Известия НАН Армении, Физика, т.59, №3, с.366–376 (2024) УДК 536.2 DOI:10.54503/0002-3035-2024-59.3-366

# НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА В W/La<sub>0.99</sub>Ce<sub>0.01</sub>B<sub>6</sub>/Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ДАТЧИКЕ ОДНОФОТОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ

# А.А. КУЗАНЯН, В.Р. НИКОГОСЯН, Л.Г. МГЕРЯН, А.С. КУЗАНЯН\*

Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак, Армения

### \*e-mail: akuzanyan@yahoo.com

(Поступила в редакцию 16 августа 2024 г.)

Представлены результаты моделирования процессов распространения тепла в многослойном W/La<sub>0.99</sub>Ce<sub>0.01</sub>B<sub>6</sub>/Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> термоэлектрическом сенсоре однофотонного детектора. Расчеты проводились трехмерным матричным методом, основанным на уравнении распространения тепла из ограниченного объема. Исследованы временные зависимости температуры различных участков сенсора. Определены максимальное значение температуры в центре поверхности и в 10 точках с фиксированным шагом от центра к краю для всех слоев, время достижения максимальной температуры, время выравнивания температуры на поверхности слоев и температура, при которой это происходит, а также время спада температуры в горячем пятне до фонового значения. Выявлены особенности и закономерности распространения тепла в термоэлектрическом сенсоре после поглощения фотонов с энергией 7.1–0.8 эВ. Полученные результаты являются необходимой основой для создания термоэлектрического детектора, способного регистрировать одиночные фотоны в широкой области электромагнитного спектра.

#### 1. Введение

Исследования в различных областях науки и передовых технологий, таких как квантовая электроника, спектроскопия, астрономия, квантовые вычисления, классическая и квантовая связь космос-Земля, биология, безопасность, медицина, метрология и визуализация, часто требуют обнаружения слабого излучения, включая детектирование одиночных фотонов [1–3].

Однофотонные детекторы (SPD) широко изучены для детектирования излучения как в инфракрасном диапазоне [4–6], так и в ультрафиолетовом [7–9]. Разработаны нанопроволочные, сверхпроводниковые SPD с рекордными характеристиками [10–12]. Однако, по-прежнему актуальна задача разработки SPD нового поколения с более высокими характеристиками, обеспечивающими их использование в экстремально быстро развивающейся науке и технологиях, предъявляющих все более высокие требования. Нами изучается возможность создания термоэлектрического однофотонного детектора (TSPD), который по теоретическим оценкам [13] и данным компьютерного моделирования [14, 15] обладает рядом преимуществ по сравнению со сверхпроводящими детекторами. Мы разработали однослойные и многослойные конструкции термоэлектрического сенсора различной геометрии, с антиотражающим слоем, поглотителем, термоэлектрическим слоем и теплоотводом из различных материалов, изучили особенности распространения в сенсоре тепла, выделенного фотоном в горячем пятне, оценили мощность возникающего сигнала и шумов [16–19]. Наши последние исследования показали, что отношение сигнал/шум (SNR) термоэлектрического сенсора с вольфрамовым поглотителем, термоэлектрическим слоем из гексаборида лантана-церия и молибденовым теплоотводом на сапфировой подложке, при рабочей температуре 1 К, может быть значительно больше единицы для фотонов ультрафиолетовой области электромагнитного спектра [20]. Целью настоящей работы является исследование особенностей распространения тепла в термоэлектрическом сенсоре такой же конструкции при изменении рабочей температуры в области 0.5–1.5 К.

### 2. Методы исследований

Так же как в статье [20] мы исследуем многослойный термоэлектрический сенсор, состоящий из поглотителя (W), термоэлектрического слоя (La<sub>0.99</sub>Ce<sub>0.01</sub>B<sub>6</sub>) и теплоотвода (Mo). Эта многослойная конструкция имеет квадратную поверхность размерами 1 мкм<sup>2</sup> и располагается на диэлектрической подложке Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Изучаем особенности распространения тепла в термоэлектрическом сенсоре с толщинами поглотителя, термоэлектрического слоя, теплоотвода и подложки соответственно 15, 10, 10 и 100 нм.

Компьютерное моделирование процессов распространения тепла в термоэлектрическом сенсоре проводилось на основе уравнения теплопередачи из ограниченного объема, а именно, из горячего пятна, образованного в результате поглощения фотона. Использованная методика подробно описана в работе [16]. Изучены временные зависимости температуры в зоне термализации, в центре границ всех слоев, в 10 точках на каждой границе с шагом 50 нм от центра после поглощения одиночных фотонов с энергией 0.8, 1.65, 3.1 и 7.1 эВ в центре поверхности поглотителя при рабочей температуре сенсора ( $T_o$ ) 0.5, 0.8, 1, 1.2 и 1.5 К. Физические параметры материалов, использованных в конструкции сенсора при 0.5 К приведены в табл.1.

Пополютии	Материалы					
Параметры	W	La0.99Ce0.01B6	Мо	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	19300	4720	10280	4000		
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	0.0028	0.196	0.011	0.001		
Теплопроводность, Вт/(м·К)	720	0.35	25	0.7		
Коэффициент Зеебека, мкВ/К	-	90	-	-		
Удельное сопротивление, Ом м	1.54 ×10 <sup>-13</sup>	$3 \times 10^{-8}$	$7 \times 10^{-12}$	-		

Табл.1. Физические параметры использованных материалов при 0.5 К [21–28]

С увеличением рабочей температуры термоэлектрического сенсора в интервале 0.5-1.5 К удельное сопротивление  $La_{0.99}Ce_{0.01}B_6$  несколько понижается, у вольфрама незначительно повышается (на уровне тысячных пикоомов на метр), у молибдена не изменяется, но сопротивление молибдена более чем на порядок выше, чем у вольфрама. Коэффициент Зеебека La<sub>0.99</sub>Ce<sub>0.01</sub>B<sub>6</sub> меняется незначительно, максимум 104 мкВ/К достигается при 1.2 К. Однако не приходится ожидать, что такие изменения коэффициента Зеебека могут существенно повлиять на мощность сигнала.

Теплопроводность всех трех материалов, использованных в конструкции сенсора, растет с увеличением температуры. Отметим, что наиболее низкая теплопроводность у La<sub>0.99</sub>Ce<sub>0.01</sub>B<sub>6</sub>. Она меньше даже теплопроводности подложки. Теплопроводность молибдена более чем на порядок выше, чем у La<sub>0.99</sub>Ce<sub>0.01</sub>B<sub>6</sub>, а у вольфрама более чем на порядок выше, чем у молибдена. С увеличением температуры теплоемкость La<sub>0.99</sub>Ce<sub>0.01</sub>B<sub>6</sub> уменьшается, у W и Mo – растет. При всех рассмотренных температурах теплоемкость повышается в ряду Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, W, Mo, La<sub>0.99</sub>Ce<sub>0.01</sub>B<sub>6</sub>.

Используя результаты моделирования процессов распространения тепла в сенсоре и полученные временные зависимости температуры выбранных областей сенсора, определялись следующие параметры: максимальная температура  $T_{\rm m}$ , время достижения максимума  $t_{\rm m}$ , разность температур  $\Delta T_{\rm m} = T_{\rm m} - T_{\rm o}$ , время выравнивания температуры на всей поверхности слоя  $t_{\rm e}$ , температура при которой произошло выравнивание  $T_{\rm e}$  и разность температур  $\Delta T_{\rm e} = T_{\rm e} - T_{\rm o}$ . Определялось также время спада температуры горячего пятна ( $t_{\rm b}$ ) до уровня фона 0.1 мК, обратное значение которого можно рассматривать как скорость счета детектора (R).

#### 3. Результаты и их обсуждение

# 3.1. Общие закономерности распространения тепла в термоэлектрическом сенсоре

Основные закономерности временной зависимости температуры в различных участках поверхности всех слоев термоэлектрического сенсора одинаковы при всех рассмотренных энергиях фотонов и рабочих температурах. В качестве примера рассмотрим результаты моделирования распространения тепла в сенсоре при рабочей температуре 1.5 К после поглощения фотона с энергией 7.1 эВ. На рис.1 показаны графики временной зависимости температуры участков, расположенных на различном расстоянии d от центра поверхности термоэлектрического слоя. Можно видеть, что максимум этой зависимости достигается очень быстро. После максимума температура медленно спадает до рабочей температуры. Чем больше расстояние d, тем ниже максимум и тем позже он достигается. На поверхности других слоев наблюдаются аналогичные закономерности, однако, чем дальше расположен слой от горячего пятна, тем меньшие температуры на нем достигаются. Отметим, что эти закономерности наблюдались нами ранее для детектирующих элементов других конструкций.

#### 3.2. Максимальная температура и время достижения максимума

Рассмотрим сначала значения максимальной температуры  $T_m$ , время достижения максимума  $t_m$  и время  $t_b$  спада температуры до уровня фона в горячем пятне. Зависимость параметра  $T_m$  от рабочей температуры сенсора в случае поглощения фотонов с различной энергией представлена на рис.2. Можно видеть, что для фиксированной рабочей температуры параметр  $T_m$  выше для фотонов с



Рис.1. Временная зависимость температуры на расстоянии d от центра поверхности термоэлектрического слоя La<sub>0.99</sub>Ce<sub>0.01</sub>B<sub>6</sub> после поглощения фотонов с энергией 7.1 эВ при рабочей температуре 1.5 К.



Рис.2. Зависимость максимальной температуры в горячем пятне от рабочей температуры сенсора в случае поглощения фотонов с энергией: 1 - 7.1, 2 - 3.1, 3 - 1.65, 4 - 0.8 эВ.

большей энергией, что вполне логично, и для одной и той же энергии фотона убывает с увеличением рабочей температуры. Эта закономерность обусловлена увеличением теплоемкости вольфрама с увеличением температуры в области 0.5–1.5 К. Время достижения максимума в горячем пятне фиксировалось на первом шаге расчета, и было равно  $3 \times 10^{-7}$  пс для всех расчетов. Отметим, что параметры  $T_{\rm m}$  и  $t_{\rm m}$  временной зависимости температуры в центре поверхности поглотителя имеют те же значения, что в горячем пятне, т.к. горячее пятно соприкасается с поверхностью поглотителя.

Зависимости времени спада температуры горячего пятна до уровня фона и скорости счета детектора от рабочей температуры термоэлектрического сенсора



Рис.3. Зависимость параметров  $t_b$  и R временной зависимости температуры горячего пятна от рабочей температуры сенсора в случае поглощения фотонов с энергией: 1 - 7.1, 2 - 3.1, 3 - 1.65, 4 - 0.8 эВ.

приведены на рис.3. С увеличением  $T_0$  параметр  $t_b$  уменьшается, а R увеличивается для всех рассмотренных энергий фотона. Значение  $t_b$  больше, а R меньше при рассмотрении поглощения фотонов с большей энергией. Скорость счета детектора достигает нескольких терагерц. Это означает, что с использованием предложенного термоэлектрического сенсора может быть создан сверхбыстрый однофотонный детектор.

Теперь вернемся к рассмотрению параметров  $T_m$  и  $t_m$  временной зависимости температуры поверхности слоев сенсора. Значения параметров  $T_m$  и  $t_m$  поверхности термоэлектрического слоя, теплоотвода и подложки приведены в табл.2. Напомним, что значения параметров  $T_m$  и  $t_m$  поверхности поглотителя совпадают со значениями этих параметров для горячего пятна, которые представлены выше. Можно видеть, что параметр  $t_m$  уменьшается с увеличением рабочей температуры и практически одинаков, при одних и тех же значениях  $T_o$ , для разных энергий фотона. Эта закономерность выполняется как для поверхности термоэлектрического слоя, так и поверхности теплоотвода и поглотителя. При фиксированных значениях  $T_o$  и E параметр  $t_m$  увеличивается в ряду термоэлектрический слой, теплоотвод, подложка. Значения  $t_m$  близки для поверхности теплоотвода и подложки, и они на порядки больше, чем для поверхности термоэлектрического слоя.

Значения параметра  $T_{\rm m}$  уменьшаются с увеличением рабочей температуры и уменьшением энергии фотона. Данная закономерность также выполняется для поверхности всех слоев. Для фиксированных значений энергии фотона и рабочей температуры значения  $T_{\rm m}$  для поверхности теплоотвода и подложки отличаются на милликельвины. Отметим, что они намного меньше значений параметра  $T_{\rm m}$  для поверхности термоэлектрического слоя.

В завершении данного параграфа рассмотрим зависимость параметра  $\Delta T_{\rm m} = T_{\rm m} - T_{\rm o}$  от энергии фотона для различных значений рабочей температуры (рис.4). Представленные графики получены для временной зависимости температуры в центре поверхности термоэлектрического слоя. Можем видеть, что  $\Delta T_{\rm m}$  линейно возрастает с увеличением энергии фотона для всех рабочих температур. При фиксированной энергии фотона,  $\Delta T_{\rm m}$  имеет более высокое значение если  $T_{\rm o}$  меньше. Из данных табл.2 следует, что значения  $\Delta T_{\rm m}$  для поверхности теплоотвода и подложки будут значительно меньше представленных на рис.4.



Рис.4. Зависимость параметра  $\Delta T_{\rm m}$  от энергии фотона для поверхности термоэлектрического слоя при значениях рабочей температуры: l - 0.5, 2 - 0.8, 3 - 1, 4 - 1.2, 5 - 1.5 K.

# 3.3. Температура и время выравнивания температуры на всей поверхности слоя

На начальном этапе распространения тепла из горячего пятна в фиксированный момент времени температура на разных участках поверхности слоев термоэлектрического сенсора различная. В данном параграфе рассмотрим три параметра, которые характеризуют процесс выравнивания температур в сенсоре после поглощения фотона. Первый параметр – это время (t<sub>e</sub>) прошедшее с момента начала процесса распространения тепла из горячего пятна до момента, когда отличие температур на разных участках поверхности слоя становится меньше определенного значения. Второй параметр – абсолютная температура (T<sub>e</sub>), при которой это происходит. Третий параметр – разность температур  $\Delta T_e = T_e - T_o$ . Очевидно, что значения этих параметров зависят от выбранной величины отличия температур. По данным моделирования распространения тепла, выделенного фотоном с энергией 7.1 эВ в сенсоре с рабочей температурой 0.5 К, выравнивание температуры до уровня 1 мК на поверхности поглотителя происходит за 44 фс ( $T_e = 1.924$  K), а до уровня 0.1 мК за  $t_e = 114$  фс  $(T_{\rm e} = 1.738 \text{ K})$ . Чем меньшее отличие температур выбирается, тем позже и при более низкой температуре достигается выравнивание. Ниже рассмотрим эти три параметра для выравнивания температуры до уровня 0.1 мК.

На рис.5 приведены графики зависимости параметров  $t_e(1-4)$  и  $T_e(5-8)$  для поверхности слоев сенсора от рабочей температуры при поглощении фотонов с энергией 7.1 эВ. Можно заметить, что значения  $t_e$  для поверхности поглотителя и сенсора практически совпадают при всех  $T_0$ . Значения  $t_e$  для поверхности теплоотвода немного больше, чем для подложки при всех рабочих температурах, и для обеих поверхностей  $t_e$  монотонно убывает с увеличением  $T_0$ . Зависимость  $t_e$  и  $T_e$  поверхности поглотителя и термоэлектрического слоя от  $T_0$  имеет немонотонный характер. Последнее, очевидно, обусловлено температурной зависимостью теплоемкости и теплопроводности вольфрама в области рассматриваемых

<i>Т</i> <sub>0</sub> , К	<i>Е</i> , эВ	Термоэл. слой		Тепло	отвод	Подложка	
		$t_{\rm m} \times 10^5$ , пс	<i>T</i> <sub>m</sub> , K	<i>t</i> <sub>m</sub> , пс	<i>T</i> <sub>m</sub> , K	<i>t</i> <sub>m</sub> , пс	<i>T</i> <sub>m</sub> , K
0.5		3.42	18.01511	0.08214	0.50902	0.08424	0.50675
0.8	7.1	3.18	11.69607	0.01224	0.80906	0.01434	0.80523
1		3.00	9.59947	0.00594	1.01626	0.00714	1.00738
1.2		2.82	8.40582	0.00414	1.22545	0.00474	1.20881
1.5		2.67	7.26177	0.00294	1.53326	0.00372	1.50951
0.5	3.1	3.42	8.14743	0.08232	0.50394	0.08412	0.50295
0.8		3.18	5.55746	0.01212	0.80396	0.01452	0.80229
1		3.00	4.75467	0.00582	1.0071	0.00702	1.00322
1.2		2.82	4.34622	0.00414	1.21111	0.00504	1.20385
1.5		2.67	4.01571	0.00294	1.51467	0.00354	1.50415
0.5		3.42	4.57043	0.08214	0.5021	0.08424	0.50157
0.8	1.65	3.18	3.3322	0.01224	0.80211	0.01434	0.80122
1		3.00	2.99845	0.00582	1.00378	0.00732	1.00171
1.2		2.82	2.87459	0.00402	1.20592	0.00492	1.20205
1.5		2.67	2.83903	0.00282	1.5078	0.00342	1.50221
0.5		3.42	2.47354	0.08232	0.50102	0.08412	0.50076
0.8	0.8	3.18	2.02775	0.01242	0.80102	0.01452	0.80059
1		3.00	1.96895	0.00582	1.00183	0.00702	1.00083
1.2		2.82	2.01193	0.00402	1.20287	0.00492	1.20099
1.5		2.67	2.14918	0.00282	1.50378	0.00342	1.50107

Табл.2. Значения параметров *T*<sub>m</sub> и *t*<sub>m</sub> временной зависимости температуры поверхности слоев термоэлектрического сенсора

рабочих температур. Значения параметра  $T_e$  поверхности теплоотвода и подложки практически совпадают и линейно возрастают с увеличением  $T_o$ . Чем это обусловлено становится очевидным из графиков зависимости параметра  $\Delta T_e$  от рабочей температуры (рис.6).

Можно видеть, что параметр  $\Delta T_{\rm e}$  поверхности теплоотвода и подложки сов-



Рис.5. Зависимость параметров  $t_e$  и  $T_e$  от рабочей температуры сенсора при поглощении фотонов с энергией 7.1 эВ для поверхности слоев: 1, 5 – поглотитель, 2, 6 – термоэлектрический слой, 3, 7 – теплоотвод, 4, 8 – подложка.



Рис.6. Зависимость параметра  $\Delta T_e$  от рабочей температуры сенсора при поглощении фотонов с энергией 7.1 эВ для поверхности слоев: 1 – поглотитель, 2 – термоэлектрический слой, 3 – теплоотвод, 4 – подложка.

падают и мало отличаются от нуля при всех рабочих температурах. Следовательно, значения  $T_e$  поверхности этих слоев определяются значениями  $T_o$ , т.к.  $T_e = T_o + \Delta T_e$ . Параметр  $\Delta T_e$  поверхности поглотителя и термоэлектрического слоя совпадают и монотонно убывают с увеличением  $T_o$ .

Значения параметров  $t_e$  и  $\Delta T_e$  для случаев поглощения фотонов с энергией 3.1, 1.65 и 0.8 эВ представлены в табл.3. Очевидно, что параметры  $t_e$  и  $\Delta T_e$  совпадают для поглотителя и термоэлектрического слоя во всех рассмотренных случаях. Причем, значения параметра  $t_e$  равны нескольким десяткам фемтосетунд, т.е. за такие короткие промежутки времени температура выравнивается во всем

Табл.3. Значения параметров  $t_e$  и  $\Delta T_e$  для поверхности поглотителя (1), термоэлектрического слоя (2), теплоотвода (3) и подложки (4) в случаях поглощения фотонов с энергией 3.1, 1.65 и 0.8 эВ

E, eV	<i>T</i> <sub>o</sub> , K	t <sub>e</sub> , fs			$\Delta T_{\rm e}, {\rm K}$				
		1	2	3	4	1	2	3	4
3.1	0.5	78.12	78.12	95.52	85.32	0.578	0.578	0.004	0.003
	0.8	61.92	61.92	50.82	43.02	0.314	0.314	0.003	0.002
	1	55.92	55.92	34.62	28.92	0.204	0.204	0.004	0.002
	1.2	55.14	55.14	26.04	21.24	0.131	0.131	0.004	0.002
	1.5	49.14	49.14	20.34	16.14	0.081	0.081	0.004	0.001
1.65	0.5	60.54	60.54	74.64	63.84	0.319	0.319	0.002	0.001
	0.8	51.24	51.24	42.24	34.44	0.175	0.175	0.002	0.001
	1	43.92	43.92	29.82	24.42	0.12	0.12	0.002	0.001
	1.2	39.42	39.42	22.92	18.12	0.086	0.086	0.002	0.001
	1.5	35.22	35.22	18.12	13.92	0.057	0.057	0.002	0.001
0.8	0.5	46.02	46.32	50.22	39.42	0.16	0.159	0.001	0.001
	0.8	40.92	40.92	31.92	24.42	0.089	0.089	0.001	0.001
	1	35.22	35.22	24.42	19.02	0.062	0.062	0.001	0.001
	1.2	30.72	30.72	19.32	14.52	0.047	0.046	0.001	0.001
	1.5	26.52	26.52	15.42	11.52	0.033	0.033	0.001	0.001

объеме поглотителя. Данный факт обусловлен большой теплопроводностью вольфрама, что и определяет основные особенности распространения тепла во всем объеме термоэлектрического сенсора. По сравнению с поверхностью подложки, значения параметра  $t_e$  несколько выше для поверхности теплоотвода. Это и понятно, т.к. в данной конструкции сенсора подложка является тепловым резервуаром. Параметр  $t_e$  убывает с повышением рабочей температуры для поверхности всех слоев при всех рассмотренных энергиях фотона, и убывает с уменьшением энергии фотона при одинаковых значениях  $T_o$ . Значения параметра и термоэлектрического слоя при всех рассмотренных энергиях фотона, и убывает с уменьшением энергии фотона при одинаковых значениях  $T_o$ . Значения параметра с уменьшением энергии фотона при одинаковых значениях  $T_o$ . Значения параметра с уменьшением энергии фотона при одинаковых значениях  $T_o$ . Значения параметра с уменьшением энергии фотона при одинаковых значениях  $T_o$ . Значения параметра с уменьшением энергии фотона при одинаковых значениях  $T_o$ . Значения параметра с уменьшением энергии фотона при одинаковых значениях  $T_o$ . Значения параметра с уменьшением энергии фотона при одинаковых значениях  $T_o$ . Значения параметра  $\Delta T_e$  для поверхности теплоотвода и подложки не превышает нескольких мК.

### 4. Заключение

Методом компьютерного моделирования изучены особенности процессов распространения тепла в термоэлектрическом сенсоре, которые протекают после поглощения фотонов с энергией 7.1–0.8 эВ. Термоэлектрический сенсор с поверхностью 1 мкм<sup>2</sup> состоит из сапфировой подложки, молибденового теплоотвода, La0.99Ce0.01B6 термоэлектрического слоя и вольфрамового поглотителя с толщинами 100, 10, 10 и 15 нм соответственно. Важной особенностью данной работы является то, что рабочая температура сенсора изменялась в области 0.5–1.5 К. Исследованы параметры временной зависимости температуры горячего пятна, центра поверхности слоев сенсора и разноудаленных от центра областей поверхности слоев. Установлены следующие основные закономерности: на поверхности слоев максимальная температура достигается в центре, непосредственно под горячим пятном; с удалением от центра слоя максимальная температура понижается, а время достижения максимума увеличивается; чем дальше от горячего пятна расположен слой, тем меньшая максимальная температура на нем достигается; время спада температуры в горячем пятне до уровня фона при рабочей температуре сенсора 1.5 К меньше пикосекунды, чему соответствует терагерцовая скорость счета детектора; чем меньше энергия поглощенного фотона, тем большая скорость счета достигается при всех рабочих температурах сенсора; время достижения максимальной температуры на поверхности термоэлектрического слоя, теплоотвода и поглотителя уменьшается с увеличением рабочей температуры и практически одинаков, при одних и тех же значениях  $T_{o}$ , для разных энергий фотона; на поверхности всех слоев значение максимальной температуры уменьшается с увеличением рабочей температуры и уменьшением энергии фотона; максимальное увеличение температуры на поверхности слоя по отношению к рабочей температуре линейно возрастает с увеличением энергии фотона при всех рабочих температурах, и, при фиксированной энергии фотона, этот параметр больше для меньшей рабочей температуры; время, за которое разница температур разных участков поверхности слоев сенсора становится меньше 0.1 мК, составляет несколько десятков фемтосекунд, и оно уменьшается с увеличением рабочей температуры и уменьшением энергии фотона.

Изученные закономерности процесса распространения тепла поглощенного фотона в термоэлектрическом сенсоре позволят более целенаправленно вести разработку оптимальной конструкции сенсора для детектирования одиночных фотонов в области электромагнитного спектра от ближнего ИК до далекого УФ. Авторы благодарны А.М. Гуляну за интерес к работе и полезные дискуссии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по высшему образованию и науке PA в рамках научного проекта №24WS-1C016 «Разработка наноразмерного термоэлектрического однофотонного детектора с высокими характеристиками и широким спектральным диапазоном».

### ЛИТЕРАТУРА

- H. Hao, QY. Zhao, YH. Huang, J. Deng, F. Yang, SY. Ru, Z. Liu, C. Wan, H. Liu, ZJ. Li, HB. Wang, XC. Tu, LB. Zhang, XQ. Jia, XL. Wu, J. Chen, L. Kang, PH. Wu. Light Sci Appl, 13, 25 (2024).
- 2. R. Hadfield. Nat. Photon., 3, 696 (2009).
- 3. D. Cornwell. Opt. Photonics N., 27, 24 (2016).
- L.A. Coldren, S.W. Corzine, M.L. Mašanović. Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits, John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- A.W. Elshaari, W. Pernice, K. Srinivasan, O. Benson, V.Zwiller. Nat. Photonics, 14, 285 (2020).
- F. Gardes, A. Shooa, G. De Paoli, I. Skandalos, S. Ilie, T. Rutirawut, W. Talataisong, J. Faneca, V. Vitali, Y. Hou, T. Bucio, I. Zeimpekis, C. Lacava, P. Petropoulos. Sensors (Basel), 22, 4227 (2022).
- S. Gyger, J. Zichi, L. Schweickert, A.W. Elshaari, S. Steinhauer, S.F. Covre da Silva, A. Rastelli, V. Zwiller, K.D. Jöns, C. Errando-Herranz. Nat Commun, 12, 1408 (2021).
- E. Lomonte, M.A. Wolff, F. Beutel, S. Ferrari, C. Schuck, W.H.P. Pernice, F. Lenzini. Nat Commun, 12, 6847 (2021).
- 9. Y. Dai, K. Jia, G. Zhu, H. Li, Y. Fei, Y. Gu, H. Yuan, H. Wang, X. Jia, Q. Zha, L. Kang, J. Chen, S-n. Zhu, P. Wu, Z. Xie, L. Zhang. PhotoniX, 4, 7 (2023).
- S. Dello Russo, A. Elefante, D. Dequal, D.K. Pallotti, L. Santamaria Amato, F. Sgobba, M. Siciliani de Cumis, Photonics, 9, 470 (2022).
- 11. I. Holzman, Y. Ivry, Adv. Quantum Technol. 2, 1800058 (2019).
- F. Marsili, V.B. Verma, J.A. Stern, S. Harrington, A.E. Lita, T. Gerrits, I. Vayshenker, B. Baek, M.D. Shaw, R.P. Mirin, S.W. Nam, Nature Photonics, 7, 210 (2013).
- 13. A. Gulian, K. Wood, D. Van Vechten, G. Fritz. J. Mod. Opt., 51, 1467 (2004).
- K. Wood, D. Van Vechten, G. Fritz, H.-D. Wu, S. Bounak, K. Bussman, K. Winzer, S. Kunii, V. Gurin, C. Mitterer, M. Carlsson, F. Golf, A. Kuzanyan, G. Badalyantz, S. Harutyunyan, S. Petrosyan, V. Vardanyan, T. Paronyan, V. Nikoghosyan, A. Gulian, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 520, 56 (2004).
- 15. A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan. IEEE Sens. J., 20, 3040 (2020).
- 16. A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan. IEEE Sens. J., 20, 12776 (2020).
- A.A. Kuzanyan, A.S. Kuzanyan, V.R Nikoghosyan, S.R. Harutyunyan. J. Contemp. Phys., 57, 580 (2022).
- A.A. Kuzanyan, A.S. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, V.T. Tatoyan, V.S. Kuzanyan, S.R. Harutyunyan, G.Ts. Kharatyan, G.R. Badalyan. J. Contemp. Phys., 58, 155 (2023).
- 19. A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan. Opt. Eng., 63, 017105 (2024).
- 20. A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan. Opt. Eng., 63, 067102 (2024).
- G.T. Furukawa, T.B. Douglas, R.E. McCoskey, D.C. Ginnings. J. Res. Nat. Bur. Stand., 57, 67 (1956).
- 22. M.W. Wolfmeyer, J.R. Dillinger. Phys. Lett., 34A, 247 (1971).
- 23. G.K. White, S.J. Collocott. J. Phys. Chem. Ref. Data, 13, 1251 (1984).

- 24. C.Y. Ho, R.W. Powell, P.E. Liley. J. Phys. Chem. Ref. Data, 3, 689 (1974).
- 25. A. Gulian, A.M. Gulian. Mod. Phys. Lett. B, 34, 2050403 (2020).
- 26. W. Duffy, S. Dalal, M. Quiazon. J Appl. Phys., 81, 6675 (1997).
- 27. K. Samwer, K. Winzer. Z Physik B, 25, 269 (1976).

28. P.D. Desai, T.K. Chu, H.M. James, C.Y. Ho. J. Phys. Chem. Ref. Data, 13, 1069 (1984).

# SOME FEATURES OF HEAT PROPAGATION IN THE W/La<sub>0.99</sub>Ce<sub>0.01</sub>B<sub>6</sub>/Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> THERMOELECTRIC SENSOR OF SINGLE-PHOTON DETECTORS

#### A.A. KUZANYAN, V.R. NIKOGHOSYAN, L.G. MHERYAN, A.S. KUZANYAN

The results of modeling the heat propagation processes in a multilayer  $W/La_{0.99}Ce_{0.01}B_6/Mo/Al_2O_3$  thermoelectric sensor of a single-photon detector are presented. The calculations were performed using the three-dimensional matrix method based on the equation of heat propagation from a limited volume. The temperature temporal dependences of different areas of a sensor were investigated. The maximum temperature value in the center of the surface and at 10 points with a fixed step from the center to the edge of all layers, the time to reach the maximum temperature, the time of temperature equalization on the surface of the layers and the temperature at which this occurs, as well as the time of temperature decay in the hot spot to the background value were determined. The features and patterns of heat propagation in the thermoelectric sensor after absorption of photons with an energy of 7.1 - 0.8 eV were revealed. The obtained results are the necessary basis for creating a thermoelectric detector capable of registering single photons in a wide range of the electromagnetic spectrum.

# ሆኮԱՖՈՏՈՆ ԴԵՏԵԿՏՈՐԻ W/La0.99Ce0.01B6/Mo/Al2O3 ՋԵՐՄԱԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՏՎԻՉՈՒՄ ՋԵՐՄՈՒԹՅԱՆ ՏԱՐԱԾՄԱՆ ՊՐՈՑԵՍՆԵՐԻ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

# Ա.Ա. ԿՈԻՉԱՆՅԱՆ, Վ.Ռ. ՆԻԿՈՂՈՍՅԱՆ, Լ.Գ. ՄՀԵՐՅԱՆ, Ա.Ս. ԿՈԻՉԱՆՅԱՆ

Ներկայացված են միաֆոտոն դետեկտորի բազմաշերտ W/Lao.96co.01B6/Mo/Al2O3 ջերմաէլեկտրական տվիչում ջերմության տարածման պրոցեսների մոդելավորման արդյունքները։ Հաշվարկներն իրականացվել են եռաչափ մատրիցային մեթոդով, որը հիմնված է սահմանափակ ծավալից ջերմության տարածման հավասարման վրա։ Ուսումնասիրվել են տվիչի տարբեր հատվածների ջերմաստիձանի ժամանակային կախվածությունները։ Որոշվել են ջերմաստիձանի առավելագույն արժեքը մակերևույթի կենտրոնում և 10 կետերում՝ կենտրոնից մինչև եզր ֆիքսված քայլով բոլոր շերտերի համար, առավելագույն ջերմաստիձանին հասնելու ժամանակը, շերտերի մակերևույթի ջերմաստիձանի հավասարեցման ժամանակը և ջերմաստիձանը, ինչպես նաև տաք կետում ջերմաստիձանի մինչև ֆոնային արժեք անկման ժամանակը։ Բացահայտվել են 7.1–0.8 էՎ էներգիաով ֆոտոնների կլանումից հետո ջերմաէլեկտրական տվիչում ջերմության տարածման առանձնահատկություններն ու օրինաչափությունները։ Մտացված արդյունքներն անհրաժեշտ հիմք են հանդիսանում ջերմաէլեկտրական դետեկտոր ստեղծելու համար, որն ունակ է հայտնաբերել միակի ֆոտոններ