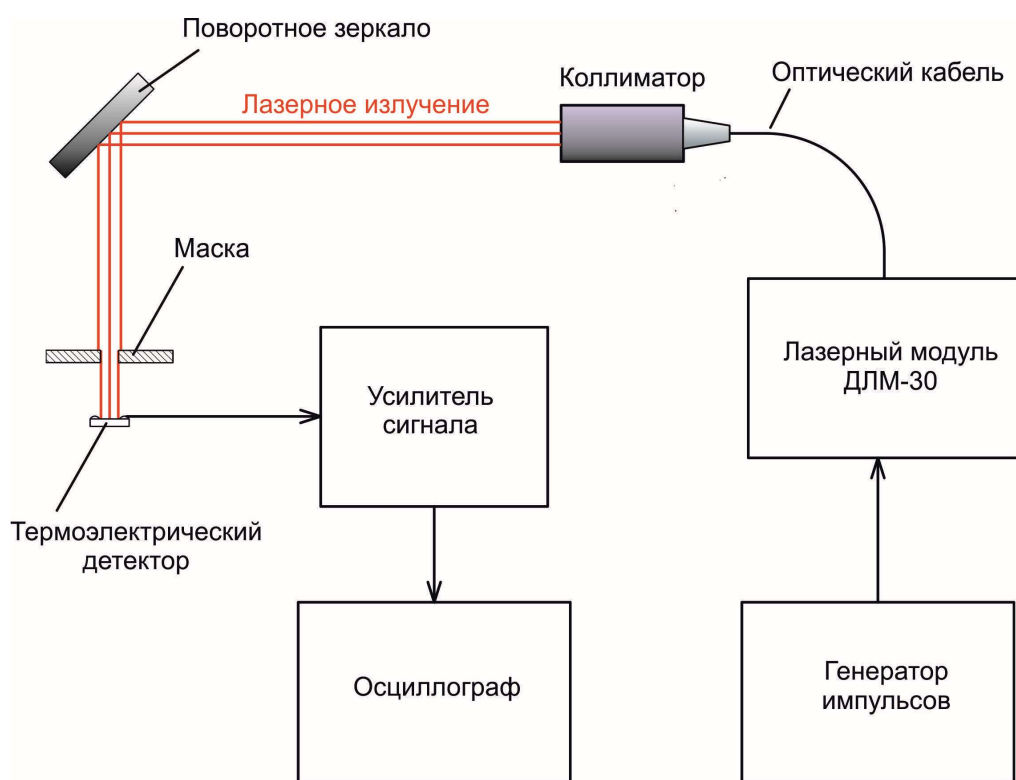


Рис. 1. Схема экспериментального стенда для облучения термоэлектрического детектора лазерным модулем ДЛМ-30

Излучение от лазерного модуля ДЛМ-30 через коллиматор подается в виде параллельного пучка диаметром около 4 мм на поворотное зеркало, отражающее лазерный луч на термоэлектрический детектор через маску из анодированного алюминия диаметром 3 мм (рис. 2, 3). Маска расположена на расстоянии приблизительно 2 мм от поверхности термоэлектрического детектора и изолирована от него диэлектриком. Для юстировки оптической системы использовалась камера цифрового микроскопа HIGH CLOUD 1200 × 12МП [13], позволяющая видеть инфракрасное излучение лазерного модуля ДЛМ-30.

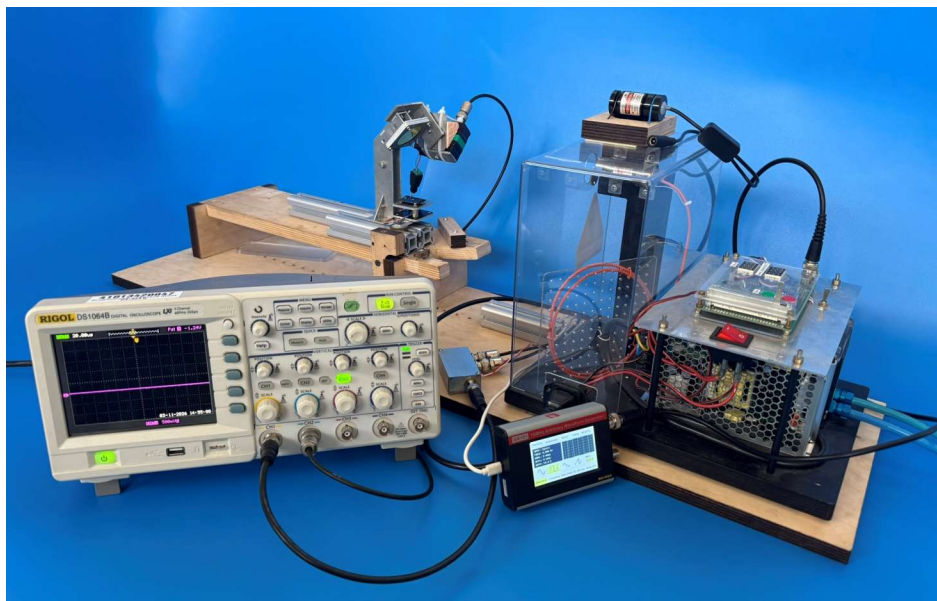


Рис. 2. Экспериментальный стенд для облучения термоэлектрического детектора лазерным модулем ДЛМ-30



Рис. 3. Поворотное зеркало, маска и термоэлектрический детектор в оптической системе экспериментального стенда (см. рис. 2)

На рис. 4 показано отверстие маски термоэлектрического детектора и пучок инфракрасного излучения вокруг него, видимый на экране микроскопа HIGH CLOUD 1200 × 12МП как кольцо голубого цвета.

Сигнал с термоэлектрического детектора после усиления регистрируется цифровым осциллографом. С целью минимизации теплового воздействия лазерного излучения на термоэлектрический детектор на генераторе JDS-2900 задавался единичный импульс излучения лазерного модуля ДЛМ-30. Длительность импульса составила 1 мс. Предварительно мощность излучения в импульсе измерялась прибором Ophir StarLite [14] в частотном режиме излучения 10 Гц при тех же параметрах лазерного импульса.

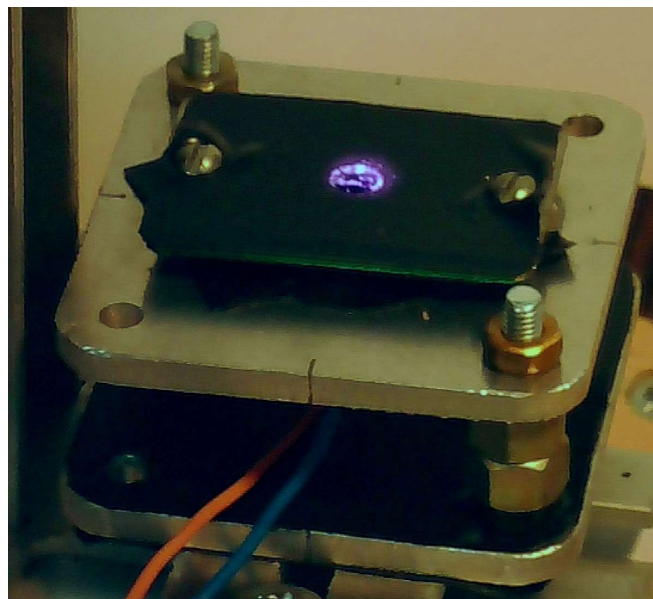


Рис. 4. Юстировка оптической системы экспериментального стенда с помощью камеры цифрового микроскопа HIGH CLOUD 1200 × 12МП

3. Обработка результатов эксперимента

Проведено облучение термоэлектрического детектора CrAl с внутренним сопротивлением 26 Ом. Сигнал, полученный с термоэлектрического детектора, после усиления в 765 раз регистрировался двухканальным цифровым осциллографом Hantek DSO 5202P [12]. Осциллограмма сигнала термоэлектрического детектора при импульсной мощности излучения 8.1 Вт представлен на рис. 5.

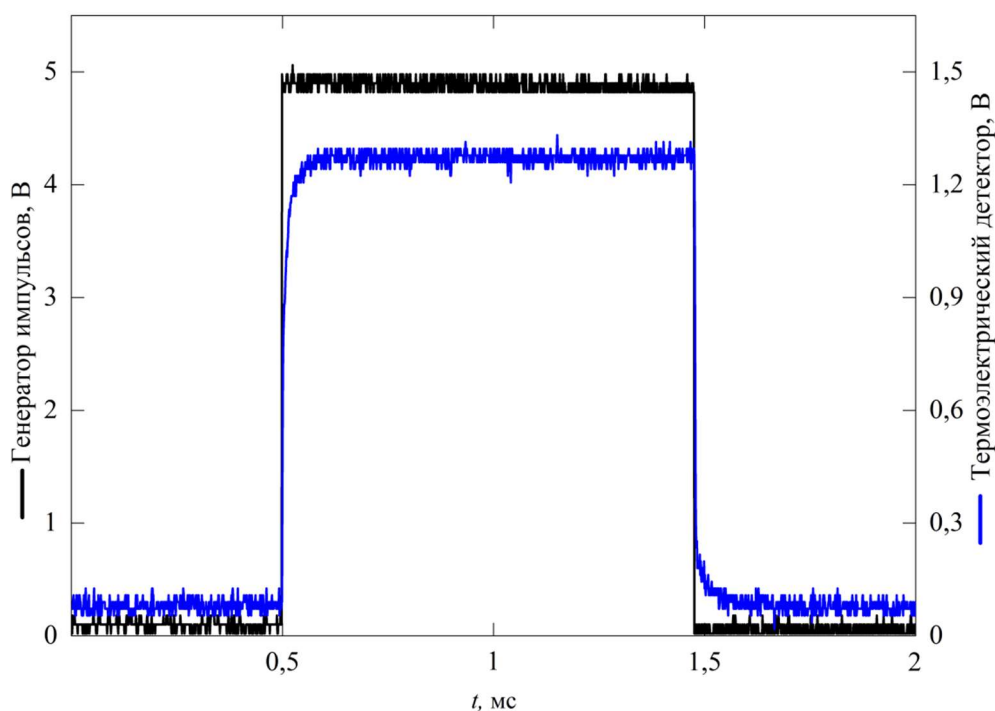


Рис. 5. Осциллограмма сигнала термоэлектрического детектора CrAl при облучении лазерным модулем ДЛМ-30 (импульсная мощность излучения 8.1 Вт)

В эксперименте проведено 7 измерений. На рис. 6 показана серия сигналов термоэлектрического детектора CrAl по мере увеличения мощности излучения ДЛМ-30.

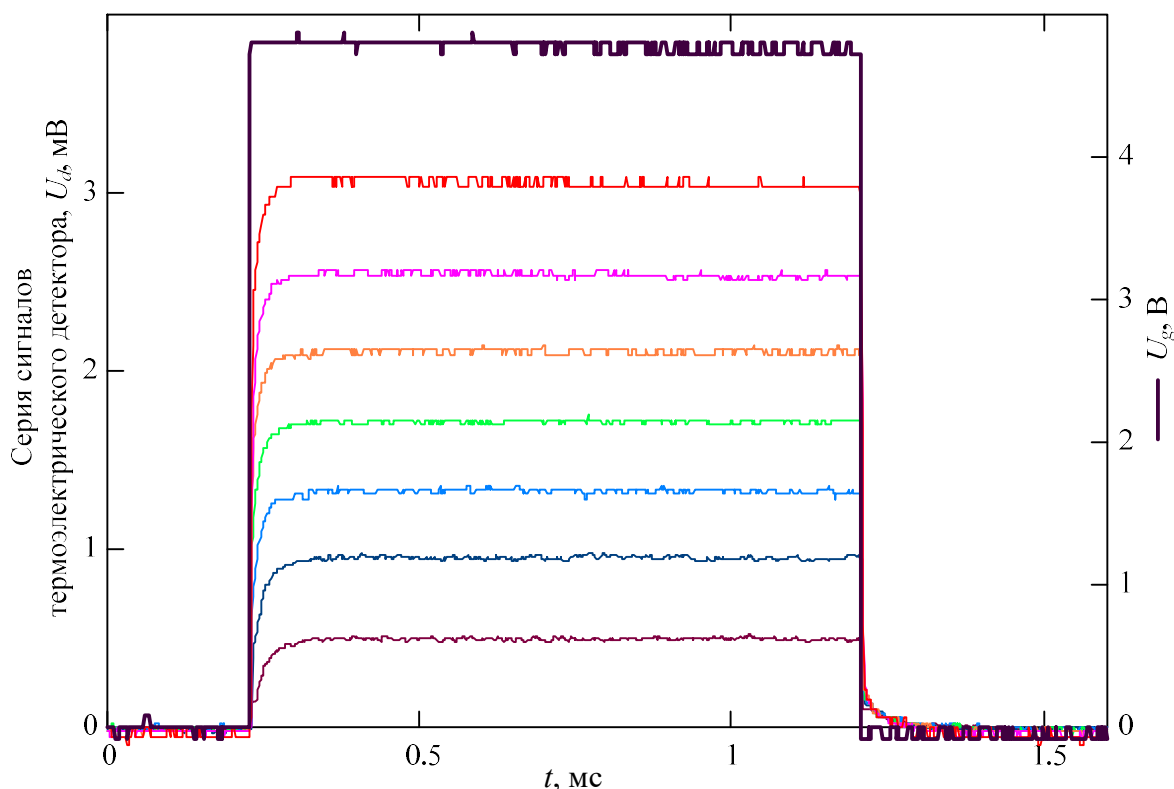


Рис. 6. Серия сигналов термоэлектрического детектора CrAl U_d по мере увеличения мощности излучения ДЛМ-30 и сигнал генератора U_g , задающий единичный импульс излучения лазерного модуля ДЛМ-30

Сигнал генератора U_g задает единичный импульс излучения лазерного модуля ДЛМ-30 длительностью 1 мс.

Импульсная мощность излучения регистрировалась измерителем мощности Ophir Star-Lite [14]. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Импульсная мощность лазерного модуля ДЛМ-30

Номер измерения	1	2	3	4	5	6	7
Импульсная мощность излучения W , Вт	2.59	4.39	6.19	8.10	10.01	11.98	14.12

Результаты эксперимента обрабатывались программой, написанной в пакете компьютерной математики Mathcad 15 [15].

Сигналы генератора импульсов и термоэлектрического детектора были по столбцам сформированы в файл ".prn". Этот файл считывался в массив функцией READPRN ("Имя_файла.prn"). Исходный массив напряжений генератора в мВ переводился в вольты путем деления на 1000, а массив напряжений термоэлектрического детектора в мВ – делением на коэффициент усиления усилителя, который равен 765. Массив разделялся по измерениям функцией submatrix и сглаживался по 9 точкам функцией medsmooth.

Функцией max определялось максимальное значение сигнала термоэлектрического детектора md . Находились точки начала, горизонтальной полки и окончания сигнала, и диапазоны точек, по которым функцией mean вычислялось среднее значение сигнала термоэлектрического детектора mnd и его смещение smd . Аналогичные вычисления проводились для всех 7 измерений. Результаты вычислений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета среднего значения mnd и смещения smd сигналов термоэлектрического детектора CrAl по мере увеличения мощности

Среднее значение сигнала термоэлектрического детектора mnd , мВ	0.50	0.95	1.33	1.72	2.11	2.54	3.05
Смещение сигнала термоэлектрического детектора smd , мВ	-0.009	-0.015	-0.006	-0.017	-0.022	-0.028	-0.041

На рис. 7 показана зависимость среднего значения сигнала термоэлектрического детектора mnd с учетом его смещения smd $U_d = mnd - smd$ от импульсной мощности излучения W и линейная регрессия U_d на W вида $U_{dl} = W \cdot b + a$. Коэффициент a вычислялся функцией *intercept*, а коэффициента b – функцией *slope*. В результате $U_{dl} = W \cdot 0.219 - 0.039$. Функцией *corr* определялось значение коэффициента корреляции U_d и U_{dl} , $r^2 = 0.9991$.

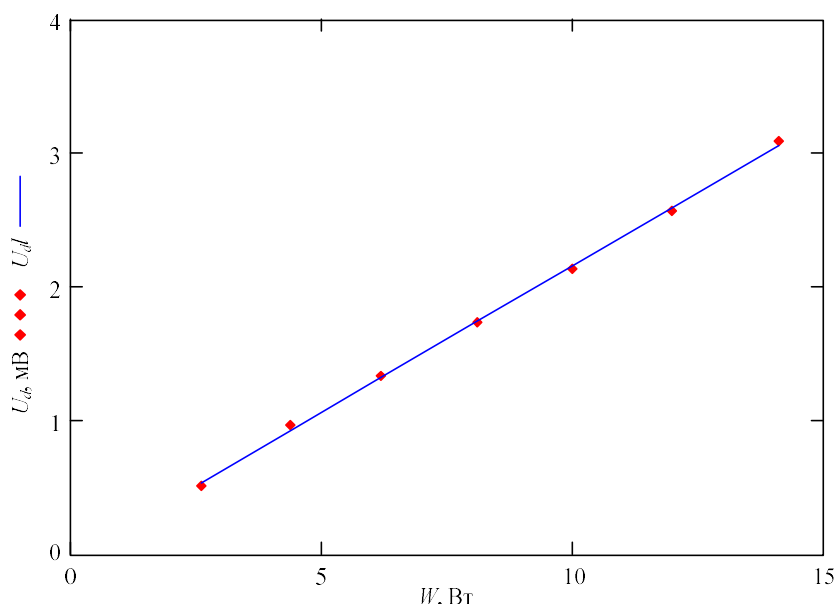


Рис. 7. Зависимость среднего значения сигнала термоэлектрического детектора с учетом его смещения U_d от импульсной мощности излучения W и линейная регрессия U_d на W

Зависимость сигнала термоэлектрического детектора CrAl от поступающей на него мощности излучения имеет практически идеальный линейный характер с коэффициентом корреляции $r^2 = 0.9991$.

Для определения временных характеристик термоэлектрического детектора CrAl рассмотрим его сигнал при импульсной мощности излучения $W = 4.39$ Вт (рис. 8).

Горизонтальные прямые на графике соответствуют уровням 10–50–90 % от среднего значения сигнала U_d . Вертикальная прямая показывает время достижения сигналом U_d уровня 90 % от среднего значения полки. Программой, написанной в пакете компьютерной математики Mathcad 15, определялось время начала сигнала и время достижения им горизонтальной полки. В этом диапазоне рассчитывалось время нарастания сигнала от уровня 10 % до уровня 90 %. Затем находилось время окончания горизонтальной полки и вычислялось время спада сигнала от уровня 90 % до уровня 10 %. Длительность сигнала рассчитывалась по уровню 50 % от среднего значения сигнала U_d . Результаты расчета для всех измерений приведены в табл. 3.

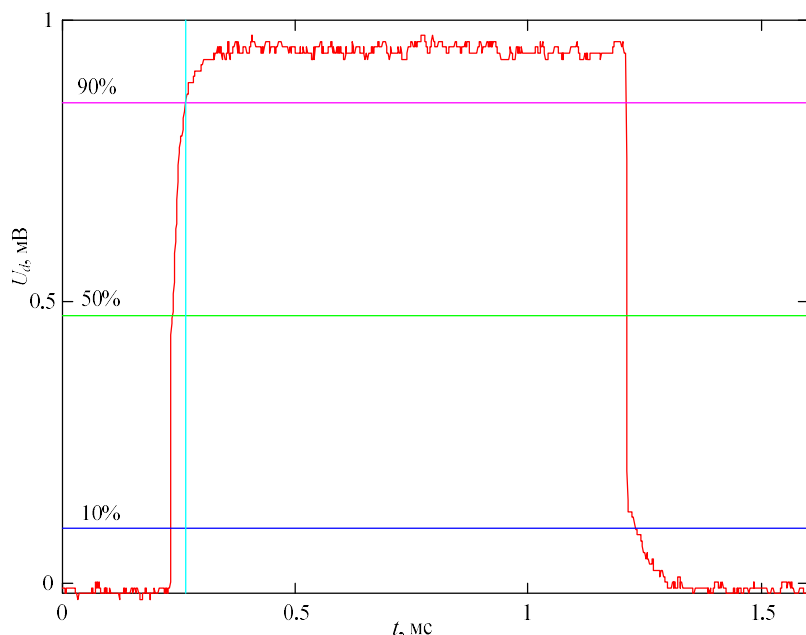


Рис. 8. Сигнал термоэлектрического детектора CrAl U_d при импульсной мощности излучения $W = 4.39$ Вт

Таблица 3

Результаты расчета времени нарастания t_r (мкс), спада t_f (мкс) сигнала термоэлектрического детектора CrAl и длительности импульса излучения t_{50} (мкс) в зависимости от импульсной мощности излучения W (Вт)

Время нарастания сигнала термоэлектрического детектора t_r , мкс	51	32	25	21	17	15	14
Время спада сигнала термоэлектрического детектора t_f , мкс	41	19	8	6	4	4	3
Длительности импульса излучения t_{50} , мкс	965	974	977	977	977	977	988
Импульсная мощность излучения W (Вт)	2.59	4.39	6.19	8.10	10.01	11.98	14.12

Зависимость времени нарастания и спада сигнала термоэлектрического детектора CrAl от импульсной мощности излучения приведена на рис. 9.

По мере нарастания импульсной мощности излучения W времена нарастания t_r и спада t_f существенно уменьшаются.

4. Выводы

На собранном калибровочном стенде проведено исследование термоэлектрического детектора с чувствительным элементом на основе кристаллитов CrAl. Задание теплового потока осуществлялось излучением лазерного диода. Проведенные эксперименты и анализ полученных результатов позволили определить временные характеристики детектора и диапазон линейности его вольт-ваттных характеристик. Установлено, что исследуемый термоэлектрический детектор CrAl имеет линейную характеристику, высокое быстродействие и может использоваться для регистрации быстрых процессов теплопередачи в импульсных газодинамических течениях ударных труб.

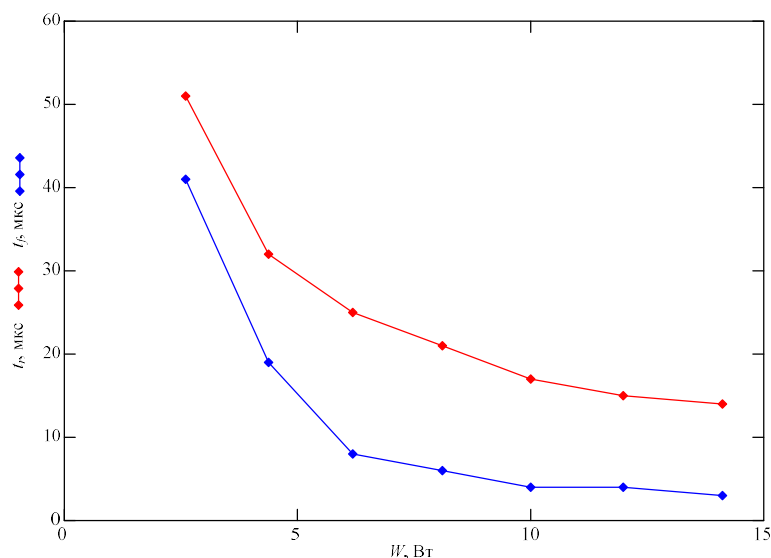


Рис. 9. Зависимость времени нарастания t_r и спада t_f сигнала термоэлектрического детектора CrAl от импульсной мощности излучения W

Благодарности

Работа поддержана грантом РФФ 25-29-01174.

Литература

1. Kotov Mikhail A., Shemyakin Andrey N., Solovyov Nikolay G., Yakimov Mikhail Yu, Glebov Vladislav N., Dubrova Galina A., Malyutin Andrey M., Popov Pavel A., Poniaev Sergey A., Lapushkina Tatiana A., Monakhov Nikolay A., Sakharov Valerii A. Performance assessment of thermoelectric detector for heat flux measurement behind a reflected shock of low intensity // *Applied Thermal Engineering*. 2021. Vol.195. P. 117143.
2. Sapozhnikov S. Z., Mityakov V. Yu., Mityakov A. V. *Heatmetry: the science and practice of heat flux measurement*. Springer Nature. 2020. 209 p.
3. Kotov M. A., Shemyakin A. N., Solovyov N. G., Yakimov M. Yu, Glebov V. N., Dubrova G. A., Malyutin A. M., Popov P. A., Poniaev S. A., Lapushkina T. A., Monakhov N. A., Sakharov V. A. The analysis of applicability of thermoelectric radiation detectors for heat flux measurements behind a reflected shock wave // *Journal of Physics: Conference Series* 2021. Vol. 2103. No. 1. P. 012218.
4. Котов М. А., Козлов П. В., Герасимов Г. Я., Левашов В. Ю., Шемякин А. Н., Соловьев Н. Г., Якимов М. Ю., Глебов В. Н., Дуброва Г. А., Малушин А. М. Регистрация воспламенения горючей смеси в ударной трубе с помощью термоэлектрического детектора // *Химическая физика*. 2022. Том 41, № 8. С. 31–37.
5. Kotov M. A., Kozlov P. V., Gerasimov G. Ya, Levashov V. Yu, Shemyakin A. N., Solovyov N. G., Yakimov M. Yu, Glebov V. N., Dubrova G. A., Malyutin A. M. Thermoelectric detector application for measuring the ignition delay time in a shock heated combustible mixture // *Acta Astronautica*. 2023. Vol. 204. Pp.787–793.
6. Von Gutfeld R.J. Laser-induced anisotropic thermoelectric voltages in thin films // *Applied Physics Letters*. 1973. Vol. 23. № 4. Pp. 206–208.
7. Котов М. А., Соловьев Н. Г., Шемякин А. Н., Якимов М. Ю., Глебов В. Н., Дуброва Г. А., Малушин 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. Том 25, вып. 3. <http://chemphys.ipmnet.ru/issues/2024-25-3/articles/1114/>

8. Улановский А. А. Использование термоэлектрического эффекта Зеебека для измерения температуры. 2009. 6 С/ <https://otc-obninsk.ru/publishing/01.pdf> (доступно на 21.06.2024).
9. Суржиков С. Т., Яцухно Д. С. Анализ летных данных по конвективному и радиационному нагреву поверхности спускаемого марсианского космического аппарата Schiaparelli // МЖГ. 2022. № 6. С. 74–85.
10. Лазерный модуль ДЛМ-30. http://www.ntoire-polus.ru/products_low_dlm.html (доступно на 25.07.2017)
11. Серия JDS2900. Двухканальный DDS генератор сигналов произвольной и стандартной формы. https://supereyes.ru/img/instructions/JDS2900_signal_generator.pdf?srsId=AfmBOoovoIVMu0QEGFEхbgEHArpZ5owIvdHzgE6ObrTyuBwD9euR-jy2
12. Серия DSO5000. Цифровой запоминающий осциллограф. Руководство пользователя. https://www.hantek.ru/products/mans/DSO5000B_manual_rus.pdf
13. Цифровой микроскоп. DM9 1200 × 16МП. https://aliexpress.ru/item/1005007459507025.html?ysclid=mmn9qh5hvr722479281&sku_id=12000040842987337
14. Портативный измеритель мощности/энергии лазерного излучения StarLite. <https://lenlasers.ru/product/portativnyu-izmeritel-moshchnosti-energii-lazernogo-izlucheniya-starlite/?ysclid=micde6eef7172209067>
15. Дьяконов В.П. Mathcad 11/12/13 в математике. Справочник. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 958 с.

References

1. Kotov M. A., Shemyakin A. N., Solovyov N. G., Yakimov M. Yu, Glebov V. N., Dubrova G. A., Malyutin A. M., Popov P. A., Poniaev S. A., Lapushkina T. A., Monakhov N. A., Sakharov V. A., Performance assessment of thermoelectric detector for heat flux measurement behind a reflected shock of low intensity, *Applied Thermal Engineering*, 2021, vol.195, p. 117143.
2. Sapozhnikov S. Z., Mityakov V. Yu., Mityakov A.V., *Heatmetry: the science and practice of heat flux measurement*, Springer Nature, 2020, 209 p.
3. Kotov M. A., Shemyakin A. N., Solovyov N. G., Yakimov M. Yu, Glebov V. N., Dubrova G. A., Malyutin A. M., Popov P. A., Poniaev S. A., Lapushkina T. A., Monakhov N. A., Sakharov V. A., The analysis of applicability of thermoelectric radiation detectors for heat flux measurements behind a reflected shock wave, *Journal of Physics: Conference Series* 2021, vol. 2103, no. 1, p. 012218.
4. Kotov M. A., Kozlov P.V., Gerasimov G.Ya, Levashov V.Yu, Shemyakin A.N., Solovyov N.G., Yakimov M.Yu, Glebov V.N., Dubrova G.A., Malyutin A.M., Registration of ignition of a combustible mixture in a shock tube using a thermoelectric detector, *The Journal of Chemical Physics*, 2022, vol. 41, no. 8, pp. 31–37 [in Russian].
5. Kotov M. A., Kozlov P. V., Gerasimov G. Ya, Levashov V. Yu, Shemyakin A. N., Solovyov N. G., Yakimov M. Yu, Glebov V. N., Dubrova G. A., Malyutin A. M., Thermoelectric detector application for measuring the ignition delay time in a shock heated combustible mixture, *Acta Astronautica*, 2023, vol. 204, pp. 787–793.
6. Von Gutfeld R. J., Laser-induced anisotropic thermoelectric voltages in thin films, *Applied Physics Letters*, 1973, vol. 23, no. 4, pp. 206–208.
7. Kotov M. A., Solovyov N. G., Shemyakin A. N., Yakimov M. Yu., Glebov V. N., Dubrova G. A., Malyutin A. M., Popov P. A., Ponyaev S. A., Monakhov N. A., Lapushkina T. A., Sakharov V. A., Kozlov P. V., Levashov V. Yu., Gerasimov G. Ya., On the principles of thermopower generation during registration of thermal fluxes by a thermoelectric detector in a pulsed gas dynamic experiment, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2024, vol. 25, iss. 3 [in Russian]. <http://chemphys.ipmnet.ru/issues/2024-25-3/articles/1114/>

8. Ulanovsky A. A., *Using the Seebeck Thermoelectric Effect for Temperature Measurement*, 2009. 6 С, <https://otc-obninsk.ru/publishing/01.pdf> [in Russian, available on 21.06.2024].
9. Surzhikov S. T., Yatsukhno D. S., Analysis of the Flight Data on Convective and Radiative Heating of the Surface of Martian Schiaparelli Descent Space Vehicle, *Fluid Dynamics*, 2022, no. 6, pp. 74–85 [in Russian].
10. *DLM-30 laser module*, http://www.ntoire-polus.ru/products_low_dlm.html (available on 25.07.2027).
11. JDS2900 series. *Two-channel DDS signal generator for arbitrary and standard shapes*, https://super-eyes.ru/img/instructions/JDS2900_signal_generator.pdf?srsltid=AfmBOoovoI-VMu0QEgFExbgEHArpZ5owIvdHzgE6ObrTyyBwD9euR-jy2
12. DSO5000 Series. *Digital Storage Oscilloscope. User Manual*, https://www.hantek.ru/products/mans/DSO5000B_manual_rus.pdf
13. *Digital microscope. DM9 1200 × 12MP*, https://aliexpress.ru/item/1005007459507025.html?ysclid=mmn9qh5hvr722479281&sku_id=12000040842987337
14. *Portable Laser Power/Energy Meter StarLite*, <https://lenlasers.ru/product/portativnyy-izmeritel-moshchnosti-energii-lazernogo-izlucheniya-starlite/?ysclid=micde6eef7172209067>
15. Dyakonov V. P., *Mathcad 11/12/13 in Mathematics. Handbook*, Moscow: Goryachaya Liniya – Telekom, 2007, 958 p. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 23 апреля 2026 г.