

## Особенности калибровки термоэлектрического детектора с использованием импульсного лазерного воздействия

© Ф.В. Филиппов<sup>1</sup>, М.А. Котов<sup>1</sup>, Н.Г. Соловьев<sup>1</sup>, В.Н. Глебов<sup>2</sup>, Г.А. Дуброва<sup>2</sup>,  
А.М. Малютин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“, Москва, Россия  
E-mail: filiprov@ipmnet.ru

Поступило в Редакцию 3 мая 2024 г.

В окончательной редакции 24 июля 2024 г.

Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Исследовались термоэлектрические детекторы, чувствительные элементы которых основаны на кристаллитах  $\text{Sg}$  и  $\text{GeTe}$ . В качестве источника излучения применялся лазерный диод с мощностью излучения до 30 W. Для оценки общего уровня чувствительности датчика использовался быстродействующий фотодиод. Приведенные аспекты выполнения калибровочных процедур позволяют получать вольт-ваттные характеристики для различных чувствительных элементов и определять степень достоверности выдаваемых ими значений тепловых потоков при применении в импульсном газодинамическом эксперименте.

**Ключевые слова:** термоэлектрический детектор, термоэзд, импульсный лазерный диод, фотодиод, калибровка.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.23.59400.6591k

Измерения температуры поверхности и теплового потока играют важную роль при проведении исследований процессов теплообмена. Наземные экспериментальные установки типа ударных труб позволяют моделировать многие ударно-волновые процессы в газовой динамике, которые происходят в реальных условиях полета спускаемых космических аппаратов. В таких исследованиях важно получать достоверные значения теплового потока к поверхности исследуемой модели, что довольно затруднительно из-за высоких значений удельной энтальпии в набегающем газовом потоке (несколько десятков  $\text{MJ/kg}$ ) и коротких временных периодов работы установки (менее нескольких сотен и десятков  $\mu\text{s}$ ) [1]. Иными словами, модель испытывает внезапную сильную тепловую нагрузку в очень коротком временном масштабе измерения. Чтобы откалибровать датчики для таких условий, проводятся эксперименты по приложению тепловой нагрузки от лазерного луча с известной выходной мощностью [2]. Для импульсных газодинамических процессов метод лазерной калибровки является наиболее подходящим, поскольку позволяет очень быстро подавать на датчик требуемое значение теплового потока. Используемое значение мощности излучения является фиксированным и может быстро меняться в процессе калибровки. Получаемая вольт-ваттная характеристика датчика используется для его последующего применения при рассматриваемых режимах течения газа: короткие временные интервалы и высокие температурные нагрузки [3].

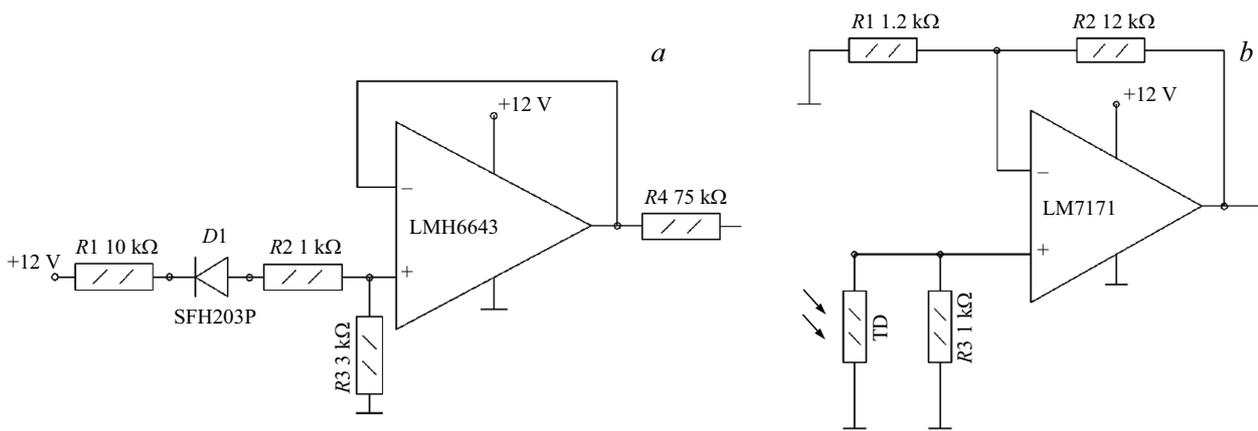
Настоящая работа является продолжением [4] и посвящена калибровке термоэлектрических детекторов (ТД), имеющих различные чувствительные элементы и успешно зарекомендовавших себя в интенсивных импульсных

газодинамических течениях [5–7]. Чувствительный слой ТД представляет собой наклонно-конденсированную пленку, которая формируется на теплопроводящей диэлектрической подложке посредством процедуры вакуумного косоугольного напыления. Носители заряда вследствие теплового движения создают разность потенциалов между верхней и нижней границами слоя, которая снимается во время эксперимента [8].

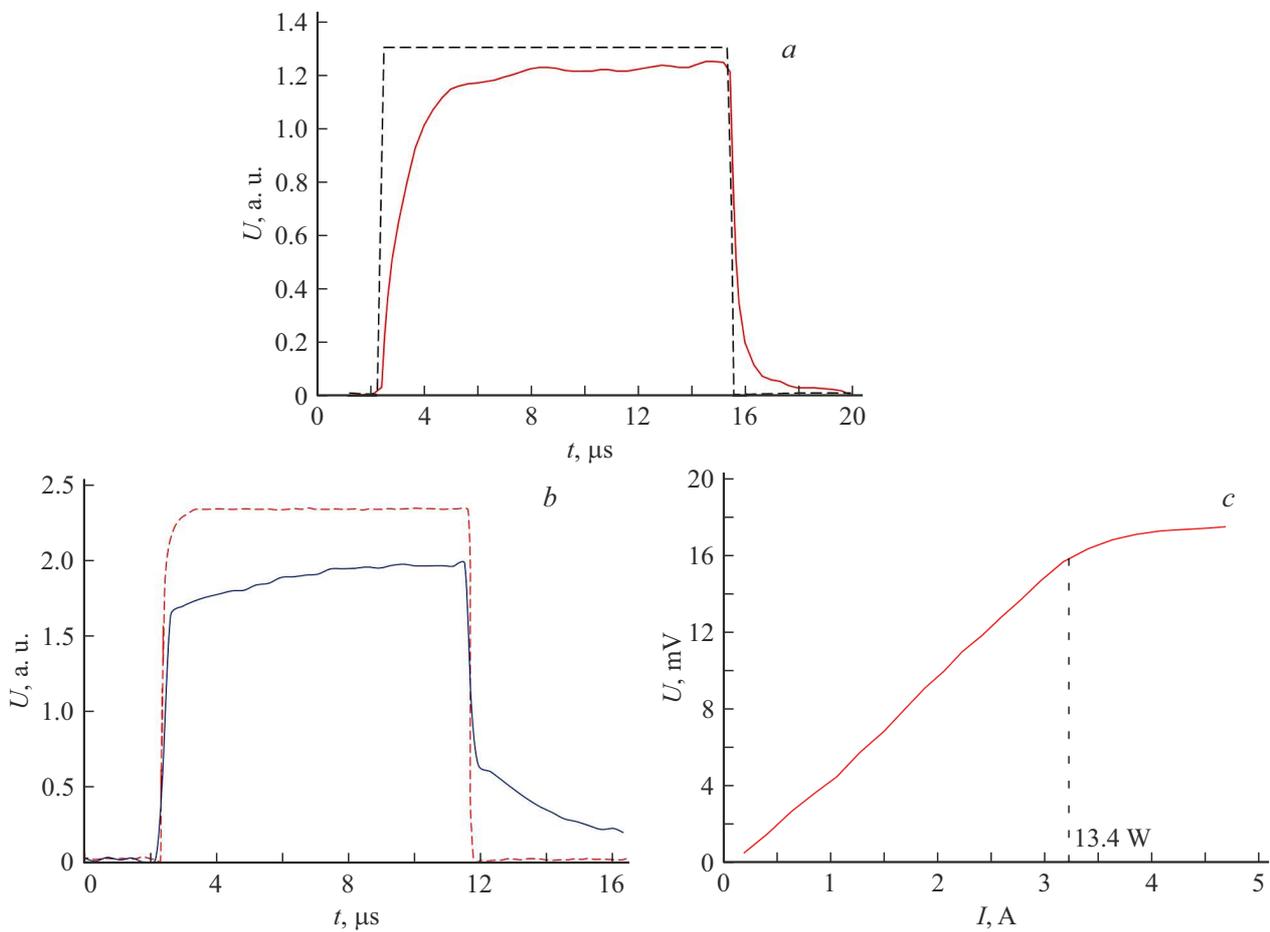
В качестве источника излучения в калибровочном стенде использовался лазерный диод с длиной волны лазерного излучения 970 nm, задавался импульсный режим работы при мощности излучения более 10 W. Для контроля времени отклика датчика и фронтов нарастания сигнала в оптической схеме стенда размещался быстродействующий фотодиод с временным разрешением 5 ns.

Представленные особенности проведения калибровочных процедур позволяют получать вольт-ваттные характеристики ТД, которые помогают лучше описать тепловые процессы высокоинтенсивных ударно-волновых взаимодействий, происходящих в импульсном газодинамическом эксперименте. При проведении калибровочных процедур для ТД необходимо сделать вывод не только об области линейности работы датчиков, но и об их быстродействии. Для этого необходимо иметь полное представление о частотных характеристиках источника излучения, задающего тепловую нагрузку. Чтобы оценить время выхода диодного лазера на заданный режим, использовалась схема (рис. 1, а) с быстродействующим фотодиодом SFH203P, работающим в режиме генератора тока.

Собранная система считывает изменение величины светового потока с временным разрешением менее 100 ns. На осциллограммах показаны частотные ха-



**Рис. 1.** *a* — принципиальная схема датчика, регистрирующего параметры лазерного излучения, с быстродействующим фотодиодом SFH203P, работающим в режиме генератора тока с повторителем сигнала через ОУ LMH6643. *b* — принципиальная схема десятикратного усилителя сигнала с термоэлектрического детектора с использованием ОУ LM7171.



**Рис. 2.** *a* — зависимости напряжения на фотодиоде и напряжения на генераторе тока от времени. Штриховая линия — импульс управляющего тока лазерного диода, сплошная линия — сигнал с фотодиода, показывающий характеристики приходящего лазерного импульса. *b* — зависимости напряжения на термоэлектрическом датчике (сплошная линия) и фотодиоде (штриховая линия) от времени. *c* — зависимость амплитудных значений разности потенциалов на ТД от тока на лазерном модуле.

рактеристики лазерной нагрузки (сплошная линия на рис. 2, *a*), относительно которых производилась дальнейшая калибровка датчиков. Длительность нарастания

сигнала, отражающая характерные параметры приходящего с лазерного диода импульса излучения, составляет порядка  $3\text{ }\mu\text{s}$  для переднего фронта.

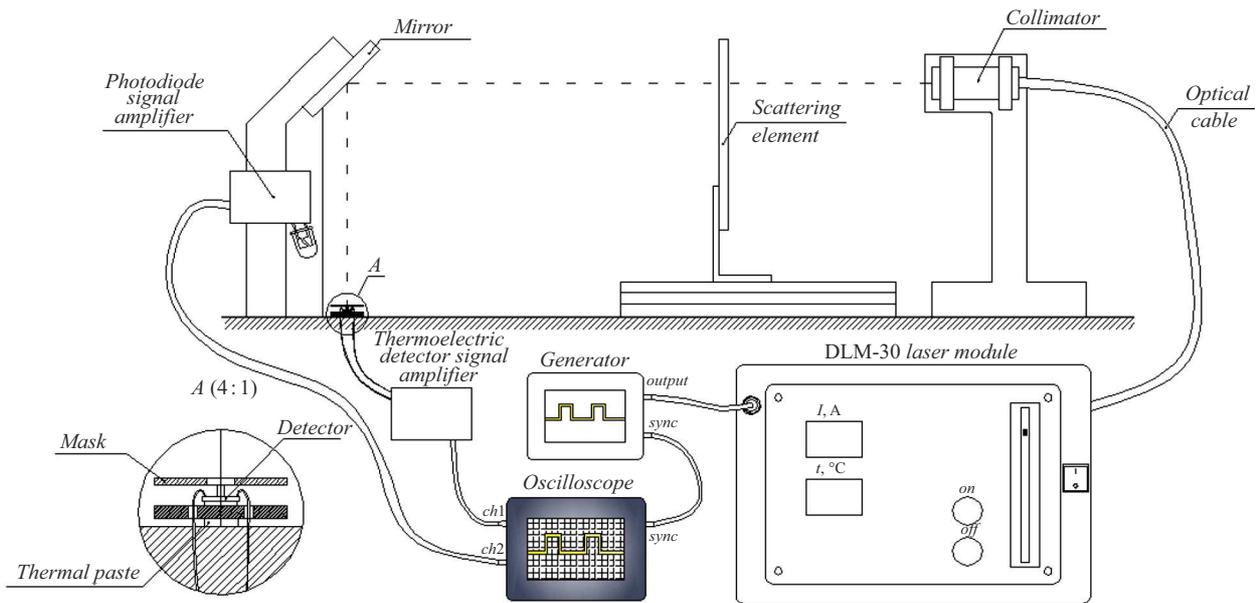


Рис. 3. Схема эксперимента по заданию калибровочной лазерной нагрузки термоэлектрическим детекторам.

Генератором сигналов формируются управляющие импульсы для лазерного диода (штриховая линия на рис. 2, *a*). Далее в оптический тракт (рис. 3) подается лазерное излучение в виде параллельного пучка (сплошная линия на рис. 2, *a*), интенсивность которого периодически повторяет форму импульса этого управляющего сигнала.

На расстоянии 90 mm после коллиматора установлен диффузно рассеивающий элемент в виде пластины из молочного полиметилметакрилата толщиной 4 mm. Необходимость использования рассеивающего оптического элемента обусловлена появлением спекл-структуры. Вследствие данного явления генерируемое лазерное излучение может иметь сильно неоднородный профиль плотности интенсивности.

На расстоянии 250 mm от коллиматора установлено зеркало с золотым напылением для отражения лазерного луча вертикально вниз. Исследуемый датчик, представляющий собой прямоугольную пластину размером  $14 \times 5$  mm с толщиной 1.5 mm (размеры чувствительного элемента  $5 \times 5$  mm, толщина  $< 0.3 \mu\text{m}$ ), установлен на расстоянии 100 mm от зеркала. Для экспериментов была изготовлена маска из анодированного алюминия с отверстием диаметром 3 mm. Для измерения сигналов с ТД параллельно его выходу устанавливался резистор  $1 \text{ k}\Omega$ , сигнал с ТД подавался на осциллограф через операционный усилитель (ОУ) с десятикратным коэффициентом усиления и временем задержки 42 ns (рис. 1, *b*).

На рис. 2, *b* приведены данные с фотодиода (штриховая линия), отражающие параметры роста/спада фронтов импульса лазерного излучения, приходящего на ТД на основе Cr. Зависимость амплитудных значений разности потенциалов на ТД от тока на лазерном модуле (т.е. от интенсивности излучения лазерного модуля)

представлена на рис. 2, *c*. Для подтверждения линейного характера зависимости для каждой точки на графике с помощью устройства Synrad Power Wizard 250 измерялась мощность лазерного излучения, после чего пересчитывалось ее значение, попадающее на датчик. Видно, что после значения  $13.4 \text{ W}$  (плотность потока излучения около  $53 \text{ W/cm}^2$ ) показания ТД на основе Cr перестают быть пропорциональными приходящей лазерной нагрузке и становятся нелинейными. Наблюдаемое значение термоэдс, выдаваемое ТД, соответствует распределению носителей заряда, установившемуся между верхней и нижней плоскостями чувствительного элемента. При задании большей тепловой нагрузки термическое равновесие структуры ТД нарушается, и начинают происходить процессы ее деградации [8]. Похожие данные были получены для ТД на основе пленок из GeTe. Для измерения сигналов в этом случае использовалась схема, аналогичная, приведенной на рис. 1, *b*, со стократным усилением, поскольку сигнал от таких структур на одинаковую тепловую нагрузку оказывается на порядок слабее [4].

В результате проведенных на собранном стенде калибровочных процедур показано, что при задании импульсной лазерной нагрузки чувствительным элементам ТД на основе GeTe и Cr генерируемые ими значения напряжения имеют следующие особенности:

- все элементы выдают сигнал пропорционально поглощенному лазерному излучению;

- полученные данные описываются моделью генерации термоэдс в чувствительном слое ТД вследствие разности температур на его передней и задней поверхностях, аспекты которой обсуждаются в работах [4–7].

Чернение поверхности элементов, как это было сделано в экспериментах [4], не осуществлялось, поскольку

нас интересовало временно разрешение фронтов выдаваемого сигнала. Для этого использовался фотодиод с высоким временным разрешением, который позволял определять времена роста/спада лазерных импульсов. Показанная в опытах задержка сигнала ТД длительностью менее микросекунды обуславливается толщиной чувствительного элемента и наступлением в нем термической релаксации. Более высокие значения временного отклика датчиков на тепловую нагрузку обусловлены как поглощением излучения подложкой датчика и генерацией термоэдс в обратном направлении, так и степенью черноты верхней поверхности чувствительного элемента.

Дальнейшие исследования на созданном стенде будут проводиться с целью уточнения параметров термоэдс в случае более коротких и интенсивных лазерных импульсов, что позволит определить режимы работы ТД при высоких тепловых нагрузках.

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (номер госрегистрации 124012500440-9) и государственного задания НИЦ „Курчатовский институт“.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Ya.B. Zeldovich, Yu P. Raizer, *Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena* (Courier Corporation, 2002).
- [2] S.Z. Sapozhnikov, V.Yu. Mityakov, A.V. Mityakov, *Heatmetry. The science and practice of heat flux measurement* (Springer, Cham, 2020). DOI: 10.1007/978-3-030-40854-1
- [3] K. Huber, T. Rödiger, in *Proc. of the ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conf. and Exposition* (American Society of Mechanical Engineers, 2020), vol. 5, V005T05A006. DOI: 10.1115/GT2020-14412
- [4] M.A. Kotov, N.G. Solovyov, V.N. Glebov, G.A. Dubrova, A.M. Malyutin, *St. Petersburg Polytech. Univ. J. — Physics and Mathematics*, **16** (1.1), 472 (2023). DOI: 10.18721/JPM.161.180
- [5] M.A. Kotov, A.N. Shemyakin, N.G. Solovyov, M.Y. Yakimov, V.N. Glebov, G.A. Dubrova, A.M. Malyutin, P.A. Popov, S.A. Poniaev, T.A. Lapushkina, N.A. Monakhov, V.A. Sakharov, *Appl. Therm. Eng.*, **195**, 117143 (2021). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117143
- [6] M.A. Kotov, A.N. Shemyakin, N.G. Solovyov, M.Y. Yakimov, V.N. Glebov, G.A. Dubrova, A.M. Malyutin, P.A. Popov, S.A. Poniaev, T.A. Lapushkina, N.A. Monakhov, V.A. Sakharov, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **2103**, 012218 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/2103/1/012218
- [7] M.A. Kotov, P.V. Kozlov, G.Ya. Gerasimov, V.Yu. Levashov, A.N. Shemyakin, N.G. Solovyov, M.Yu. Yakimov, V.N. Glebov,

G.A. Dubrova, A.M. Malyutin, *Acta Astron.*, **204**, 787 (2023). DOI: 10.1016/j.actaastro.2022.11.036

- [8] M.A. Котов, Н.Г. Соловьев, А.Н. Шемякин, М.Ю. Якимов, В.Н. Глебов, Г.А. Дуброва, А.М. Малютин, П.А. Попов, С.А. Поняев, Н.А. Монахов, Т.А. Лапушкина, В.А. Сахаров, П.В. Козлов, В.Ю. Левашов, Г.Я. Герасимов, *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*, **25** (3) (2024). <http://chemphys.edu.ru/issues/2024-25-3/articles/1114>