

УДК 536.2

ЧЕТЫРЕХСЛОЙНЫЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ОДНОФОТОННОГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДЕТЕКТОРА

А.А. КУЗАНЯН*, А.С. КУЗАНЯН, В.Р. НИКОГОСЯН

Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак, Армения

*e-mail: akuzanyan@yahoo.com

(Поступила в редакцию 18 февраля 2019 г.)

Методом компьютерного моделирования исследованы процессы распространения тепла в четырехслойном чувствительном элементе термоэлектрического однофотонного детектора после поглощения фотона с энергией 0.8 эВ. Предложена конструкция чувствительного элемента, состоящая из последовательно расположенных на сапфировой подложке слоев теплоотвода (W), термоэлектрического сенсора (CeB_6), поглотителя (W) и антиотражающего слоя (LaB_6). Для различных толщин слоев чувствительного элемента рассчитаны временные зависимости интенсивности возникающего на чувствительном элементе сигнала, определены значения и время достижения максимального сигнала, время спада сигнала до фонового значения и скорость счета детектора. Компьютерное моделирование проводилось на основе уравнения распространения тепла из ограниченного объема с использованием трехмерного матричного метода для дифференциальных уравнений. Показано, что термоэлектрический детектор с четырехслойным чувствительным элементом имеет системную эффективность детектирования на уровне 95%. При этом обеспечивается также гигагерцовая скорость счета. Детектор с такими характеристиками может иметь применения в различных областях науки и современных технологий.

1. Введение

Детекторы ИК диапазона с высокой эффективностью детектирования и скоростью счета используются в современных телекоммуникационных системах. Однофотонные детекторы и источники ИК диапазона могут служить как основой для создания телекоммуникационных систем нового поколения, так и иметь применения во многих других областях [1–5]. Сверхпроводящие детекторы превосходят по своим характеристикам представленные сегодня на рынке однофотонные детекторы [6,7]. По теоретическим оценкам термоэлектрические однофотонные детекторы (TSPD) обладают сопоставимыми характеристиками [8–10]. Основными преимуществами TSPD являются высокие характеристики при максимально простой конструкции чувствительного элемента и отсутствие

жестких требований к рабочей температуре [11,12]. Данная работа является продолжением исследований методом компьютерного моделирования процессов распределения тепла в чувствительном элементе TSPD. Решается задача определения наиболее перспективных конструкций чувствительного элемента TSPD для однофотонного детектирования в области электромагнитного спектра от ИК до жесткого рентгена. При этом в модели чувствительного элемента изменяются взаимное расположение частей чувствительного элемента, их геометрические размеры и использованные материалы. На рис.1 представлены три конструкции чувствительного элемента TSPD: однослойная [13], трехслойная [14] и четырехслойная [15].

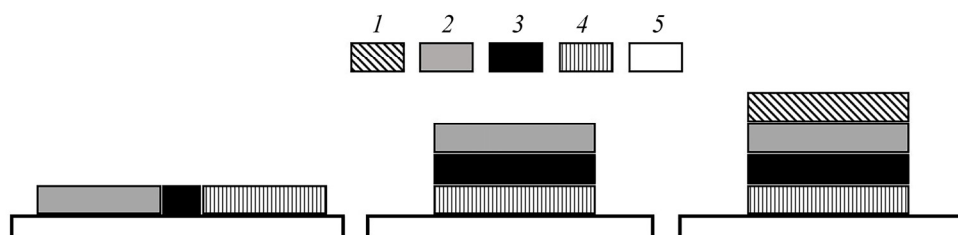


Рис.1. Конструкции чувствительного элемента TSPD, слева направо: однослойная, трехслойная и четырехслойная. Слои чувствительного элемента: 1 – LaB_6 антиотражающий слой, 2 – W поглотитель, 3 – CeB_6 термоэлектрический сенсор, 4 – W теплоотвод, 5 – Al_2O_3 подложка.

Компьютерное моделирование процессов распределения тепла в однослойном чувствительном элементе показало, что подбором оптимальной геометрии поглотителя W и сенсора CeB_6 можно добиться высокого энергетического разрешения и высокой скорости счета при регистрации фотонов в широкой области электромагнитного спектра. Показано, что временная зависимость сигнала имеет разную форму при поглощении фотона в различных областях поглотителя, что усложняет определение энергии детектируемого фотона [16–19]. При использовании трехслойного чувствительного элемента TSPD такие особенности не наблюдаются и возможно однозначно определить энергию фотона по значению максимального сигнала [20].

Важнейшей характеристикой однофотонных детекторов является эффективность детектирования, а именно, отношение числа зарегистрированных фотонов к числу попавших в детектор. Эффективность детектирования определяется тремя составляющими: эффективностью оптической связи фотонов и чувствительного элемента, эффективностью поглощения фотонов и эффективностью регистрации уже поглощенного фотона [21]. В телекоммуникационных системах

малая эффективность детектирования недопустима, поэтому многими исследовательскими группами рассматривается задача повышения эффективности детекторов различной конструкции [22–27]. Эффективность однослойного и трехслойного чувствительного элемента TSPD с поглотителем LaB_6 рассмотрены в [28,29]. В настоящей работе предложена модель и изучены характеристики высокоэффективного детектора фотонов с энергией 0.8 эВ для использования в телекоммуникационных системах. Методом компьютерного моделирования исследуются процессы распространения тепла в четырехслойном чувствительном элементе TSPD, состоящем из антиотражающего слоя LaB_6 , поглотителя и теплоотвода из W, сенсора CeB_6 и подложки Al_2O_3 .

2. Методика расчетов

Низкий коэффициент отражения в ближнем ИК диапазоне (~5%) имеют содержащие наночастицы LaB_6 покрытия [30]. Они являются хорошими поглотителями в ближнем ИК диапазоне и используются в фильтрах солнечного излучения [31]. Чтобы обеспечить высокую эффективность оптической связи фотонов и чувствительного элемента в качестве материала антиотражающего слоя нами выбран LaB_6 . Коэффициент поглощения W для фотонов с энергией 0.8 эВ составляет $\alpha = 3.915 \times 10^5 \text{ см}^{-1}$ [32]. Нетрудно посчитать, что для фотонов с такой энергией вероятность поглощения в вольфраме толщиной 0.05, 0.1, 0.2 и 0.3 мкм составит, соответственно, 86, 98, 99.96 и 99.999998 %. Следовательно, при соответствующем выборе толщины вольфрамового поглотителя можно обеспечить близкое к 1 значение эффективности поглощения фотонов с энергией 0.8 эВ. Высокая вероятность регистрации уже поглощенного фотона возможна при сигнале в десять и более раз превосходящем уровень шума. Амплитуда сигнала TSPD (возникающее на сенсоре электрическое напряжение) пропорциональна произведению коэффициента Зеебека материала термоэлектрического сенсора и возникающей на сенсоре разности температур. Следовательно, высокой эффективности регистрации поглощенного фотона можно добиться подбором материала сенсора и оптимизацией архитектуры чувствительного элемента.

Метод компьютерного моделирования был применен для изучения особенностей процессов распространения тепла в трехслойном чувствительном элементе TSPD [29,33–35]. Используем этот же метод для определения характеристик TSPD с антиотражающим слоем LaB_6 . Предложена модель четырехслойной чувствительной ячейки TSPD. Компьютерное моделирование процессов, протекающих после поглощения фотона с энергией 0.8 эВ в центре поверхности антиотражающего слоя LaB_6 , проводилось на основе уравнения распространения тепла из ограниченного объема с использованием трехмерного

матричного метода. Подробности примененных подходов и приближений приведены в работе [33]. Физические характеристики использованных в расчетах материалов представлены в табл.1. Термоэлектрик CeB_6 имеет максимальное значение коэффициента Зеебека при температуре 9 К, которая выбрана в качестве рабочей температуры чувствительного элемента TSPD.

Табл.1. Параметры использованных материалов при 9 К

Параметры	Материал			
	LaB_6	CeB_6	W	Al_2O_3
Плотность, кг/м^3	4720	4800	19250	4000
Удельная теплоемкость, Дж/кг К	0.196 [36]	7.3 [38]	0.187 [41]	0.0588 [43]
Теплопроводность, Вт/м К	100 [37]	0.8 [39]	9680 [42]	300 [44]
Коэффициент Зеебека, мкВ/К	–	150 [40]	–	–

В соответствии с рис.1 четырехслойный чувствительный элемент располагается на сапфировой подложке (Al_2O_3) и состоит из расположенных сверху вниз слоев: $L1$ (LaB_6 – антиотражающий слой толщиной Z_1), $L2$ (W – поглотитель, Z_2), $L3$ (CeB_6 – термоэлектрический сенсор Z_3) и $L4$ (W – теплоотвод Z_4). Поглотитель и теплоотвод являются одновременно контактами для регистрации возникающего на сенсоре электрического напряжения.

3. Результаты и обсуждения

В расчетах меняются толщины слоев $L2$ – $L4$ чувствительного элемента при постоянной толщине антиотражающего слоя $Z_1 = 0.1$ мкм и площади поверхности чувствительного элемента 10×10 мкм². Полученные в результате расчетов характеристики чувствительного элемента имеют следующие обозначения: ΔT_m – возникающая на сенсоре максимальная разность температур, V_m – максимальное электрическое напряжение, t_m – время достижения максимального сигнала, t_b – время спада сигнала до фонового значения (10^{-4} К) и $R = 1/t_b$ – скорость счета.

3.1. Регистрация фотонов четырехслойным чувствительным элементом TSPD с W теплоотводом толщиной 1мкм

Результаты компьютерного моделирования процессов распространения тепла в четырехслойном чувствительном элементе TSPD с антиотражающим слоем LaB_6 , термоэлектрическим сенсором CeB_6 , вольфрамовым поглотителем и

теплоотводом при толщине последнего $Z_4 = 1$ мкм представлены в табл.2.

Рассмотрим расчеты с номерами 1–3. Для них $Z_2 = 0.2$ мкм, Z_3 имеет значения 0.1, 0.05 и 0.01 мкм. Для расчетов 1 и 2 параметр ΔT_m больше фонового значения 10^{-4} К, для перечисленных трех расчетов скорость счета R варьируется в диапазоне 0.67–2.63 ГГц. С уменьшением Z_3 уменьшаются параметры ΔT_m , t_m , V_m и t_b , а R возрастает. Чтобы понять причину наблюдаемых закономерностей рассмотрим каким образом меняется со временем температура на границах слоев $L2-L3$ и $L3-L4$. Именно разность этих температур и является причиной возникновения на чувствительном элементе электрического напряжения, позволяющего регистрировать фотон и определять его энергию. По данным расчета 1 разность температур на границах слоя $L3$ достигает максимума 3.27×10^{-4} К за время $t_m = 96$ пс. В этот момент температура на границе $L2-L3$ достигает значения 9.00034 К (рис.2, кривая 1), тогда как температура на границе $L3-L4$ в это время

Табл.2. Характеристики четырехслойного чувствительного элемента TSPD при $Z_4 = 1$ мкм

Номер расчета	Z_2 , мкм	Z_3 , мкм	ΔT_m , 10^{-4} К	t_m , пс	V_m , мкВ	t_b , пс	R , ГГц
1	0.2	0.1	3.27	96	0.49	1500	0.67
2	0.2	0.05	2.71	81.9	0.407	1050	1
3	0.2	0.01	0.59	60.3	0.089	380	2.63
4	0.12	0.1	6.61	66	0.992	1050	0.95
5	0.12	0.05	5.68	55.95	0.851	700	1.43
6	0.12	0.01	1.34	39.9	0.202	310	3.23
7	0.05	0.1	11.03	40.2	1.654	770	1.3
8	0.05	0.05	9.89	34.95	1.484	565	1.77
9	0.05	0.01	3	27.5	0.45	260	3.85
10	0.04	0.1	12.55	38	1.883	750	1.33
11	0.04	0.05	11.11	33	1.667	540	1.85
12	0.04	0.01	3.38	25	0.507	250	4
13	0.03	0.1	14.08	36	2.113	740	1.35
14	0.03	0.05	12.73	30.9	1.91	530	1.89
15	0.03	0.01	3.89	22.5	0.583	240	4.16
16	0.01	0.1	18.43	31.8	2.765	720	1.39
17	0.01	0.05	16.8	26.7	2.52	520	1.92
18	0.01	0.01	5.14	17.85	0.77	220	4.55

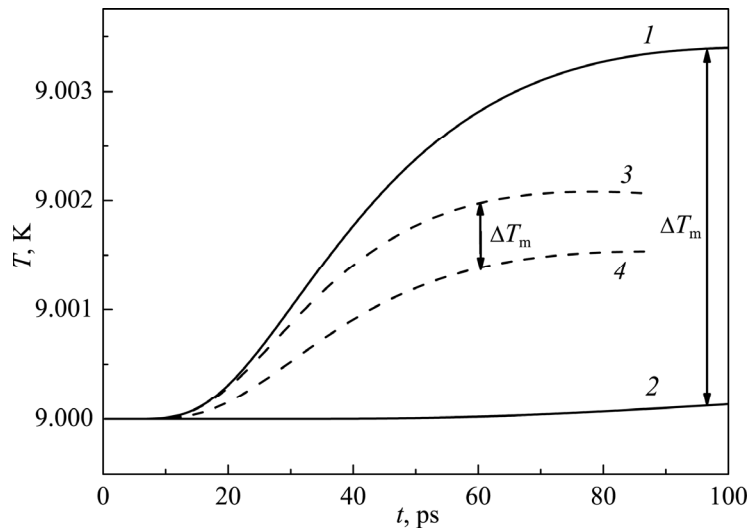


Рис.2. Временные зависимости температуры на границе термоэлектрического слоя $L3$ по результатам расчетов 1 (кривые 1, 2) и 3 (кривые 3, 4).

достигает значения 9.000013 K (рис.2, кривая 2), т.е. практически не меняется. Согласно данным расчета 3 тепло значительно быстрее проходит через тонкий термоэлектрический слой, и на границах слоя $L3$ максимальная разница температур $\Delta T_m = 0.59 \times 10^{-4}\text{ K}$ достигается спустя 60.3 ps после поглощения фотона. В этот момент температуры на границах $L2-L3$ (рис.2, кривая 3) и $L3-L4$ (рис.2,

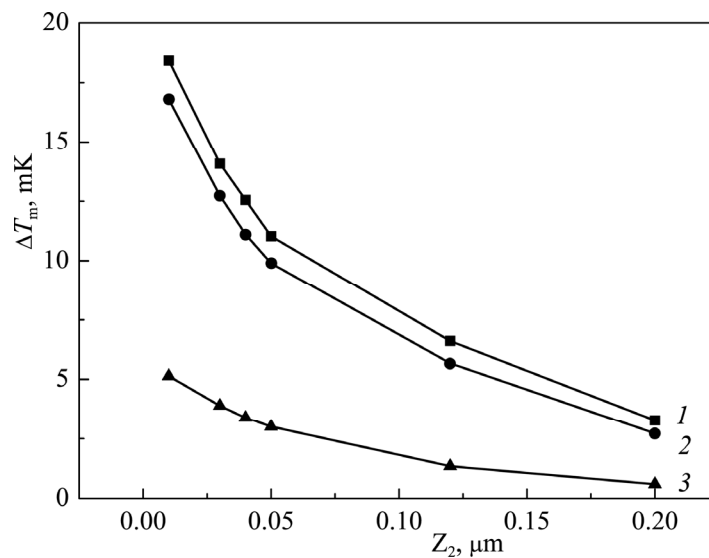


Рис.3. Зависимости параметра ΔT_m от толщины слоя $L2$ для толщин термоэлектрического слоя $Z_3 = 0.1\text{ мкм}$ (кривая 1), 0.05 мкм (кривая 2) и 0.01 мкм (кривая 3).

кривая 4) достигают значений 9.000197 К и 9.000138 К, соответственно. Таким образом, в случае более тонкого термоэлектрического слоя достигается меньший по амплитуде максимальный сигнал за более короткое время.

Рассмотрим как будут меняться основные параметры чувствительного элемента с изменением толщины поглотителя – слоя $L2$. На рис.3 приведена зависимость параметра ΔT_m от толщины второго слоя Z_2 для толщины термоэлектрического слоя Z_3 равной 0.1 мкм (кривая 1), 0.05 мкм (кривая 2) и 0.01 мкм (кривая 3). Параметр ΔT_m при всех значениях Z_2 больше для больших значений Z_3 и монотонно возрастает с уменьшением толщины Z_2 . Максимальный сигнал $\Delta T_m = 18.43 \times 10^{-4}$ К получен при значениях Z_2 и Z_3 соответственно 0.01 и 0.1 мкм. Близкое расположение кривых 1 и 2 свидетельствует о том, что дальнейшее увеличение Z_3 не может существенно увеличить значения параметра ΔT_m .

На рис.4 приведена зависимость параметра t_m от толщины слоя $L2$ для толщин термоэлектрического слоя Z_3 – 0.1, 0.05 и 0.01 мкм. Время достижения максимума сигнала понижается с уменьшением Z_2 , и для одинаковых Z_2 меньше при меньших толщинах Z_3 . Наименьшее значение $t_m = 17.85$ пс получено при $Z_2 = Z_3 = 0.01$ мкм.

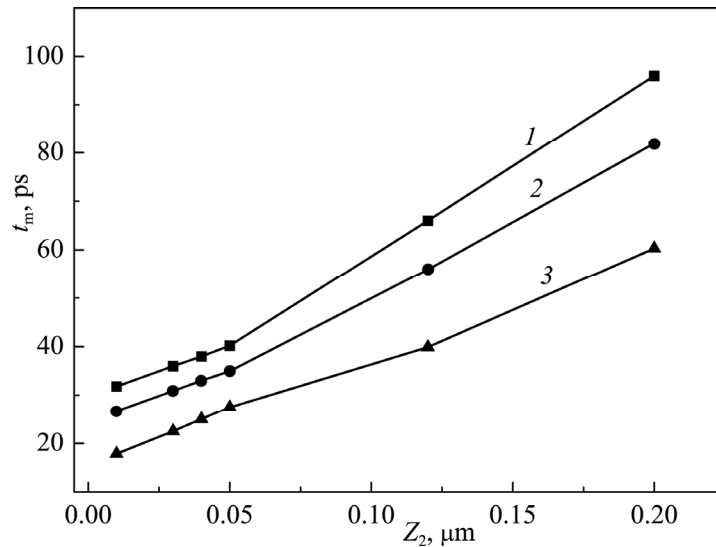


Рис.4. Зависимости параметра t_m от толщины слоя $L2$ для толщин термоэлектрического слоя Z_3 – 0.1 мкм (кривая 1), 0.05 мкм (кривая 2) и 0.01 мкм (кривая 3).

На рис.5 приведены зависимости параметра V_m от толщины слоя $L2$ для толщин термоэлектрического слоя Z_3 – 0.1, 0.05 и 0.01 мкм. В логарифмической шкале эти зависимости практически линейны. Можно утверждать, что максимальное значение возникающего на чувствительном элементе электрического напряжения экспоненциально увеличивается с уменьшением толщины слоя $L2$.

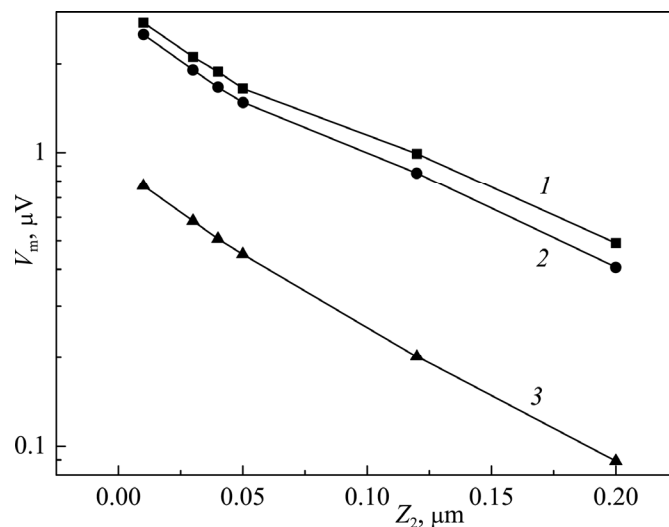


Рис.5. Зависимости параметра V_m от толщины слоя $L2$ для толщин термоэлектрического слоя $Z_3 = 0.1$ мкм (1), 0.05 мкм (2) и 0.01 мкм (3).

Максимальный сигнал $V_m = 2.76$ мкВ достигается при толщинах $Z_2 = 0.01$ мкм и $Z_3 = 0.1$ мкм.

Значения параметра t_b понижаются с уменьшением толщины слоя $L2$ для всех трех рассмотренных толщин термоэлектрического слоя CeV_6 . При одинаковых значениях Z_2 меньше для меньших толщин слоя CeV_6 (рис.6). Тут все логично – через препятствие меньшей толщины тепло, выделенное фотоном в

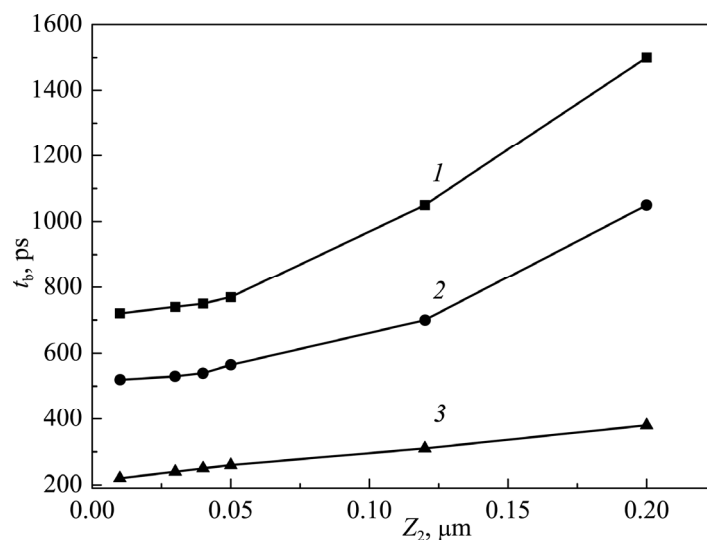


Рис.6. Зависимости параметра t_b от толщины слоя $L2$ для толщин термоэлектрического слоя $Z_3 = 0.1$ мкм (1), 0.05 мкм (2) и 0.01 мкм (3).

поглотителе, быстрее проходит в теплоотвод и подложку. Очевидно, что обратная параметру t_b величина, скорость счета, увеличивается с уменьшением толщин второго и третьего слоя чувствительного элемента. Максимальная скорость счета 4.55 ГГц достигается при $Z_2 = Z_3 = 0.01$ мкм.

3.2. Регистрация фотонов четырехслойным чувствительным элементом TSPD с W теплоотводом толщиной 0.1 мкм

Результаты компьютерного моделирования процессов распространения тепла в четырехслойном чувствительном элементе TSPD при $Z_1 = Z_4 = 0.1$ мкм представлены в табл. 3.

Варьируются толщины поглотителя Z_2 и термоэлектрического сенсора Z_3 . В каждой тройке расчетов с одинаковой толщиной Z_2 , как и в группе расчетов с номерами 1–18, уменьшение Z_3 приводит к уменьшению максимальных значений разности температур и электрического напряжения на сенсоре, времени

Табл.3. Характеристики четырехслойного чувствительного элемента TSPD при $Z_4 = 0.1$ мкм

Номер расчета	Z_2 , мкм	Z_3 , мкм	ΔT_m , 10^{-4} К	t_m , пс	V_m , мкВ	t_b , пс	R , ГГц
19	0.2	0.1	3.273	95.22	0.491	1670	0.6
20	0.2	0.05	2.73	83.55	0.4095	1150	0.87
21	0.2	0.01	0.606	62.4	0.0909	490	2.04
22	0.12	0.1	6.612	64.83	0.9918	1350	0.74
23	0.12	0.05	5.689	56.4	0.8534	1020	0.98
24	0.12	0.01	1.358	40.95	0.2037	413.4	2.42
25	0.05	0.1	11.029	40.2	1.6545	1130	0.88
26	0.05	0.05	9.898	34.95	1.4847	960	1.04
27	0.05	0.01	3.027	27.3	0.454	348.15	2.87
28	0.04	0.1	12.5	38	1.875	1100	0.91
29	0.04	0.05	11.0	33	1.65	950	1.05
30	0.04	0.01	3.391	23.91	0.5087	343	2.93
31	0.03	0.1	14.083	36	2.1125	1080	0.93
32	0.03	0.05	12.733	30.9	1.91	940	1.02
33	0.03	0.01	3.905	22.95	0.586	338.85	2.95
34	0.01	0.1	18.431	31.8	2.7647	1052	0.95
35	0.01	0.05	16.801	26.7	2.52	925	1.08
36	0.01	0.01	5.147	18.3	0.772	328.2	3.05

достижения максимального сигнала и спада сигнала до фонового значения. В это же время, с уменьшением Z_3 скорость счета увеличивается.

Сравнение зависимости параметров ΔT_m и t_b от толщины поглотителя Z_2 для толщины сенсора $Z_3 = 0.1$ мкм и двух значений $Z_4 = 1$ и 0.1 мкм представлено на рис.7. Параметр ΔT_m мало изменяется при изменении значений Z_4 в 10 раз, поэтому на рис.7 кривые этих двух групп расчетов практически накладываются. Однако кривые времени спада сигнала до фонового значения отличаются значительно. Большей толщине Z_4 соответствуют меньшие значения параметра t_b .

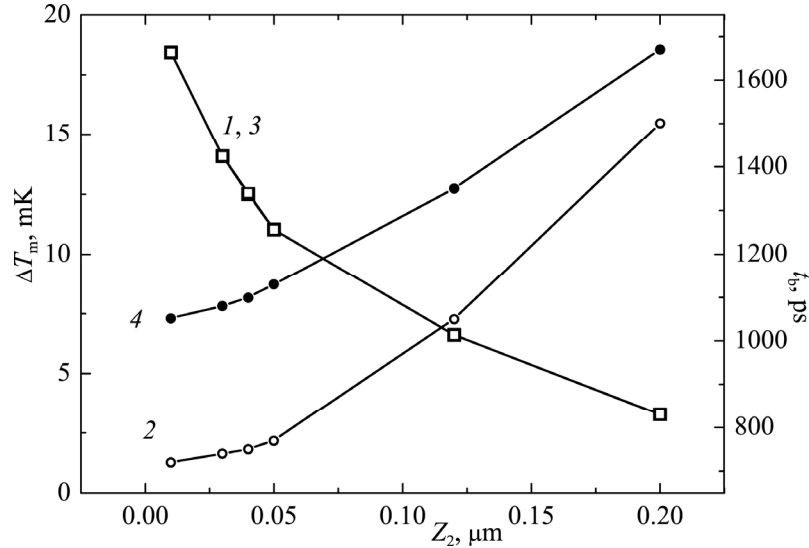


Рис.7. Зависимости параметров ΔT_m (1, 3) и t_b (2, 4) от толщины поглотителя Z_2 при толщине термоэлектрика $Z_3 = 0.1$ мкм: 1, 2 – $Z_4 = 1$ мкм, 3, 4 – $Z_4 = 0.1$ мкм.

Подытожим полученные результаты. Из данных таблиц видно, что определяющий максимальный сигнал параметр ΔT_m превосходит в десять и более раз фоновое значение 10^{-4} К в нескольких расчетах. Наибольшая разность температур на границах сенсора $\Delta T_m = 18.43 \times 10^{-4}$ К и соответствующее ей напряжение $V_m = 2.765$ мкВ достигается в расчетах с номерами 16 и 34 при толщинах Z_1 – Z_3 соответственно 0.1, 0.01 и 0.1 мкм для обоих рассмотренных значений $Z_4 = 1$ и 0.1 мкм. Скорость счета может превышать гигагерц по данным практически всех расчетов. Максимальная скорость счета 4.55 ГГц достигается при толщинах слоев чувствительного элемента Z_1 – Z_4 , соответственно, 0.1, 0.01, 0.01 и 1 мкм.

В данной работе исследовались процессы теплопереноса в четырехслойном чувствительном элементе TSPD, протекающие после поглощения фотонов с энергией 0.8 эВ в центре поверхности антиотражающего слоя LaB₆. При прочих равных условиях, в случае термализации фотона на некоторой глубине в антиотражающем слое или в поглотителе получим более высокие значения параметров

ΔT_m и V_m . Сделать такое предположение позволяют проведенные ранее исследования для трехслойного чувствительного элемента TSPD с вольфрамовым поглотителем [20]. Отметим, что вместо термоэлектрика CeB_6 в качестве материала сенсора в четырехслойном чувствительном элементе TSPD могут быть использованы $(\text{La,Ce})\text{B}_6$ [45] или FeSb_2 [34], а вместо вольфрамового поглотителя – другие металлы или сверхпроводники [35]. Имеются также широкие возможности изменения материала антиотражающего слоя. Очевидно, что для создания детектора с высокими характеристиками детектирования фотонов в определенной области электромагнитного спектра необходимо найти оптимальные решения и по подбору материалов, и конструкционных особенностей.

4. Заключение

Разработана модель четырехслойного чувствительного элемента TSPD, которая позволяет изучать протекающие в нем процессы распространения тепла. Методом компьютерного моделирования исследованы характеристики четырехслойного чувствительного элемента TSPD с вольфрамовым поглотителем и теплоотводом, антиотражающим слоем LaB_6 и сенсором CeB_6 . Полученные результаты показывают, что такой детектор может регистрировать одиночные фотоны с энергией 0.8 эВ, обеспечивать при этом гигагерцовую скорость счета и высокую системную эффективность детектирования. Можно утверждать, что четырехслойный чувствительный элемент TSPD, в силу большой конструкционной гибкости и возможности использования различных материалов, обладает значительным универсализмом для решения широкого круга задач однофотонного детектирования в диапазоне электромагнитного спектра от ИК до жесткого рентгена.

Авторы выражают благодарность А.М. Гуляну за интерес к работе и полезные обсуждения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного комитета по науке МОН РА в рамках научного проекта № 18T-2F134.

ЛИТЕРАТУРА

1. J.-C. Besse, S. Gasparinetti, M.C. Collodo, T. Walter, P. Kurpiers, M. Pechal, C. Eichler, A. Wallraff. *Phys. Rev. X*, **8**, 021003 (2018).
2. D. Bouwmeester. *Nature*, **429**, 139 (2004).
3. N. Gisin, G.G. Ribordy, W. Titel, H. Zbinden. *Reviews of Modern Physics*, **74**, 145 (2002).
4. P.A. Hiskett, D. Rosenberg, C.G. Peterson, R.J. Hughes, S. Nam, A.E. Lita, A.J. Miller, J.E. Nordholt. *New J. Phys.*, **8**, 193 (2006).
5. E.E. Wollman, V.B. Verma, A.D. Beyer, R.M. Briggs, B. Korzh, J.P. Allmaras, F. Marsili, A.E. Lita, R.P. Mirin, S.W. Nam, M.D. Shaw. *Optics Express*, **25**(22), 26792 (2017).

6. **T. Yamashita, S. Miki, H. Terai.** IEICE Trans. on Electronics, **E100-C**, 274 (2017).
7. **D. Rosenberg, A.E. Lita, A.J. Miller, S. Nam, R.E. Schwall.** IEEE Trans. Appl. Supercond., **15**, 575 (2005).
8. **D. Van Vechten, K. Wood, G. Fritz, J. Horwitz, A. Gyulamiryan, Ar. Kuzanyan, V. Vartanyan, A. Gulian.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, **A 444**, 42 (2000).
9. **A. Gulian, K. Wood, D. van Vechten, G. Fritzdet.** J. Mod. Opt., **51**, 1467 (2004).
10. **A. Gulian, 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, Ar. Kuzanyan, G. Badalyantz, S. Harutyunyan, S. Petrosyan, V. Vardanyan, T. Paronyan, V. Nikoghosyan.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, **A 520**, 36 (2004).
11. **G.G. Fritz, K.S. Wood, D. Van Vechten, A.L. Gyulamiryan, A.S. Kuzanyan, N.J. Giordano, T.M. Jacobs, H.-D. Wu, J.S. Horwits, A.M. Gulian.** Proc. SPIE, **4140**, 459 (2000).
12. **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, Ar. Kuzanyan, G. Badalyantz, S. Harutyunyan, S. Petrosyan, V. Vardanyan, T. Paronyan, V. Nikoghosyan, A. Gulian.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, **A 520**, 56 (2004).
13. **K.S. Wood, G.G. Fritz, A.M. Gulian, D. Van Vechten.** US Patent US 6,710,343 B2, 2004.
14. **Ar. Kuzanyan, As. Kuzanyan, V. Nikoghosyan.** Armenian Patent, no 2946, 2015.
15. **Ar. Kuzanyan, As. Kuzanyan, V. Nikoghosyan.** Armenian Patent, no 3220, 2018.
16. **A.A. Kuzanyan, A.S. Kuzanyan.** Proc. SPIE, **8773**, 87730L (2013).
17. **Ar. Kuzanyan, V. Nikoghosyan, As. Kuzanyan.** Sensors & Transducers, **191**, 57 (2015).
18. **A.A. Kuzanyan.** Nano Studies, **9**, 93 (2014).
19. **A.A. Kuzanyan, A.S. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan.** J. Phys. Conf. Ser., **673**, 012007 (2016).
20. **A.A. Kuzanyan, A.S. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, V.N. Gurin, M.P. Volkov.** J. Contemp. Phys. (Armenian Ac. Sci.), **51(2)**, 181 (2016).
21. **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.** Nat. Photon, **7**, 210 (2013).
22. **A.E. Lita, B. Calkins, L.A. Pellochoud, A.J. Miller, S. Nam.** Proc. of the 13th Int. Workshop LTD 13, CP1185, 351 (2009).
23. **A.E. Lita, B. Calkins, L.A. Pellochoud, A.J. Miller, S. Nam.** Proc. of SPIE, **7681**, 76810D (2010).
24. **R.E. Correa, E.A. Dauler, G.Nair, S.H. Pan, D.Rosenberg, A.J. Kerman, R.J. Molnar, X. Hu, F. Marsili, V. Anant, K.K. Berggren, M.G. Bawendi.** Nano Lett., **12**, 2953 (2012).
25. **W.J. Zhang, L.X. You, H. Li, J. Huang, C.L. Lv, L. Zhang, X.Y. Liu, J.J. Wu, Z. Wang, X.M. Xie.** Sci. China-Phys. Mech. Astron., **60**, 120314 (2017).
26. **I.E. Zadeh, J.W.N. Los, R.B.M. Gourgues, G. Bulgarini, S.M. Dobrovolskiy, V. Zwiller, S.N. Dorenbosz.** ArXiv:1801.06574v1 (2018).
27. **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).
28. **A.A. Kuzanyan, A.S. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan.** J. Contemp. Phys. (Armenian Ac. Sci.), **53(3)**, 242 (2018).
29. **A.S. Kuzanyan, A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan.** J. Contemp. Phys. (Armenian Ac. Sci.), **53(4)**, 338 (2018).

30. **H. Takeda, H. Kuno, K. Adachi.** J. Am. Ceram. Soc., **91**, 2897 (2008).
31. **E. Sani, L. Mercatelli, M. Meucci, L. Zoli, D. Sciti.** Scientific Reports, **7**: 718, 1 (2017).
32. **M.A. Ordal, R.J. Bell, R.W. Alexander, L.A. Newquist, M.R. Querry.** Appl. Opt., **27**, 1203 (1988).
33. **As. Kuzanyan, Ar. Kuzanyan, V. Nikoghosyan.** Sensors & Transducers, **207**, 21 (2016).
34. **Ar. Kuzanyan.** Sensors & Transducers, **217**, 28 (2017).
35. **A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan.** J. Contemp. Phys. (Armenian Ac. Sci.), **53(1)**, 73 (2018).
36. **M.A. Anisimov, V.V. Glushkov, A.V. Bogach, S.V. Demishev, N.A. Samarin, S.Yu. Gavrilkin, K.V. Mitsen, N.Yu. Shitsevalova, A.V. Levchenko, V.B. Filippov, S. Gabani, K. Flachbart, N.E. Sluchanko.** JETP, **116**, 760 (2013).
37. **P.A. Popov, V.V. Novikov, A.A. Sidorov, E.V. Maksimenko.** Inorg Mater, **43(11)**, 1187 (2007).
38. **Y. Peysson, C. Ayache, B. Salce, J. Rossat-Mignod, S. Kunii, T. Kasuya.** J. of Magnetism and Magnetic Materials, **47&48**, 63 (1985).
39. **Y. Peysson, C. Ayache, B. Salce.** J. Magnetism and Magnetic Materials, **59**, 33 (1986).
40. **V.A. Petrosyan.** J. Contemp. Phys. (Armenian Ac. Sci.), **46**, 125 (2011).
41. **T.R. Waite, R.S. Craig, W.E. Wallace.** Phys. Rev. Lett., **104(5)**, 1240 (1956).
42. Efundu Web Portal. http://www.efunda.com/materials/elements/TC_Table.cfm?Element_ID=W
43. **G.T. Furukawar, T.B. Douglasr, R.E. McCoske Yr, D.C. Ginnings.** J. Research National Bureau Stand., **57(2)**, 67 (1956).
44. A. Scheie. http://www.phys.ufl.edu/ireu/IREU2013/pdf_reports/Allen_Scheie_FinalReport.pdf
45. **A.A. Kuzanyan.** J. Contemp. Phys. (Armenian Ac. Sci.), **51**, 360 (2016).

FOUR-LAYER DETECTION PIXEL OF SINGLE-PHOTON THERMOELECTRIC DETECTOR

A.A. KUZANYAN, A.S. KUZANYAN, V.R. NIKOGHOSYAN

The processes of heat propagation in a four-layer detection pixel of thermoelectric single-photon detector after 0.8 eV energy photon absorption are investigated by the computer simulation method. Design of the detection pixel consisting of successive layers on a sapphire substrate of heat sink (W), thermoelectric sensor (CeB₆), absorber (W) and the antireflection layer (LaB₆) is proposed. Temporal dependences of signal intensity arising on the detection pixel, the values and the time to reach the maximum signal, the time of signal decreasing to the background value and the count rate of the detector for different thicknesses of the layers of the sensing element are determined. The computer modelling is carried out on the basis of the equation of heat propagation from the limited volume by the use of three-dimensional matrix method for differential equations. It is shown that the thermoelectric detector with a four-layer detection pixel has a system detection efficiency of 95%. It also provides gigahertz count rate. A detector with such characteristics can have applications in various fields of science and modern technologies.