

ОТНОШЕНИЕ СИГНАЛА К ШУМУ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОДНОФОТОННОГО ДЕТЕКТОРА С CeV_6 СЕНСОРОМ И Bi-2223 ПОГЛОТИТЕЛЕМ

А.А. КУЗАНЯН^{1,2}, А.С. КУЗАНЯН^{1*}, В.Р. НИКОГОСЯН¹, В.Т. ТАТОЯН¹,
В.С. КУЗАНЯН¹, С.Р. АРУТЮНЯН^{1,2}, Г.Ц. ХАРАТЯН², Г.Р. БАДАЛЯН¹

¹Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак, Армения

²Российско-Армянский университет, Ереван, Армения

*e-mail: akuzanyan@yahoo.com

(Поступила в редакцию 7 марта 2023 г.)

Представлены результаты моделирования процессов распространения тепла в многослойном детектирующем элементе однофотонного термоэлектрического детектора, состоящем из последовательно расположенных на сапфировой подложке (Al_2O_3) теплоотвода (Bi2223), термоэлектрического сенсора (CeV_6), поглотителя (Bi2223) и просветляющего слоя (SiO_2). Рассматривалась также конструкция детектирующего элемента без просветляющего слоя. Моделирование процессов передачи тепла поглощенного фотона проводилось на основе уравнения распространения тепла из ограниченного объема. Исследованы случаи поглощения фотонов с энергиями 0.8–1000 эВ в детектирующих элементах с поверхностью 4 и 1 мкм^2 , различной толщиной поглотителя и сенсора при фиксированной рабочей температуре детектора 9 К. Изучены временные зависимости возникающего на сенсоре электрического напряжения, эквивалентная мощность джонсоновского и фононного шума. Рассчитано отношение сигнала к шуму и предложены пути повышения этого параметра.

1. Введение

Детектирование излучения на однофотонном уровне открывает новые возможности для развития науки и высоких технологий [1]. Различные типы детекторов с разными характеристиками доступны сегодня, однако задача получения однофотонного детектора (SPD) с высокими характеристиками остается активной областью исследований многочисленных групп ученых. SPD используются в квантовой электронике, метрологии, физике высоких энергий, астрономии и астрофизике, лазерной спектроскопии, медицине, телекоммуникационных системах, при тестировании микрочипов [2,3]. Фотоумножители (ФЭУ) имеют большую площадь обнаружения, но и имеют такие недостатки, как низкие параметры, высокое рабочее напряжение и большой размер [4]. Параметры однофотонных лавинных диодов (SPAD) значительно улучшились за последние десятилетия. Они могут быть интегрированы с микрооптикой и схемами считывания. Созданы

килопиксельные устройства на основе III–V полупроводников и мегапиксельные матрицы на основе кремния [5,6]. Однако среди различных типов детекторов рекордные характеристики принадлежат сверхпроводящим нанопроволочным детекторам (SNSPD). Они обладают высокой эффективностью детектирования и скоростью счета, низкими темновой скоростью счета и временным джиттером в широком диапазоне электромагнитного спектра и при различных рабочих температурах [7–11].

Термоэлектрический однофотонный детектор (TSPD) имеет ряд преимуществ перед SNSPD, а именно простоту конструкции детектирующего элемента и менее жесткие требования к рабочей температуре [12]. Путем компьютерного моделирования нами рассмотрены однослойная конструкция детектирующего элемента TSPD, в которой поглотитель и теплоотвод расположены на диэлектрической подложке, соединены между собой термоэлектрическим сенсором, и многослойная конструкция, в которой элементы детектирующего элемента расположенные друг над другом [13–17]. Определены свойства детектирующих элементов с сенсором CeB_6 , $(\text{La}, \text{Ce})\text{B}_6$ и FeSb_2 , поглотителем и теплоотводом W и LaB_6 , а также просветляющим слоем SiO_2 . Показано, что TSPD может иметь терагерцовую скорость счета и энергетическое разрешение не менее 1%. Чтобы получить высокое значение отношения сигнала к шуму (SNR) и высокую эффективность детектирования в некоторых конструкциях детектирующего элемента, мы использовали поглотитель из сверхпроводников Nb, Pb, YBCO [18] и Bi-2223 [19].

В данной работе рассмотрены процессы распространения тепла в детектирующем элементе, состоящем из теплоотвода Bi-2223, сенсора CeB_6 , поглотителя Bi-2223 и просветляющего слоя SiO_2 , расположенных последовательно на подложке из Al_2O_3 . Bi-2223 ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$) – это высокотемпературный сверхпроводник с критической температурой, намного превышающей рабочую температуру детектирующего элемента 9K [20]. Процессы распространения тепла после поглощения фотонов с энергией 0.8–1000 эВ исследованы методом компьютерного моделирования. Также рассчитаны фононный, джонсоновский шум и SNR.

2. Конструкция детектирующих элементов и параметры моделирования

Исследованы характеристики пятислойного детектирующего элемента TSPD, состоящего из расположенных на сапфировой подложке слоев $\text{SiO}_2/\text{Bi2223}/\text{CeB}_6/\text{Bi2223}$ (SiBiCeBi) с толщиной $Z_1/Z_2/Z_3/Z_4$. Во всех расчетах толщина антиотражающего слоя SiO_2 и подложки Al_2O_3 принималась равной 0.1 мкм и 1 мкм, соответственно. Толщины остальных слоев имели значения: Z_2 – 0.12, 0.1, 0.08, 0.06 и 0.04 мкм, Z_3 – 1.5, 1, 0.5, 0.2 и 0.1 мкм, Z_4 – 0.1 и 0.05 мкм. Антиотражающий слой SiO_2 обеспечивает оптическую связь детектирующего элемента и регистрируемых фотонов с эффективностью, близкой к 100% [21]. Выбранные толщины поглотителя Bi-2223 обеспечивают эффективное поглощение фотонов рассмотренных энергий [22]. Изменение толщины сенсора CeB_6 в широких пределах позволяет значительно изменять характеристики детектора, в частности, мощность возникающего на сенсоре сигнала.

В наших предыдущих работах [15–19] было показано, что тепло, выделенное фотоном в детектирующем элементе с поверхностью $10 \times 10 \text{ мкм}^2$, распространяется в небольшой области, расположенной непосредственно под зоной термализации фотона. В данной статье мы рассмотрели детектирующие элементы с площадью поверхности $2 \times 2 \text{ мкм}^2$ и $1 \times 1 \text{ мкм}^2$.

Рабочая температура детектирующего элемента выбрана равной 9К. При этой температуре термоэлектрик CeB_6 имеет высокий коэффициент Зеебека, что в соответствии с формулой $V = S\Delta T$ (V – возникающее на сенсоре электрическое напряжение, S – коэффициент Зеебека термоэлектрика, ΔT – разность температур на границах сенсора) обеспечивает высокий уровень сигнала детектора. Физические параметры использованных в конструкции детектирующего элемента материалов приведены в табл.1.

Табл.1. Параметры использованных в конструкции детектирующего элемента SiBiCeBi материалов при 9К [23–33]

Параметры	Материалы			
	SiO ₂	Bi-2223	CeB ₆	Al ₂ O ₃
Плотность, кг/м ³	2650	6313	4800	4000
Удельная теплоемкость, Дж/(кг К)	1.4	0.1	7.3	0.0588
Теплопроводность, Вт/(м К)	0.1	0.4	1.5	300
Коэффициент Зеебека, мкВ/К			150	
Удельное сопротивление, Ом м			5×10^{-7}	

Компьютерное моделирование процессов, происходящих в детектирующем элементе TSPD после поглощения фотонов с энергиями 0.8, 3.1, 7.1 и 1000 эВ (с длинами волн 1550, 400, 175 и 1.24 нм) в центре поверхности поглотителя, проведено на основе уравнения теплопередачи из ограниченного объема с использованием трехмерного матричного метода. Применяемые подходы и приближения подробно описаны в работе [34]. Моделирование процессов распространения тепла позволяет определить температуру в любой области детектирующего элемента в любой момент времени после термализации фотона. Ниже приведены временные зависимости температуры в зоне термализации, в центре границ всех слоев и в 10 точках на каждой границе с шагом 0.1 мкм от центра для детектирующего элемента с поверхностью 4 мкм^2 и с шагом 0.05 мкм для детектирующего элемента с поверхностью 1 мкм^2 . Также определена временная зависимость усредненной температуры поверхности всех слоев

Эквивалентная мощность шума рассматриваемых детектирующих элементов, а именно фоновый шум и шума Джонсона, рассчитывалась с использованием представленных в работах [35–39] уравнений. Мощность возникающего на сенсоре сигнала и отношение сигнала к шуму определялись для случаев регистрации фотонов с различной энергией детектирующими элементами SiBiCeBi различной конструкции.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Детектирующий элемент с площадью поверхности 4 мкм²

Здесь представлены результаты исследования процессов распространения тепла, происходящих в детектирующем элементе TSPD с площадью поверхности 4 мкм² после поглощения фотонов с энергиями 0.8, 3.1, 7.1 и 1000 эВ в центре поверхности поглотителя. Закономерности, полученные ранее для детектирующих элементов других конструкций [13–17], наблюдаются и для детектирующего элемента SiBiCeBi. Основными закономерностями являются: температура в зоне термализации фотона T_{hs} увеличивается с ростом энергии поглощенного фотона; чем дальше от зоны термализации расположена граница слоя, тем меньшее максимальное изменение температуры ΔT_m ; на каждой границе максимальное изменение температуры достигается в центре, непосредственно под зоной термализации; чем больше расстояние d от центра границы, тем меньше достигаемая максимальная температура T_{dm} и больше время достижения этого максимума t_{dm} ; максимальное электрическое напряжение V_m , возникающее на сенсоре, определяется максимальной разницей средних температур на границах сенсора ΔT_{asm} ; время t_b спада параметра ΔT_{asm} до фонового значения 0.1 мК возрастает с увеличением энергии поглощенного фотона, толщины поглотителя и сенсора. Также нами было показано, что основное влияние на характеристики сигнала детектора оказывает временная зависимость температуры на границе поглотитель–сенсор. Поэтому рассмотрим эту зависимость подробно.

Численные данные анализа временной зависимости температуры на границе поглотитель–сенсор после поглощения фотонов с энергиями 0.8, 3.1, 7.1 и 1000 эВ приведены в табл.2. В таблице указаны энергия фотона E , параметры временной зависимости температуры на границе поглотитель–сенсор на расстоянии d от центра. В каждой ячейке таблицы указаны параметры T_m , t_{dm} и t_{db} . Общим для

Табл.2. Параметры временной зависимости температуры на границе поглотитель–сенсор детектирующего элемента SiBiCeBi с толщиной слоев $Z_2 = Z_3 = Z_4 = 0.1$ мкм

$E, \text{эВ}$	$d, \text{мкм}$										
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
	$T_m, \text{К} / t_m, \text{нс} / t_b, \text{нс}$										
0.8	9.019	9.006	9.001	9.001	9.000	9.0001	-	-	-	-	-
	2.64	5.64	15.54	35.34	63.54	102.54					
	696.2	683.0	643.1	572.9	463.4	295.74					
3.1	9.085	9.017	9.004	9.001	9.001	9.00034	9.0002	9.0001	-	-	-
	1.20	4.86	15.85	35.34	64.74	98.34	140.34	194.94			
	793.4	787.1	768.5	737.0	691.4	628.74	544.14	422.94			
7.1	9.195	9.039	9.009	9.003	9.002	9.007	9.0005	9.0003	9.0002	9.0002	9.0002
	1.194	4.854	15.77	35.12	62.78	98.184	138.38	193.58	274.28	348.68	381.68
	1180	1176	1164	1144	1118	1084.3	1045	1001.8	958.58	923.18	906.68
1000	16.98	13.46	10.01	9.360	9.165	9.0871	9.0497	9.0311	9.0216	9.0175	9.0162
	2.07	2.22	12.12	31.02	58.32	93.12	119.52	189.72	269.22	343.92	376.32
	4258	4256	4253	4252	4250	4249.3	4248.1	4247.2	4246.6	4246.3	4246

всех расчетов является то, что максимальное значение T_{dm} превышает фоновое значение более чем в 190 раз и достигается при $d = 0$ мкм за несколько пикосекунд. Общими для всех рассмотренных энергий является также то, что с увеличением d максимальная температура T_{dm} и время спада температуры до фонового значения t_{db} уменьшаются, а время достижения максимума t_{dm} – увеличивается. Для фотонов с энергией 0.8 и 3.1 эВ параметр T_{dm} не превышает фон при значениях d , равных и больше 0.6 и 0.8 мкм, соответственно. С увеличением энергии фотонов при всех значениях d значительно возрастают параметры T_{dm} и t_{db} .

В предыдущих исследованиях [17–19,34] мы рассчитывали параметры детектора TSPD в предположении, что при определенной конструкции детектирующего элемента электрический сигнал на сенсоре может определяться разницей между максимальной температурой на границе поглотитель–сенсор и минимальной температурой на границе датчик–теплоотвод. Однако это неосуществимо для рассматриваемой в данной работе конструкции детектирующего элемента. Поэтому рассматриваем временную зависимость средней по всей поверхности слоев температуры. Графики временной зависимости изменения средней по всей поверхности слоев детектирующего элемента температуры относительно рабочей температуры (ΔT_{av}) для случая поглощения фотона с энергией 3.1 эВ в детектирующем элементе с толщиной слоев 0.1 мкм представлены на рис.1.

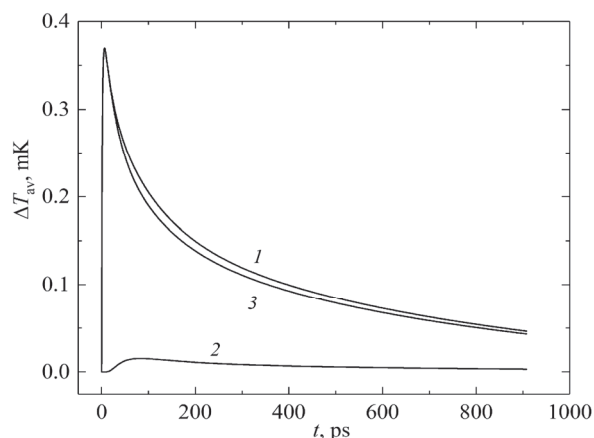


Рис.1. Временная зависимость параметра ΔT_{av} поверхности слоев детектирующего элемента SiBiCeBi (1 – сенсор CeB₆ и 2 – теплоотвод Bi-2223) и разность температур на границах сенсора – кривая 3; $E = 3.1$ эВ.

Можно констатировать, что наибольшая температура достигается на поверхности поглотителя Bi-2223. Максимальная средняя температура поверхности сенсора CeB₆ меньше. Температура на поверхности теплоотвода достигает значительно меньших значений и не превышает уровень фона. В результате, разность температур на границах сенсора практически совпадает с температурой поверхности сенсора и в несколько раз превышает значение фона. Отмеченные закономерности выполняются и для случаев поглощения фотонов других энергий.

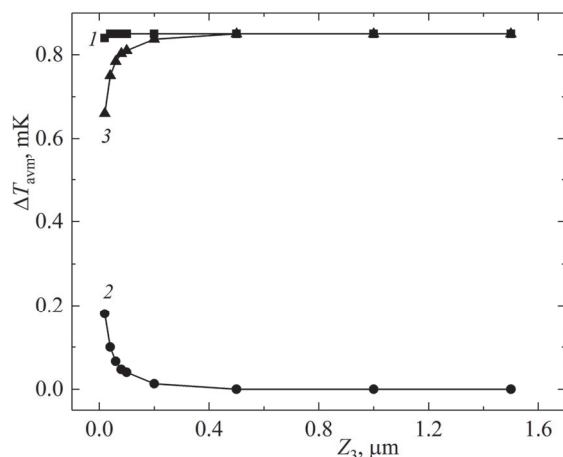


Рис.2. Зависимость от толщины сенсора максимального изменения средней температуры поверхности слоев детектирующего элемента SiBiCeBi (1 – CeB₆ сенсор, 2 – Bi-2223 теплоотвод) и разности средних температур на границах сенсора – кривая 3; $E = 7.1$ эВ.

Рассмотрим изменение максимального значения параметра ΔT_{av} в зависимости от толщины сенсора при поглощении фотонов с энергией 7.1 эВ в детектирующем элементе с толщинами $Z_1 = Z_2 = Z_4 = 0.1$ мкм. Зависимость параметра ΔT_{avm} от Z_3 приведена на рис.2. С увеличением толщины сенсора параметр ΔT_{avm} поверхности сенсора не меняется, а поверхности теплоотвода уменьшается, в результате чего их разность, параметр ΔT_{avsm} , возрастает. При $Z_3 > 0.2$ мкм параметр ΔT_{avm} поверхности теплоотвода равен нулю. Следовательно, значения ΔT_{avsm} определяются только средней температурой поверхности сенсора и 8.5 раз превосходят значение фона.

На рис.3 приведены временные зависимости разности средних температур на границах сенсора ΔT_{avs} для случаев поглощения фотонов с энергией 1 кэВ в детектирующих элементах с разной толщиной сенсора и толщинами $Z_1 = Z_2 = Z_4 = 0.1$ мкм. Видно, что изменение толщины сенсора в 50 раз не оказывает

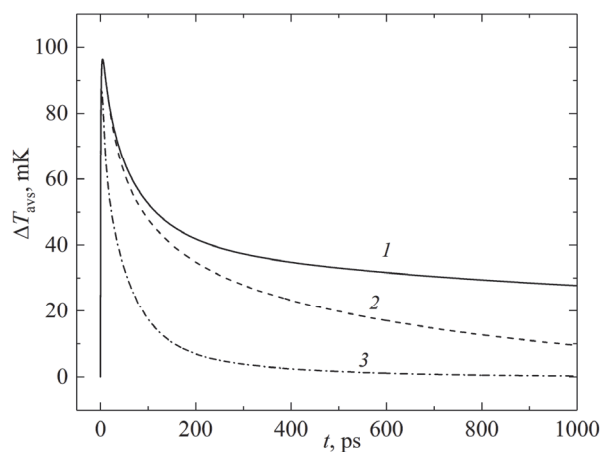


Рис.3. Временная зависимость разности средних температур на границах сенсора в зависимости от толщины сенсора: 1 – 1.0 мкм, 2 – 0.1 мкм, 3 – 0.02 мкм; $E = 1$ кэВ.

значительного влияния на значение максимума и время достижения максимума этих зависимостей. Однако с изменением толщины сенсора значительно изменяется динамика спада сигнала. С увеличением толщины Z_3 возрастает время спада параметра ΔT_{avs} до уровня фона и уменьшается обратная ей характеристика детектора – скорость счета.

На примере поглощения ИК фотонов с $E = 0.8$ эВ рассмотрим влияние толщины поглотителя на характеристики TSPD. Значения параметров ΔT_{avsm} и t_b представлены на рис.4 для толщин поглотителя 0.04, 0.06, 0.08 и 0.1 мкм. Толщины остальных слоев равны $Z_3 = 1.0$ мкм и $Z_1 = Z_4 = 0.1$ мкм. Можно видеть, что с увеличением Z_2 оба параметра уменьшаются. Причем, при $Z_2 = 0.1$ мкм максимальная разность средней температуры на границах сенсора становится меньше фона. Время спада сигнала до фонового значения уменьшается от 88.7 до 46.8 пс, что соответствует увеличению скорости счета детектора от 11.3 до 21.4 ГГц.

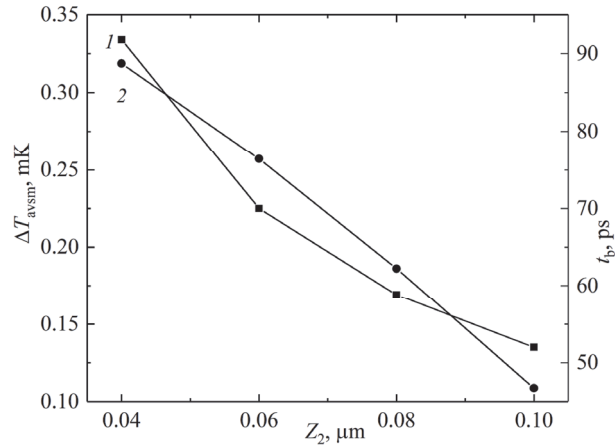


Рис.4. Зависимость максимальной разности средней температуры на границах сенсора (1) и времени спада сигнала до фона (2) от толщины поглотителя; $E = 0.8$ эВ.

3.2. Детектирующий элемент с площадью поверхности 1 мкм^2

Здесь представлены результаты исследования процессов распространения тепла в детектирующем элементе TSPD с поверхностью $1 \times 1 \text{ мкм}^2$, происходящих после поглощения одиночных фотонов с энергией 7.1 эВ в центре поверхности поглотителя с толщиной всех слоев 0.1 мкм кроме Z_3 . Толщина сенсора принималась равной 0.02, 0.04 и 0.06 мкм. Рассмотрим многослойную конструкцию детектирующего элемента с антиотражающим слоем SiO_2 и без него.

В табл.3 приведены следующие параметры детектирующих элементов с площадью поверхности A : толщина сенсора Z_3 , максимум временной зависимости разности средней температуры на границах сенсора ΔT_{avsm} и теплоотвода ΔT_{avhm} , время достижения максимума t_m , время спада сигнала до фона t_b , ширина на полувысоте временной зависимости разности средней температуры на границах сенсора t_{FWHM} . Приводятся данные для детектирующего элемента с площадью поверхности 1 мкм^2 с антиотражающим слоем SiO_2 и без него. Антиотражающий

Табл.3. Параметры временной зависимости разницы средней температуры на границах сенсора и теплоотвода детектирующего элемента с толщиной слоев $Z_1 = Z_2 = Z_4 = 0.1$ мкм, $E = 7.1$ эВ

Z_3 , мкм	Со слоем SiO ₂ , $A = 1$ мкм ²			Без слоя SiO ₂ , $A = 1$ мкм ²			Со слоем SiO ₂ , $A = 4$ мкм ²		
	ΔT_{avsm} , МК	ΔT_{avhm} , МК	t_{FWHM} , пс	ΔT_{avsm} , МК	ΔT_{avhm} , МК	t_{FWHM} , пс	ΔT_{avsm} , МК	ΔT_{avhm} , МК	t_{FWHM} , пс
	t_m , пс	t_m , пс		t_m , пс	t_m , пс		t_m , пс	t_m , пс	
	t_b , пс	t_b , пс		t_b , пс	t_b , пс		t_b , пс	t_b , пс	
0.06	3.342	0.262	78.24	3.618	0.314	124.8	0.844	0.066	77.8
	6.09	42.42		7.71	48.3		6.084	42.504	
	1139.5	238.05		733.62	300.42		499.88	-	
0.04	3.276	0.399	58.05	3.515	0.466	87.0	0.827	0.101	57.8
	5.43	27.75		6.6	31.56		5.43	27.75	
	771.36	230.13		493.02	256.59		306.12	31.89	
0.02	2.941	0.705	34.93	3.104	0.798	12.71	0.743	0.178	34.8
	4.26	16.53		4.98	9.026		4.272	16.572	
	379.17	190.41		268.44	190.2		145.9	60.012	

слой обеспечивает эффективную оптическую связь детектирующего элемента и регистрируемого излучения, но также поглощает часть выделенного фотоном в поглотителе тепла, влияя этим на характеристики возникающего на сенсоре сигнала. Для сравнения, в таблице также приводятся параметры детектирующего элемента с площадью поверхности 4 мкм².

Из таблицы видно, что значения всех параметров временной зависимости разницы средней температуры на границах сенсора (ΔT_{avsm} , t_m , t_b и t_{FWHM}) всех трех рассмотренных конструкций детектирующего элемента понижаются с уменьшением Z_3 . С уменьшением толщины сенсора параметры временной зависимости разницы средней температуры на границах теплоотвода меняются следующим образом: ΔT_{avhm} увеличивается, а t_m и t_b уменьшаются. Более тонкий сенсор в конструкции детектирующего элемента приводит к достижению более высоких температур на границе сенсор–теплоотвод, что приводит к уменьшению разности температур на границах сенсора и увеличению разности температур на границах теплоотвода. Это обусловлено тем, что температура на границе поглотитель–сенсор и теплоотвод–подложка мало зависит от Z_3 . Параметр ΔT_{avsm} детектирующего элемента со слоем SiO₂ при уменьшении A с 4 до 1 мкм² возрастает значительно. Возрастает еще больше, если из конструкции детектирующего элемента исключается антиотражающий слой, что можно было прогнозировать. Уменьшение A на параметр t_{FWHM} оказывает меньшее влияние, чем исключение слоя SiO₂. На рис.5 представлена временная зависимость возникающего на сенсоре электрического напряжения для трех конструкций детектирующего элемента с толщиной сенсора 0.06 мкм. Видно, что максимальное напряжение достигает сотен нановольт. Оно наиболее высокое у детектирующих элементов с поверхностью 1 мкм² и без антиотражающих слоев.

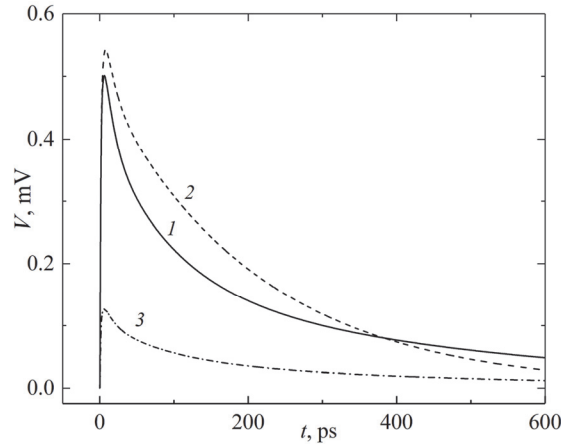


Рис.5. Временная зависимость возникающего на сенсоре электрического напряжения для трех конструкций детектирующего элемента: 1 – $A = 1 \text{ мкм}^2$, со слоем SiO_2 ; 2 – $A = 1 \text{ мкм}^2$, без слоя SiO_2 ; 3 – $A = 4 \text{ мкм}^2$, со слоем SiO_2 ; $Z_3 = 0.06 \text{ мкм}$ и $E = 7.1 \text{ эВ}$.

3.3. Отношение сигнала к шуму

Возможность регистрации электрического сигнала определяется отношением сигнала к шуму [40, 41] и задается уравнением $\text{SNR} = P_s/P_n$, где P_s и P_n – это средние мощности сигнала и шума, измеренные в одной и той же полосе частот регистрирующей системы. В ряде работ [42–45] эти параметры рассмотрены для фотонных детекторов. Мы определяем SNR термоэлектрического детектора, основываясь на уравнениях эквивалентной мощности фонов и джонсоновского шума тепловых сенсоров и данных моделирования процессов распространения тепла после поглощения одиночных фотонов в детектирующем элементе. Мгновенная мощность электрического сигнала системы составляет $P(t) = I \times V = V^2/R$, где V – электрическое напряжение, возникающее в системе с сопротивлением R при протекании тока I . Средняя за период T активная мощность $P = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt$. В нашем многослойном детектирующем элементе функциональными являются три слоя: сенсор CeV_6 с коэффициентом Зеебека 150 мкВ/К и удельным сопротивлением $5 \times 10^{-7} \text{ Ом м}$ при 9 К , сверхпроводящие поглотитель и теплоотвод. Нетрудно посчитать, что сопротивление сенсора объемом $2 \times 2 \times 0.02 \text{ мкм}^3$ будет равно 2.5 МОм . Чтобы вычислить мгновенную мощность сигнала, нужно знать также возникающее на сенсоре мгновенное напряжение. Оно равно произведению коэффициента Зеебека CeV_6 на разность усредненной температуры на границах сенсора $\Delta T_{\text{avs}}(t)$. Разделив интеграл мгновенной мощности на время интегрирования сигнала, которое в нашем случае является временем спада сигнала до фонового значения, получим среднюю за период T мощность сигнала.

Эквивалентная мощность фонов и джонсоновского шума функциональных слоев детектирующего элемента SiBiCeBi вычислена в соответствии с уравнениями для термоэлектрического теплового сенсора [35]. Оказалось, что фоновый шум на 2 порядка меньше и не оказывает особого влияния на суммарную эквивалентную мощность шума (NEP) и среднюю за время T мощность шума (P_n), значения которой приведены в табл.4.

Табл.4. SNR детектирующего элемента SiBiCeBi с $Z_3 = 0.02$ мкм, $R = 2.5$ МОм, NEP = $2.57 \cdot 10^{-12}$ Вт Гц $^{-1/2}$

E , эВ	ΔT_{asm} , мК	V_{sm} , нВ	$P(t)_{m}$, Вт	T , пс	$\int_0^T P(t)dt$, Вт пс	P_s , Вт	P_n , Вт	SNR
0.8	0.116	17.4	1.213×10^{-13}	8.55	9.429×10^{-13}	1.10×10^{-13}	8.79×10^{-7}	1.25×10^{-7}
3.1	0.37	48.62	9.459×10^{-13}	69.96	2.278×10^{-11}	3.26×10^{-13}	3.07×10^{-7}	1.06×10^{-6}
7.1	0.743	111.5	4.961×10^{-12}	145.5	1.357×10^{-10}	9.33×10^{-13}	2.13×10^{-7}	4.38×10^{-6}
1000	87.28	13092	6.856×10^{-8}	1243.7	1.783×10^{-6}	1.43×10^{-9}	7.29×10^{-8}	1.97×10^{-2}

4. Заключение

Исследована конструкция пятислойного детектирующего элемента термоэлектрического однофотонного детектора, состоящая из расположенных на сапфировой подложке теплоотвода Bi-2223, сенсора CeB₆, поглотителя Bi-2223 и антиотражающего слоя SiO₂. Методом компьютерного моделирования изучены процессы распространения тепла в этом детектирующем элементе после поглощения фотонов с энергией 0.8 эВ – 1 кэВ. Определены зависимости основных характеристик детектирующего элемента от его конструкции и энергии поглощенного фотона. Вычислена мощность шума и сигнала детектирующего элемента. В работе приводятся значения параметр SNR для детектирующего элемента с площадью поверхности 4 мкм², которые меньше единицы для всех рассмотренных энергий. Уменьшение площади чувствительного элемента и исключение антиотражающего слоя увеличивает SNR на порядок, но значения SNR остаются слишком маленькими, что исключает возможность создания TSPD с таким чувствительным элементом для регистрации УФ фотонов.

Пути повышения SNR являются использование в конструкции детектирующего элемента термоэлектрического сенсора с более высоким коэффициентом Зеебека (например, FeSb₂), что обеспечит получение более высокой мощности сигнала, или понижение рабочей температуры, что уменьшит мощность шума. При температурах около 1 К перспективным материалом сенсора TSPD является гексаборид (La, Ce)B₆.

Авторы благодарны А.М. Гуляну за интерес к работе и полезные дискуссии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по науке РА в рамках проекта N 1-6/23-I/IPR.

ЛИТЕРАТУРА

1. R.H. Hadfield. Nat. Photon., **3**, 696 (2009).
2. M.D. Eisaman, J. Fan, A. Migdall, S.V. Polyakov. Rev. Scient. Inst., **82**, 071101 (2011).
3. T. Polakovic, W. Armstrong, G. Karapetrov, Z.E. Meziani, V. Novosad. Nanomaterials, **10**, 1198 (2020).
4. Y. Yu, H. Lv, K. Tariq, D. Liu, X. Sheng, C. Feng. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, **1008**, 165433 (2021).
5. X. Jiang, M. Itzler, K. O'Donnell, M. Entwistle, M. Owens, K. Slomkowski, S. Rangwala. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **21**, 5 (2015).
6. K. Morimoto, A. Ardelean, M.-L. Wu, A. C. Ulku, I. M. Antolovic, C. Bruschini, E. Charbon. Optica, **7**, 346 (2020).

7. I.E. Zadeh, J.W.N. Los, R.B.M. Gourgues, J. Chang, A.W. Elshaari, J.R. Zichi, Y.J. van Staaden, J.P.E. Swens, N. Kalhor, A. Guardiani, Y. Meng, K. Zou, S. Dobrovolskiy, A.W. Fognini, D.R. Schaart, D. Dalacu, P.J. Poole, M.E. Reimer, X. Hu, S.F. Pereira, V. Zwiller, S.N. Dorenbos. *ACS Photonics*, **7**, 1780 (2020).
8. L. Parlato, D. Salvoni, M. Ejrnaes, D. Massarotti, R. Caruso, R. Satariano, F. Tafuri, X.Y. Yang, L. You, Z. Wang, G.P. Pepe, R. Cristiano. *J. Low Temp. Phys.*, **199**, 6 (2020).
9. L. You. *Nanophotonics*, **9**, 2673 (2020).
10. S. Steinhauer, S. Gyger, V. Zwiller. *Appl. Phys. Lett.*, **118**, 100501 (2021).
11. M. Häubler, R. Terhaar, M.A. Wolff, H. Gehring, F. Beutel, W. Hartmann, N. Walter, M. Tillmann, M. Ahangarianabhari, M. Wahl, T. Röhlicke, H.-J. Rahn, W.H.P. Pernice, C. Schuck. *Rev. Sci. Instrum.*, **94**, 013103 (2023).
12. A. Gulian, K. Wood, D. Van Vechten, G. Fritz. *J. Mod. Opt.*, **51**, 1467 (2004).
13. A.A. Kuzanyan, V.A. Petrosyan, A.S. Kuzanyan. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **350**, 012028 (2012).
14. A.A. Kuzanyan, A.S. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **673**, 012007 (2016).
15. A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan. *J. Contemp. Phys.*, **53**, 338 (2018).
16. A.A. Kuzanyan, A.S. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan. *J. Contemp. Phys.*, **53**, 242 (2018).
17. A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan. *IEEE Sens. J.*, **20**, 3040 (2019).
18. A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan. *J. Contemp. Phys.*, **53**, 73 (2018).
19. A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, N.G. Margiani, G.A. Mumladze, S.R. Harutyunyan, A.S. Kuzanyan. *J. Contemp. Phys.*, **57**, 174 (2022).
20. H. Maeda, Y. Tanaka, M. Fukutomi, T. Asano. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **27**, L209 (1988).
21. M. Caloz, M. Perrenoud, C. Autebert, B. Korzh, M. Weiss, C. Schönenberger, R.J. Warburton, H. Zbinden, F. Bussi eres. *Appl. Phys. Lett.*, **112**, 061103 (2018).
22. L. Grigoryan, K. Yakushi, C.-J. Liu, S. Takano, M. Wakata, H. Yamauchi. *Physica C*, **218**, 153 (1993).
23. G.Jr. Carini, G. Carini, D. Cosio, G. D'Angelo, F. Rossi. *Philos. Mag.*, **96**, 761 (2016).
24. <https://nanoheat.stanford.edu/sites/default/files/publications/A33.pdf>
25. X. Yang, T.K. Chaki. *Supercond. Sci. Technol.*, **6**, 343 (1993).
26. R.A. Fisher, S. Kim, S.E. Lacy, N.E. Phillips, D.E. Morris, A.G. Markelz, J.Y.T. Wei, D.S. Ginley. *Phys. Rev. B*, **38**, 11942 (1988).
27. M. Ikebe, H. Fujishiro, T. Naito, K. Noto. *J. Phys. Soc. Jpn.*, **63**, 3107 (1994).
28. G.T. Furukawa, T.B. Douglas, R.E. McCoskey, D.C. Ginning. *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, **57**, 67 (1956).
29. http://www.phys.ufl.edu/ireu/IREU2013/pdf_reports/Allen_Scheie_FinalReport.pdf
30. Y. Peysson, C. Ayache, B. Salce, J. Rossat-Mignod, S. Kunii, T. Kasuya. *J. Magn. Magn. Mater.*, **47**, 63 (1985).
31. Y. Peysson, C. Ayache, B. Salce. *J. Magn. Magn. Mater.*, **59**, 33 (1986).
32. V. Petrosyan. *J. Contemp. Phys.*, **46**, 125 (2011).
33. A.S. Kuzanyan, S.R. Harutyunyan, V.O. Vardanyan, G.R. Badalyan, V.A. Petrosyan, V.A. Kuzanyan, S.I. Petrosyan, V.E. Karapetyan, K.S. Wood, H.-D. Wu, A.M. Gulian. *J. Solid State Chem.*, **179**, 2862 (2006).
34. A. Kuzanyan, V. Nikoghosyan, A. Kuzanyan. *IEEE Sens. J.*, **20**, 12776 (2020).
35. U. Dillner, E. Kessler, H.-G. Meyer. *J. Sens. Sens. Syst.*, **2**, 85 (2013).
36. J.C. Mather. *Applied Optics*, **21**, 1125 (1982).
37. P.L. Richards. *J. Appl. Phys.*, **76**, 1 (1994).
38. D.G. Johnson. 1.14 - Thermal Sensors, Ed.: S. Liang, *Comprehensive Remote Sensing*, Elsevier, 2018, pp. 376-410.
39. U. Birkholz, R. Fettig, J. Rosenzweig. *Sensors and Actuators*, **12**, 179 (1987).
40. C. Sherman, J. Butler. *Transducers and Arrays for Underwater Sound*. Springer Science & Business Media, 2007.

41. **D.J. Schroeder.** Astronomical optics. Academic Press., 1999.
42. **C.B. McKitterick, H. Vora, X. Du, B.S. Karasik, D.E. Prober.** J. Low Temp. Phys., **176**, 291 (2014).
43. **B.S. Karasik, A.V. Sergeev, D.E. Prober.** IEEE Trans. THz Sci. & Technol., **1**, 97 (2011).
44. **L. Viti, A.R. Cadore, X. Yang, A. Vorobiev, J.E. Muench, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Stake, A.C. Ferrari, M.S. Vitiello.** Nanophotonics, **10**, 89 (2021).
45. **A. Varpula, K. Tappura, J. Tiira, K. Grigoros, O-P. Kilpi, K. Sovanto, J. Ahopelto, M. Prunnila.** APL Photon., **6**, 036111 (2021).

**CeB₆ ՏՎԻՉՈՎ ԵՎ Bi-2223 ԿԼԱՆԻՉՈՎ ՋԵՐՄՈՒԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՄԻԱՖՈՏՈՆ
ԴԵՏԵԿՏՈՐԻ ԱԶԴԱՆՇԱՆ-ԱՂՍՈՒԿ ՀԱՐԱԲԵՐԱԿՑՈՒԹՅՈՒՆԸ**

Ա.Ա. ԿՈՒԶՄԱՆՅԱՆ, Ա.Ս. ԿՈՒԶՄԱՆՅԱՆ, Վ.Ռ. ՆԻԿՈՂՈՍՅԱՆ, Վ.Տ. ԹԱԹՈՅԱՆ,
Վ.Ս. ԿՈՒԶՄԱՆՅԱՆ, Ս.Ռ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Գ.Ց. ԽԱՌԱՏՅԱՆ, Գ.Ռ. ԲԱԴԱԼՅԱՆ

Ներկայացված են ջերմության տարածման պրոցեսների մոդելավորման արդյունքները միաֆոտոն ջերմաէլեկտրական դետեկտորի բազմաշերտ դետեկտոր տարրում, որը բաղկացած է ջերմատարից (Bi2223), ջերմաէլեկտրական տվիչից (CeB₆), կլանիչից (Bi2223) և հալկանդարդարձնող շերտից (SiO₂), որոնք հաջորդաբար դասավորված են շափյուղե (Al₂O₃) տակդիրի վրա: Դիտարկվել է նաև առանց հալկանդարդարձնող շերտի դետեկտոր տարրի կառուցվածքը: Կլանված ֆոտոնի ջերմափոխանակման գործընթացների մոդելավորումը իրականացվել է սահմանափակ ծավալից ջերմության տարածման հավասարման հիման վրա: Ուսումնասիրված են 0.8–1000 էՎ էներգիա ունեցող ֆոտոնների կլանման դեպքերը 4 և 1 մկմ² մակերեսով, կլանիչի և սենսորի տարբեր հաստություններով դետեկտոր տարրում դետեկտորի ֆիքսված 9 Կ աշխատանքային ջերմաստիճանում: Ազդանշան-աղմուկ հարաբերակցությունը հաշվարկված է և առաջարկվում են այս պարամետրը բարելավելու ուղիներ:

**SIGNAL-TO-NOISE RATIO OF A THERMOELECTRIC SINGLE-PHOTON
DETECTOR WITH CeB₆ SENSOR AND Bi-2223 ABSORBER**

A.A. KUZANYAN, A.S. KUZANYAN, V.R. NIKOGHOSYAN, V.T. TATOYAN,
V.S. KUZANYAN, S.R. HARUTYUNYAN, G.Ts. KHARATYAN, G.R. BADALYAN

The results of the simulation of heat propagation processes in the multilayer detection pixel of a single-photon thermoelectric detector consisting of heat sink (Bi-2223), thermoelectric sensor (CeB₆), absorber (Bi-2223), and antireflection layer (SiO₂) arranged in series on sapphire substrate (Al₂O₃) are presented. The design of the detection pixel without an antireflection layer is also considered. Simulation of the processes of absorbed photons heat transfer is carried out based on the equation of heat propagation from a limited volume. The cases of absorption of photons with energies of 0.8–1000 eV in detection pixels with a surface of 4 and 1 μm², different thicknesses of absorber and sensor at a fixed operating temperature of the detector of 9 K are studied. Temporal dependences of voltage arising on the sensor, the equivalent power of Johnson and phonon noise are investigated, the signal-to-noise ratio is calculated, and the ways to increase this parameter are proposed.