

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА В ЧУВСТВИТЕЛЬНОМ ЭЛЕМЕНТЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОДНОФОТОННОГО ДЕТЕКТОРА С ПОГЛОТИТЕЛЕМ ИЗ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА

А.А. КУЗАНЯН^{1,2}, В.Р. НИКОГОСЯН¹, Н.Г. МАРГИАНИ³,
Г.А. МУМЛАДЗЕ³, С.Р. АРУТЮНЯН^{1,4}, А.С. КУЗАНЯН^{1,4*}

¹Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак, Армения

²Калифорнийский университет, Лос-Анджелес, Калифорния, США

³Институт Кибернетики Грузинского Технического Университета, Тбилиси, Грузия

⁴Российско–Армянский университет, Ереван, Армения

*e-mail: akuzanyan@yahoo.com

(Поступила в редакцию 26 октября 2021 г.)

Методом компьютерного моделирования исследованы процессы распространения тепла в пятислойном чувствительном элементе термоэлектрического однофотонного детектора после поглощения фотонов с энергией 0.8–1000 эВ. Предложена конструкция чувствительного элемента, состоящая из последовательно расположенных на сапфировой подложке слоев теплоотвода Bi2223, термоэлектрического сенсора CeB₆, поглотителя Bi2223 и антиотражающего слоя SiO₂. Компьютерное моделирование проводилось на основе уравнения распространения тепла из ограниченного объема с использованием трехмерного матричного метода для дифференциальных уравнений. Временная зависимость интенсивности сигнала рассчитана для различных толщин слоев чувствительного элемента. Показано, что чувствительный элемент SiO₂/Bi2223/CeB₆/Bi2223/Al₂O₃ с поверхностью 10×10 мкм² может регистрировать как одиночные фотоны в широкой спектральной области от ближнего ИК до рентгена, так и считать число одновременно поглощенных фотонов вплоть до восьми. Использование в конструкции чувствительного элемента высокотемпературного сверхпроводника Bi2223 обеспечивается гигагерцовая скорость счета и высокая системная эффективность детектирования. Простота конструкции чувствительного элемента служит предпосылкой для создания многоэлементных сенсоров. Детектор с такими характеристиками может являться представителем следующего поколения однофотонных детекторов в ближайшем будущем.

1. Введение

Однофотонные детекторы (SPD) востребованы в различных областях современной науки и техники [1,2]. Современные SPD сочетают в себе близкую к единице эффективность обнаружения в широком спектральном диапазоне, низкий

темновой счет и пикосекундное временное разрешение. На сегодняшний день лучшими характеристиками обладают сверхпроводящие нанопроволочные детекторы одиночных фотонов (SNSPD) [3]. Проблемы перспективных технологических разработок требуют вывода SPD на новый уровень, где будут возможны счет фотонов, формирование изображения и многоэлементная технология. SNSPD могут подсчитывать до 4 одновременно поглощенных фотонов [4]. В наших предыдущих работах мы показали, что термоэлектрические однофотонные детекторы (TSPD) могут регистрировать одиночные фотоны в широком диапазоне электромагнитного спектра от ИК до рентгеновского, обеспечивая разрешение по энергии не менее 1% и скорость счета более чем десятки ГГц [5]. В работе [6] показано, что при использовании трехслойных чувствительных элементов TSPD, в которых гексабориды $(\text{La,Ce})\text{B}_6$ или CeB_6 используются в качестве термоэлектрического слоя, а сверхпроводники Nb, Pb или YBCO служат в качестве поглотителя и теплоотвода, изменяя материалы и геометрию слоев чувствительного элемента, а также рабочую температуру, можно получить детектор для регистрации фотонов в заданном спектральном диапазоне с требуемым энергетическим разрешением и скоростью счета. Можно утверждать, что TSPD является одним из реальных конкурентов лучшим детекторам одиночных фотонов. Однако наиболее важной характеристикой однофотонных детекторов является эффективность детектирования, а именно, отношение количества зарегистрированных фотонов к количеству попавших в детектор. Чтобы повысить этот параметр, мы предлагаем пятислойный чувствительный элемент с антиотражающим слоем [7,8]. Может ли TSPD подсчитывать количество поглощенных фотонов и иметь высокую эффективность детектирования? В данной работе мы ответим на этот вопрос посредством моделирования процессов распространения тепла в пятислойном чувствительном элементе термоэлектрического детектора, содержащего высокотемпературный сверхпроводник.

2. Методика расчетов

Проведено моделирование процессов распространения тепла в пятислойном чувствительном элементе обозначенный как SBCBA и состоящий из последовательно расположенных на сапфировой подложке слоев $\text{SiO}_2/\text{Bi2223}/\text{CeB}_6/\text{Bi2223}/\text{Al}_2\text{O}_3$ с поверхностью $10 \times 10 \text{ мкм}^2$ и толщинами $Z_1/Z_2/Z_3/Z_4/\text{Al}_2\text{O}_3$. Верхний слой SiO_2 обеспечивает оптическую связь чувствительного элемента с регистрируемым излучением [9]. Он расположен на абсорбере из высокотемпературного сверхпроводника $\text{Bi}_{2-x}\text{Pb}_x\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y - \text{Bi2223}$, который в свою очередь находится на термоэлектрическом сенсоре из гексаборида церия CeB_6 . Под сенсором находится слой теплоотвода Bi2223 , расположенный на сапфировой подложке. Во всех расчетах толщина подложки принималась равной 1 мкм, а антиотражающего слоя Z_1 и теплоотвода $Z_4 - 0.1 \text{ мкм}$. Фотоны термализуются в центре поверхности абсорбера. Рассмотрены случаи поглощения фотонов с энергией 0.8 эВ (1550 нм, коротковолновый ИК), 0.95 эВ (1310 нм, ближний ИК),

1.1 эВ (1127 нм, ближний ИК), 1.25 эВ (992 нм, ближний ИК), 10 эВ (124 нм, экстремальный УФ), 100 эВ (12.4 нм, вакуумный УФ), 1кэВ (1.24 нм, мягкий рентген). Одновременное поглощение более одного фотона также обсуждается. Рабочая температура детектора 9 К. При этой температуре термоэлектрик CeB_6 имеет высокий коэффициент Зеебека чем, в соответствии с формулой $V = S\Delta T$ (V – возникающее на чувствительном элементе электрическое напряжение, S – коэффициент Зеебека CeB_6 , ΔT – разность температур на границах сенсора после поглощения фотона), обеспечивается высокий уровень сигнала детектора.

Моделирование процессов распространения тепла в пятислойном чувствительном элементе TSPD проводилось на основе уравнения распространения тепла из ограниченного объема с использованием трехмерного матричного метода для дифференциальных уравнений. В таблице 1 представлены физические параметры материалов чувствительного элемента. Метод компьютерного моделирования, подробности которого описаны в работе [8], позволяет получить временную зависимость изменения температуры в любой области чувствительного элемента после момента поглощения фотона в абсорбере и определить следующие параметры: максимальную температуру T_m , максимальное изменение температуры $\Delta T_m = T_m - 9 \text{ К}$, время достижения максимума t_m , возникающее на сенсоре максимальное электрическое напряжение V_m , время спада сигнала до уровня фона t_b , отличающегося от рабочей температуры на 0.1 мК, обратная ей величина $R = 1/t_b$ – скорость счета детектора.

Табл.1. Параметры использованных материалов при 9К

Параметры	Материал			
	SiO_2	Bi2223	Al_2O_3	CeB_6
Плотность, кг/м^3	2650	6313 [12]	4000	4800
Удельная теплоемкость, Дж/(кг К)	1.4 [10]	0.1 [13]	0.0588 [15]	7.3 [17]
Теплопроводность, Вт/(м К)	0.1 [11]	0.4 [14]	300 [16]	1.5 [18]
Коэффициент Зеебека, мкВ/К				150 [19]

На рис.1 схематически представлены границы между слоями чувствительного элемента и области, в которых мы исследуем изменение температуры после поглощения фотона. Это область термализации фотона, где образуется горячее пятно (T_{hs}), область непосредственно под горячим пятном (T_0) и 10 областей с шагом 0.1 мкм от центра (T_1), (T_2), ..., (T_{10}) на границе поглотитель–сенсор (AS), области на границе сенсор–теплоотвод (SH) непосредственно под горячим пятном (T_{11}) и с шагом 2 мкм от центра этой границы (T_{12}) и (T_{13}), а также на границе теплоотвод подложка (HS) непосредственно под горячим пятном (T_{14}).

Были проведены три группы расчетов (по четыре расчета в каждой) для случаев поглощения фотонов с энергией 0.8 эВ при изменении в каждой группе толщины сенсора ($Z_3 - 1, 0.5, 0.1$ и 0.05 мкм). Остальные толщины слоев в каждой группе одинаковы. Причем в первой группе толщина поглотителя составляла 0.2 мкм, во второй группе $Z_2 = 0.1 \text{ мкм}$, в третьей $Z_2 = 0.05 \text{ мкм}$.

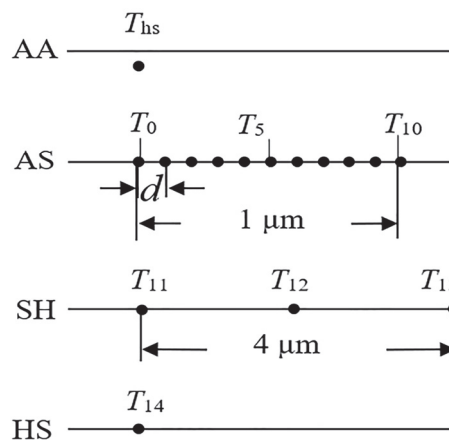


Рис.1. Границы слоев чувствительного элемента: AA – антиотражающий слой–абсорбер, AS – абсорбер– сенсор, SH – сенсор–теплоотвод, HS – теплоотвод–подложка. Точки обозначают области, в которых рассматривается изменение температуры, d – расстояние от центра границы AS.

Далее сделаны расчеты для случаев поглощения фотонов с энергией от 0.8 эВ до 1 кэВ в чувствительном элементе с одинаковой толщиной слоев. Последняя группа расчетов проводилась для выяснения особенностей распространения тепла в чувствительном элементе SBCBA после одновременного поглощения от 2 до 8 фотонов с одинаковой энергией.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Поглощение одного фотона

Как изменяется со временем температура в различных областях границы AS в чувствительном элементе SBCBA с $Z_2 = Z_3 = 0.05$ мкм после поглощения фотона с энергией 0.8 эВ представлено на рис.2. Видно, что по мере увеличения расстояния d , т.е. удаления от центра границы, максимум зависимости $T(t)$ быстро уменьшается. Тепло, выделенное при поглощении фотона с энергией 0.8 эВ, не распространяется на большие расстояния в чувствительном элементе.

Расчеты также показывают, что превышает значение фона только температура T_{11} (в середине границы SH). Для данных толщин слоев чувствительного элемента температура T_{11} достигает максимума 9.00083 К за время порядка 18 пс и далее монотонно уменьшается, а изменения температур T_{12} , T_{13} и T_{14} остаются ниже фонового значения в течении всего времени рассеяния тепла из горячего пятна. Следовательно, сигнал термоэлектрического детектора в рассмотренных случаях определяется температурой на границе поглотитель–сенсор, что мы и будем учитывать в дальнейшем.

Закономерность понижения максимальной температуры с удалением от центра границы AS в случае поглощения одного фотона с энергией 0.8 эВ выполняется для всех проведенных 12 расчетов с различными значениями толщин Z_2 и

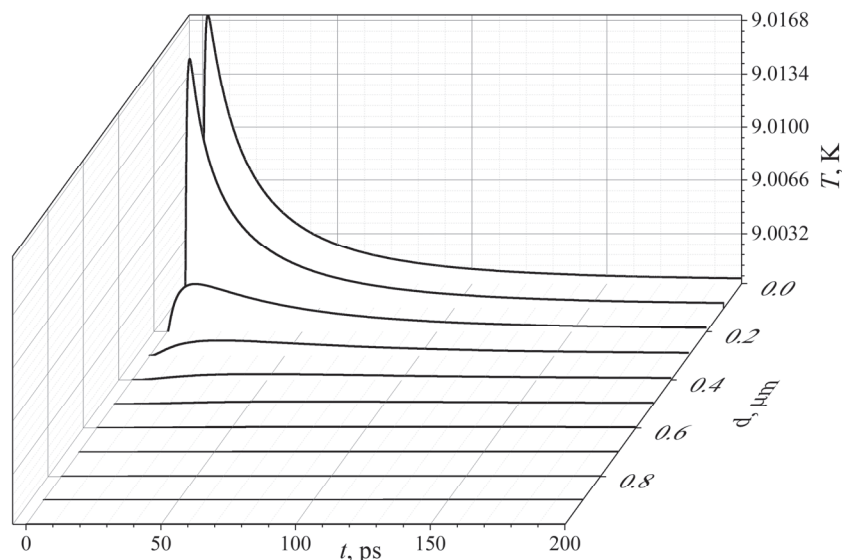


Рис.2. Временные зависимости температуры в различных областях границы AS после поглощения одного фотона с энергией 0.8 эВ.

Z_3 . Закономерностью также является возрастание времени достижения максимума температуры с удалением от центра границы. На рис.3 приведены зависимости параметров ΔT_m и R от толщины сенсора Z_3 для трех значений толщины поглотителя Z_2 . Параметр ΔT_m остается постоянным в каждой группе из 4 расчетов, то есть не зависит от толщины сенсора Z_3 . Для толщин поглотителя 0.2, 0.1 и 0.05 мкм параметр ΔT_m достигает значений 2.17, 7.46 и 17.14 мК, соответственно, в результате чего на сенсоре возникают напряжения 0.33, 1.12 и 2.57 мкВ. Эти значения не высоки, и для уверенной регистрации сигнала необходимо будет их усиливать с помощью низкотемпературной электроники.

Зависимости скорости счета детектора от толщин Z_2 и Z_3 представлены на этом же рисунке. Можно видеть, что с уменьшением толщины Z_3 и увеличением

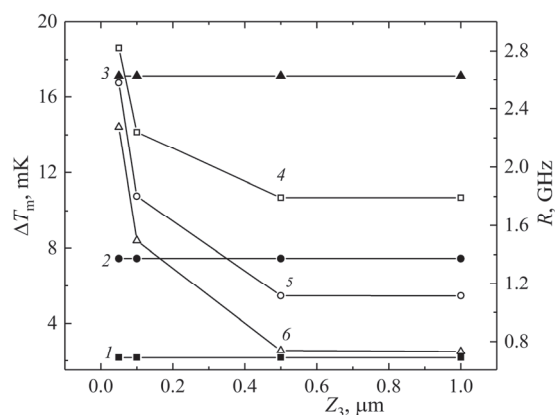


Рис.3. Зависимость параметров ΔT_m (1, 2, 3) и R (4, 5, 6) от толщины сенсора Z_3 . Толщинам поглотителя Z_2 – 0.2, 0.1 и 0.05 мкм соответствуют кривые 1 и 4, 2 и 5, 3 и 6.

Z_2 параметр R увеличивается от 0.73 ГГц до 2.82 ГГц. Может показаться странным, что увеличение толщины поглотителя приводит к более быстрому спаду температуры чувствительного элемента до фонового значения. Это можно понять, сравнивая теплоемкости поглотителя и сенсора в таблице. Теплоемкость Bi2223 при 9 К почти на два порядка меньше, чем у термоэлектрика CeV_6 .

3.2. Поглощение фотонов с различной энергией

Рассмотрим процессы распространения тепла, выделенного при поглощении фотонов с различной энергией в чувствительном элементе с толщинами слоев $Z_1 = Z_4 = 0.1$ мкм, $Z_2 = Z_3 = 0.05$ мкм. Закономерности распространения тепла, описанные выше для фотонов с энергией 0.8 эВ, распространяются также на случаи поглощения фотонов с большей энергией. С увеличением энергии поглощенного фотона возрастают все параметры кроме скорости счета. В области энергий 0.8–1.25 эВ изменение всех параметров происходит практически линейно (рис.4а). В этой области энергий на чувствительном элементе возникает электрическое напряжение порядка нескольких микровольт, а скорость счета изменяется в пределах от 1.8 ГГц до 2.3 ГГц. Расчеты показывают, что при использованных значениях толщин слоев чувствительного элемента можно регистрировать фотоны с энергией 1 кэВ. При этом сигнал будет больше 300 мкВ (рис.4б). Такой сигнал можно регистрировать без предварительного усиления.

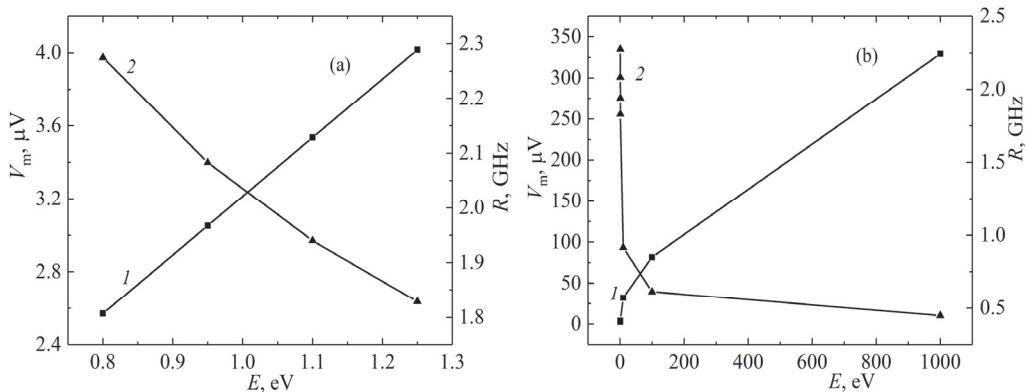


Рис.4. Зависимость параметров V_m (1) и R (2) от энергии фотона: E изменяется в пределах (а) 0.8–1.25 эВ и (б) 0.8–1000 эВ.

3.3. Одновременное поглощение более одного фотона

Здесь приведены данные моделирования процессов распространения тепла в чувствительном элементе SBCBA при одновременном поглощении нескольких фотонов. Рассмотрим одновременное поглощение от 2 до 8 фотонов с энергией 0.95 эВ в чувствительном элементе с толщинами $Z_1 = Z_4 = 0.1$ мкм и $Z_2 = Z_3 = 0.05$ мкм. Один фотон попадает в центр поверхности поглотителя, другие – на расстоянии d от него.

Зависимости параметров ΔT_m , t_m и t_b от расстояния до центра границы AS

при поглощении двух фотонов на расстоянии 0.3 мкм друг от друга представлены на рис.5а. Параметр ΔT_m незначительно больше в области между зонами термализации двух фотонов по сравнению со случаем поглощения одного фотона. Параметры t_m и t_b ведут себя так же, как и при поглощении одного фотона – с увеличением расстояния d время достижения максимума t_m увеличивается, а время спада сигнала до уровня фона t_b уменьшается. Если два фотона термализуются на расстоянии 0.7 мкм (рис.5б), параметр ΔT_m имеет такое же значение, как и в случае поглощения одного фотона. Время t_m достигает минимальных значений непосредственно под областями термализации фотонов. Параметр t_b , при различных значениях расстояния d варьируется в небольших пределах, а его максимальное значение больше, чем в случае поглощения одного фотона.

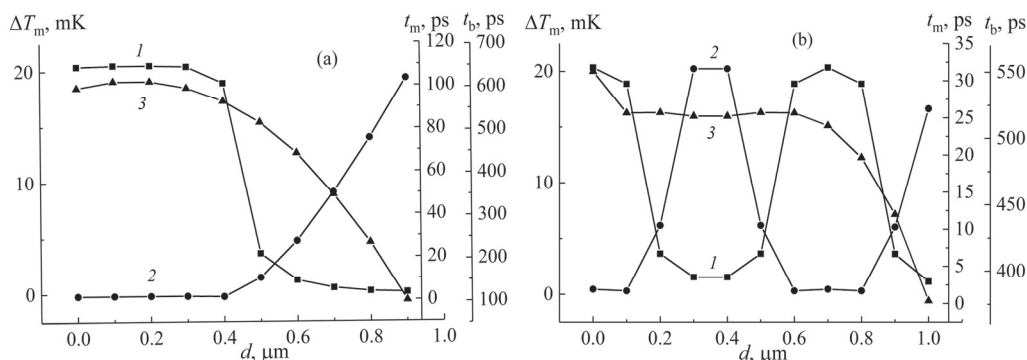


Рис.5. Зависимость параметров ΔT_m (1), t_m (2) и t_b (3) от расстояния d на границе AS при поглощении двух фотонов на расстоянии 0.3 мкм (а) и 0.7 мкм (б) друг от друга.

На рис.6 представлены зависимости параметров ΔT_m и t_b от числа поглощенных фотонов, когда N меняется в пределах 1–8. Наглядно видно, что ΔT_m практически одинаков, в случаях, когда поглощаются 1–4, а также 6 и 8 фотонов. Однако параметр t_b монотонно увеличивается с увеличением N и может быть использован для определения числа поглощенных фотонов. Как мы отметили во введении,

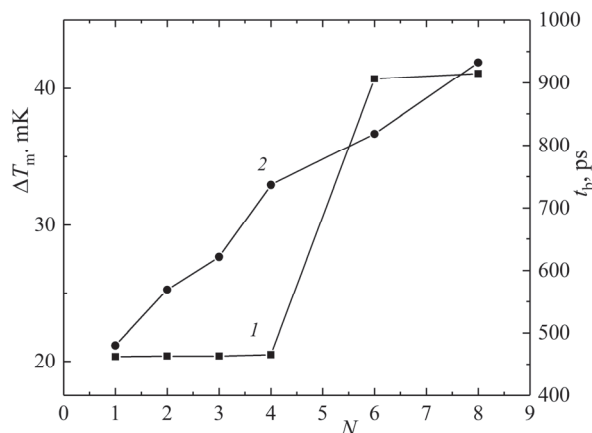


Рис.6. Зависимость параметров ΔT_m (1) и t_b (2) от числа поглощенных фотонов.

сверхпроводящие нанопроволочные детекторы могут регистрировать до 4 одновременно поглощенных фотонов [4]. Есть другие типы детекторов, которые могут считать количество поглощенных фотонов [20–27], однако они не лишены недостатков [28]. Мы показали, что TSPD с чувствительным элементом SBCBA может считать фотоны и обладать высокой скоростью счета. Теперь обоснуем, что TSPD может также обладать высокой системной эффективностью детектирования.

3.4. Системная эффективность

Системная эффективность однофотонных детекторов зависит от трех факторов: эффективности оптической связи фотонов и чувствительного элемента, эффективности поглощения фотонов и эффективности регистрации уже поглощенного фотона. В телекоммуникационных системах низкая эффективность обнаружения недопустима, поэтому многие исследовательские группы рассматривают задачу повышения эффективности ИК-детекторов [29]. В некоторых конструкциях SNSPD в качестве материала антиотражающего слоя используется SiO_2 , что обеспечивает оптическую связь с эффективностью, близкой к 100% [30]. Такую же эффективность оптической связи можно получить, используя антиотражающий слой SiO_2 в конструкции чувствительного элемента TSPD, и мы включили такой слой в конструкцию чувствительного элемента SBCBA. Антиотражающий слой SiO_2 не оказывает значительного воздействия на процессы распространения тепла, но уменьшает отражение в многослойных структурах, что мы экспериментально показали в работе [31].

Эффективное поглощение фотонов различной энергии обеспечивается подбором соответствующей толщины поглотителя. Анализ данных оптического поглощения Bi_2Te_3 [32] показывает, что тонкие слои этого материала способны с высокой эффективностью поглощать излучение в широком спектральном диапазоне.

Эффективная регистрация уже поглощенного фотона определяется отношением сигнала к шуму. Мы рассмотрим здесь тепловой шум, который возникает в любом проводнике электрического тока, обладающем активным сопротивлением, и связан с хаотичным движением подвижных носителей заряда. Средний квадрат напряжения теплового шума зависит только от активного сопротивления проводника R , его абсолютной температуры T и может быть рассчитан по формуле Найквиста $\langle V_t^2 \rangle = 4kTR\Delta f$, где k – постоянная Больцмана, Δf – полоса частот, в которых проводятся измерения [33].

Очевидно, что уменьшить напряжение теплового шума можно понизив рабочую температуру детектора и уменьшив сопротивление чувствительного элемента. Именно поэтому в конструкции чувствительного элемента SBCBA присутствует слой из низкотемпературного термоэлектрика CeV_6 и два слоя Bi_2Te_3 – поглотитель и термоотвод, которые одновременно являются контактами для регистрации возникающего на термоэлектрическом слое термо-ЭДС. Сопротивление чувствительного элемента можно представить как последовательное

соединение сопротивления трех слоев: поглотителя, сенсора и теплоотвода. Рабочая температура детектора 9 К намного ниже критической температуры Bi2223 ~110 К [34]. Следовательно, сопротивление чувствительного элемента определяется сопротивлением только термоэлектрического слоя. Удельное сопротивление CeB_6 при 9 К равно 50 мкОм см [35]. При полосе частот измерений $\Delta f = 100$ МГц получим $V_t = 4.98 \times 10^{-9}$ В ≈ 5 нВ, что много меньше сигнала, возникающего при поглощении фотона даже с минимальной рассмотренной в данной работе энергией.

Подсчет среднеквадратичной флуктуации температуры в абсорбере из-за теплообмена с термостатом в соответствии с термодинамической формулой $\langle \delta T^2 \rangle = kT^2/C$, где C теплоемкость абсорбера Bi2223 с размерами $10 \text{ мкм} \times 10 \text{ мкм} \times 0.1 \text{ мкм}$, показывает, что она не превышает принятый в данной работе уровень фона 0.1 мК.

Суммируя приведенные в этом параграфе доводы, можно утверждать, что чувствительный элемент SBCBA термоэлектрического детектора способен обеспечить высокую системную эффективность детектирования в широкой области электромагнитного спектра.

4. Заключение

Закономерности распространения тепла в пятислойном чувствительном элементе SBCBA термоэлектрического детектора в основном такие же, как полученные ранее результаты по поглощению фотонов в чувствительных элементах с поглотителем из вольфрама и сенсором из гексаборида церия [7,8]. Преимуществом рассмотренного в данной работе чувствительного элемента является то, что сверхпроводящие поглотитель и теплоотвод обеспечивают меньшие шумы. Детектор с таким чувствительным элементом может с более высокой системной эффективностью регистрировать фотоны и определять число поглощенных фотонов в широкой области электромагнитного спектра.

Для создания многоэлементных сенсоров необходимо будет разработать технологию получения большеразмерных гетероструктур, содержащих многокомпонентный сверхпроводник Bi2223. Решение этой задачи возможно и наиболее просто осуществимо методом импульсного лазерного напыления. Нами предложены простые решения получения большеразмерных пленок многокомпонентных соединений [36]. Суммируя приведенные данные, можно заключить, что термоэлектрический детектор с SBCBA чувствительным элементом является подходящим кандидатом для создания однофотонных детекторов нового поколения.

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

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по науке РА в рамках научного проекта №21T-1C088 «Разработка сенсора термоэлектрического детектора ультрафиолетового излучения с учетом тепловых шумов» и Национального Научного Фонда Грузии им. Шота Руставели в рамках проекта DI-18-479/Development of advanced bismuth-based superconducting materials via doping and high-energy ball-milling.

ЛИТЕРАТУРА

1. C.J. Chunnillall, I.P. Degiovanni, S. Kück, I. Müller, A.G. Sinclair. Optical Engineering, **53**(8), 081910 (2014).
2. R.H. Hadfield. Nature Photonics, **3**, 696 (2009).
3. I.E. Zadeh, J. Chang, J.W.N. Los, S. Gyger, A.W. Elshaari, S. Steinhauer, S.N. Dorenbos, V. Zwiller. Appl. Phys. Lett., **118**, 190502 (2021).
4. D. Zhu, Q-Y. Zhao, H. Choi, T-J. Lu, A.E. Dane, D. Englund, K.K. Berggren. Nat. Nanotechnol., **13**, 596 (2018).
5. D. van Vechten, K. Wood, G. Fritz, J. Horwitz, A. Gyulamiryan, A. Kuzanyan, V. Vartanyan, A. Gulian. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., **444**, 42 (2000).
6. A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan. J. Contemp. Phys., **53**, 73 (2018).
7. A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan. IEEE Sens., J., **20**(6), 3040 (2019).
8. A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan. IEEE Sens., J., **20**(21), 12776 (2020).
9. M. Li, H. Shen, L. Zhuang, D. Chen, X. Liang. Int. J. Photoenergy., **2014**, 670438 (2014).
10. G. Carini Jr., G. Carini, D. Cosio, G. D'Angelo, F. Rossi. Philos. Mag., **96**(7-9), 761 (2016).
11. M. Asheghi et al., <https://nanoheat.stanford.edu/sites/default/files/publications/A33.pdf>.
12. X. Yang, T.K. Chaki. Supercond. Sci. Technol., **6**, 343 (1993).
13. R.A. Fisher, S. Kim, S.E. Lacy, N.E. Philips, D.E. Morris, A.G. Markelz, J.Y.T. Wei, D.S. Ginley. Phys. Rev. B, **38** (16), 11942 (1988).
14. M. Ikebe, H. Fujishiro, T. Naito, K. Noto. J. Phys. Soc. Jpn., **63**, 3107 (1994).
15. G.T. Furukawar, T.B. Douglasr, R.E. McCoskeyr, D.C. Ginnings, J. Res. Nat. Bur. Stand., **57**, 67 (1956).
16. A. Scheie. http://www.phys.ufl.edu/ireu/IREU2013/pdf_reports/Allen_Scheie_FinalReport.pdf.
17. Y. Peysson, C. Ayache, B. Salce, J. Rossat-Mignod, S. Kunii, T. Kasuya. J. Magn. Magn. Mater., **47**, 63 (1985).
18. Y. Peysson, C. Ayache, B. Salce. J. Magn. Magn. Mater., **59**, 33 (1986).
19. V. Petrosyan. J. Contemp. Phys., **46**, 125 (2011).
20. J. Kim, S. Takeuchi, Y. Yamamoto, H.H. Hogue. Appl. Phys. Lett., **74**, 902 (1999).
21. B. Cabrera, R.M. Clarke, P. Colling, A.J. Miller, S. Nam, R.W. Romani. Appl. Phys. Lett., **73**, 735 (1998).
22. A. Peacock, P. Verhoeve, N. Rando, A. van Dordrecht, B.G. Taylor, C. Erd, M.A.C. Perryman, R. Venn, J. Howlett, D.J. Goldie, J. Lumley, M. Wallis. Nature, **381**, 135 (1996).
23. T. Yamashita, S. Miki, H. Terai. IEICE Trans. Electron., **E100-C**, 274 (2017).
24. P. Kok, S.L. Braunstein. Phys. Rev. A, **63**, 033812 (2001).
25. L.A. Jiang, E.A. Dauler, J.T. Chang. Phys. Rev. A, **75**, 062325 (2007).
26. M.J. Fitch, B.C. Jacobs, T.B. Pittman, J.D. Franson. Phys. Rev. A, **68**, 043814 (2003).
27. D. Achilles, C. Silberhorn, C. Sliwa, K. Banaszek, I.A. Walmsley. Opt. Lett., **28**, 2387 (2003).
28. E.A. Dauler, A.J. Kerman, B.S. Robinson, J.K.W. Yang, B. Voronov, G. Goltsman, S.A. Hamilton, K.K. Berggren. J. Mod. Opt., **56**(2-3), 364 (2009).
29. 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).

30. **M. Caloz, M. Perrenoud, C. Autebert, B. Korzh, M. Weiss, C. Schönenberger, R.J. Warburton, H. Zbinden, F. Bussi res.** Appl. Phys. Lett., **112**, 061103 (2018).
31. **A.A. Kuzanyan, S.I. Petrosyan, A.S. Kuzanyan, G.R. Badalyan.** J. Contemp. Phys., **55**(4), 365 (2020).
32. **L. Grigoryan, K. Yakushi, C.-J. Liu, S. Takano, M. Wakata, H. Yamauchi.** Physica C, **218**, 153 (1993).
33. **H. Nyquist.** Physical Review, **32**, 110 (1928).
34. **H. Maeda, Y. Tanaka, M. Fukutomi, T. Asano.** Jpn. J. Appl. Phys., **27**, L209 (1988).
35. **A.S. Kuzanyan, S.R. Harutyunyan, V.O. Vardanyan, G.R. Badalyan,** J. Solid State Chem., **179**(9), 2862 (2006).
36. **A.S. Kuzanyan, G.R. Badalyan, V.R. Nikoghosyan, A.L. Gyulamiryan.** IEEE Trans. Appl. Supercond., **11** (1), 3852 (2001).

MODELING OF HEAT PROPAGATION PROCESSES IN DETECTION PIXEL OF THERMOELECTRIC SINGLE-PHOTON DETECTOR WITH HIGH- TEMPERATURE SUPERCONDUCTING ABSORBER

A.A. KUZANYAN, V.R. NIKOGHOSYAN, N.G. MARGIANI,
G.A. MUMLADZE, S.R. HARUTYUNYAN, A.S. KUZANYAN

The processes of heat propagation in five-layer detection pixels of the thermoelectric single-photon detector after absorption of 0.8–1000 eV energy photons are investigated by the method of computer simulation. Design of the detection pixel consisting of successive layers on a sapphire substrate of heat sink Bi2223, thermoelectric sensor CeB6, absorber Bi2223, and the antireflection layer SiO₂ is proposed. The computer modelling was carried out based on the equation of heat propagation from the limited volume by the use of the three-dimensional matrix method for differential equations. Temporal dependences of the signal intensity for different thicknesses of the layers of the detection pixel are determined. It is shown that the detection pixel SiO₂/Bi2223/CeB₆/Bi2223/Al₂O₃ can register single photons in a wide spectral range from near-IR to X-ray, as well as count the number of simultaneously absorbed photons up to eight. The use of Bi2223 high-temperature superconductor in the design of the detection pixel provides a gigahertz count rate and high systemus detection efficiency. The simple design of the detection pixel is a prerequisite for the creation of multi-pixel sensors. A detector with such characteristics could be representative of the next generation single-photon detectors in the near future.