

УДК 536.2

ТРЕХСЛОЙНЫЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ОДНОФОТОННОГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ГЕКСАБОРИДОВ

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

Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак, Армения

*e-mail: akuzanyan@yahoo.com

(Поступила в редакцию 23 июля 2018 г.)

Представлены результаты компьютерного моделирования процессов распространения тепла в трехслойном чувствительном элементе однофотонного термоэлектрического детектора после поглощения фотонов с энергией 0.5–4.13 эВ. Рассмотрены различные геометрии чувствительного элемента, состоящего из редкоземельных гексаборидов. В качестве материала поглотителя выбран гексаборид лантана (LaB_6), термоэлектрического сенсора – гексабориды церия (CeB_6) и лантана–церия ($\text{La}_{0.99}\text{Ce}_{0.01}\text{B}_6$). Решается задача достижения высокой системной эффективности термоэлектрического детектора при детектировании фотонов в области длин волн от УФ до ближнего ИК диапазона. Компьютерное моделирование проводилось на основе уравнения распространения тепла из ограниченного объема с использованием трехмерного матричного метода для дифференциальных уравнений. Показано, что термоэлектрический детектор с трехслойным чувствительным элементом, изготовленным только из гексаборидов, будет иметь гигагерцовую скорость счета, высокое энергетическое разрешение и превышающую 90% эффективность детектирования. Учитывая преимущества трехслойного чувствительного элемента по сравнению с однослойным, можно утверждать, что для решения ряда задач однофотонного детектирования трехслойный чувствительный элемент термоэлектрического детектора имеет большие перспективы.

1. Введение

Данная работа является органичным продолжением нашей предыдущей работы [1], в которой рассмотрена возможность создания однофотонного термоэлектрического детектора (TSPD) с однослойным чувствительным элементом на основе редкоземельных гексаборидов. Однофотонные детекторы ИК диапазона с высоким энергетическим разрешением, высокой системной эффективностью детектирования и гигагерцовой скоростью счета востребованы в современных задачах телекоммуникационных технологий, квантовых компьютеров и

квантовой криптографии. Детекторы УФ и рентгеновского диапазонов используются в астрофизике, физике высоких энергий, спектроскопии, метрологии, медицинском приборостроении и других областях науки и техники. На данном этапе развития однофотонного детектирования наиболее высокими характеристиками обладают сверхпроводящие нанопроволочные детекторы [2, 3]. Конкуренцию им могут составить TSPD [4, 5], которые обладают рядом преимуществ. Основными преимуществами TSPD по сравнению с другими типами детекторов являются простая конструкция и отсутствие жестких требований к рабочей температуре [6, 7]. Компьютерное моделирование процессов распределения тепла в однослойном чувствительном элементе TSPD с вольфрамовым (W) поглотителем показало, что при использовании в качестве термоэлектрического сенсора гексаборидов церия (CeB_6) и лантана–церия ($\text{La}_{0.99}\text{Ce}_{0.01}\text{B}_6$) подбором оптимальной геометрии поглотителя и сенсора можно добиться высокого энергетического разрешения и высокой скорости счета [8, 9] при регистрации фотонов в широкой области электромагнитного спектра от ИК до рентгеновского диапазона. Детальные исследования показали, что в случае однослойного чувствительного элемента TSPD временная зависимость сигнала имеет разную форму при поглощении фотона в различных областях поглотителя [8–11]. Данное обстоятельство усложняет определение энергии детектируемого фотона. Следующим этапом стала реализация идеи трехслойного чувствительного элемента TSPD [12], которая обеспечит независимость формы сигнала от расположения области термализации фотона в поглотителе [13]. Была предложена новая конструкция чувствительного элемента TSPD со сверхпроводящим поглотителем и теплоотводом [14], которая позволяет еще более повысить такие характеристики детектора, как энергетическое разрешение и скорость счета.

Одной из важнейших характеристик однофотонных детекторов является эффективность детектирования (η), которая по определению равна отношению числа попавших в детектор фотонов к числу им зарегистрированных и может быть представлена как произведение трех составляющих $\eta = \eta_o \times \eta_a \times \eta_i$, где η_o – эффективность оптической связи фотонов и чувствительного элемента, η_a – эффективность поглощения фотонов в поглотителе и η_i – внутренняя эффективность детектирования или вероятность регистрации уже поглощенного фотона [15]. В некоторых областях, например в астрофизике, эффективность детектирования не самый важный параметр, а в телекоммуникационных системах малая эффективность детектирования недопустима. Именно поэтому в ряде работ рассматривается задача повышения эффективности однофотонных детекторов различной конструкции. В работе [16] показана возможность создания сенсора на сверхпроводящем переходе с эффективностью детектирования более 95%, где используется сенсор из тонкой пленки гафния и конструкция оптимизируется для

регистрации фотонов с длиной волны 850 нм. В работе [17] сообщается о возможности создания сенсора с эффективностью детектирования более 99%. Сенсор на сверхпроводящем W с квантовой эффективностью детектирования более 82% для регистрации фотонов с длиной волны 1550 нм представлен в работе [18].

Системная эффективность сверхпроводящих нанопроволочных однофотонных детекторов, имеющих на сегодняшний день наиболее высокие характеристики, для длины волны 1550 нм лимитировалась на уровне 36% [19], но позже были предложены конструкции сенсоров с системной эффективностью, превосходящей 90% [15, 20–22]. В настоящей работе рассматривается возможность создания TSPD с высокой системной эффективностью детектирования в области длин волн от УФ до ближнего ИК диапазона. Методом компьютерного моделирования процессов распространения тепла исследуются характеристики TSPD с трехслойным чувствительным элементом, состоящим только из гексаборидов LaB_6 , CeB_6 и $(\text{La}, \text{Ce})\text{B}_6$.

2. Выбор материала поглотителя и методика расчетов

Высокое значение η_i для TSPD обеспечивается подбором материала термоэлектрического сенсора и выбором архитектуры чувствительного элемента, что позволяет получать сигнал, более чем на порядок превосходящий значение фона, и уверенно фиксировать факт попадания фотона в детектор и определять его энергию. Как показано в работах [23, 24], поглотитель из W при соответствующем выборе толщины может обеспечить близкое к 1 значение эффективности поглощения фотонов в поглотителе для фотонов от ИК до жесткого рентгеновского диапазона. В то же время из-за высокого коэффициента отражения (~80%) W не может обеспечить высокую эффективность оптической связи фотонов и чувствительного элемента в ближней ИК области [25, 26]. Излучение в области длин волн 1310–1550 нм (0.8–0.95 эВ) используется в телекоммуникационных системах [27, 28], поэтому нужен материал поглотителя чувствительного элемента TSPD, который обеспечил бы высокую эффективность оптической связи в указанном диапазоне. Таким материалом является гексаборид лантана [1]. Монокристаллические и пленочные образцы LaB_6 имеют в области 1300–1600 нм коэффициент отражения порядка 80 и 60%, соответственно [29, 30], в пленочных образцах он уменьшается до ~20% после отжига в вакууме [30]. Более низкий коэффициент отражения (~5%) в ближнем ИК диапазоне имеют содержащие наночастицы LaB_6 покрытия [31], которые являются хорошими поглотителями в ближнем ИК диапазоне и используются в фильтрах солнечного излучения [32]. Именно LaB_6 рассмотрен нами в качестве поглотителя трехслойного чувствительного элемента TSPD, что по сравнению с поглотителем из W увеличит системную эффективность детектирования на длине волны 1550 нм в 16 раз.

Следующее преимущество использования LaB_6 в качестве поглотителя чувствительного элемента TSPD определяется его кристаллическим строением. Гексабориды LaB_6 , $(\text{La}_{0.99}\text{Ce}_{0.01})\text{B}_6$ и CeB_6 имеют одинаковую кристаллическую решетку с очень близкими параметрами элементарной ячейки (для LaB_6 и CeB_6 они соответственно равны 4.156 и 4.14 Å), т. е. разница между ними не превышает 0.5% [33], что является необходимым условием для приготовления многослойных пленочных структур с высокими физическими свойствами и хорошими механическими характеристиками.

Как было показано ранее [34], использование в чувствительном элементе TSPD сверхпроводящих поглотителей и теплоотводов позволяет значительно увеличить скорость счета детектора. Третьим преимуществом предлагаемой конструкции является то, что LaB_6 становится сверхпроводником при температурах ниже 0.45 K [35] и в паре с термоэлектриком $(\text{La}_{0.99}\text{Ce}_{0.01})\text{B}_6$ может служить и поглотителем и сверхпроводящим контактом.

Трехслойная конструкция чувствительного элемента TSPD была предложена в работе [12]. Трехслойный чувствительный элемент, как и однослойный [36, 37], состоит из трех частей: поглотителя, теплоотвода и соединяющего их слоя термоэлектрика. Трехслойный чувствительный элемент, как и однослойный, имеет очень простую конструкцию и принцип работы. Фотон отдает свою энергию поглотителю и повышает его температуру относительно теплоотвода, что приводит к возникновению на термоэлектрическом слое электрического напряжения. Измерив это напряжение, можно зафиксировать факт поглощения фотона и определить его энергию. Для этого, как и в случае однослойного чувствительного элемента, нужны только два контакта, соединяющие чувствительный элемент с низкотемпературной электроникой.

Метод компьютерного моделирования был применен для изучения особенностей процессов распространения тепла в трехслойном чувствительном элементе TSPD с вольфрамовым и сверхпроводящим поглотителями [38–40]. Используем этот же метод для определения характеристик TSPD с поглотителем LaB_6 . Компьютерное моделирование процессов, протекающих в трехслойной чувствительной ячейке после поглощения фотонов с энергией 0.5–4.13 эВ в центре поверхности LaB_6 поглотителя, проводилось на основе уравнения распространения тепла из ограниченного объема с использованием трехмерного матричного метода. Подробности примененных подходов и приближений приведены в работах [23, 38]. Используемые в расчетах параметры материалов представлены в табл.1. LaB_6 является материалом поглотителя и теплоотвода, $(\text{La}_{0.99}\text{Ce}_{0.01})\text{B}_6$ и CeB_6 – термоэлектрического сенсора с максимальными значениями коэффициента Зеебека соответственно при 0.5 и 9 K. Именно эти температуры выбраны в качестве рабочей температуры трехслойного чувствительного

элемента TSPD. Чувствительный элемент располагается на подложке из сапфира (Al_2O_3), который является диэлектриком, обладающим большой теплопроводностью при гелиевых температурах.

Табл.1. Параметры использованных материалов

Параметры	Материал			
	LaB_6	$(\text{La}_{0.99}\text{Ce}_{0.01})\text{B}_6$	CeB_6	Al_2O_3
Плотность, кг/м^3	4720	4720		4000
0.5 K				
Удельная теплоемкость, Дж/кг K	0.007 [41]	0.196 [41]		9.8×10^{-4} [43]
Теплопроводность, Вт/м K	0.98 [42]	0.98 [42]		40 [44]
Коэффициент Зеебека, мкВ/K		85 [5]		
9 K				
Удельная теплоемкость, Дж/кг K	0.196 [41]		7.3 [45]	0.0588 [47]
Теплопроводность, Вт/м K	100 [46]		0.8 [42]	300 [48]
Коэффициент Зеебека, мкВ/K			150 [49]	

Толщина поглотителя является основной характеристикой чувствительного элемента TSPD. Выбор этого параметра производился с учетом требования обеспечить высокую вероятность поглощения фотонов для достижения высоких значений η_a . Одновременно ставилась цель добиться высокой скорости счета и энергетического разрешения, что достигалось варьированием толщины термоэлектрического слоя.

3. Результаты и их обсуждение

Методом компьютерного моделирования исследовано поглощение фотонов с энергией 0.5–4.13 эВ в центре поглотителя из LaB_6 . В случае трехслойного чувствительного элемента термоэлектрический слой, который является сенсором, и теплоотвод, в соответствии с предложенной конструкцией [12], имеют те же размеры по координатам x и y . В наших предыдущих работах [38, 39] было показано, что с увеличением площади поглотителя скорость счета увеличивается. Однако это увеличение незначительное и происходит в ограниченной области изменения площади поглотителя, поэтому в расчетах изменяем толщины

слоев чувствительного элемента при постоянной площади поглотителя $10 \times 10 \text{ мкм}^2$. Ниже обозначим толщину поглотителя, сенсора и теплоотвода соответственно через Z_1 , Z_2 и Z_3 . Полученные в результате расчетов характеристики чувствительного элемента имеют обозначения: ΔT_m – возникающая на сенсоре максимальная разность температур, V_m – максимальное 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. Номера расчетов для чувствительного элемента $\text{LaB}_6/(\text{La,Ce})\text{B}_6/\text{LaB}_6/\text{Al}_2\text{O}_3$ с сенсором $(\text{La}_{0.99}\text{Ce}_{0.01})\text{B}_6$ имеют обозначение LLCL, а чувствительному элементу $\text{LaB}_6/\text{CeB}_6/\text{LaB}_6/\text{Al}_2\text{O}_3$ с сенсором CeB_6 соответствует обозначение LCL.

3.1. Регистрация фотонов трехслойным чувствительным элементом TSPD с поглотителем LaB_6 и сенсором $(\text{La}_{0.99}\text{Ce}_{0.01})\text{B}_6$

Рассмотрим сначала результаты компьютерного моделирования процессов распространения тепла в трехслойном чувствительном элементе TSPD с поглотителем LaB_6 и термоэлектрическим сенсором $(\text{La}_{0.99}\text{Ce}_{0.01})\text{B}_6$.

Сравним результаты расчетов для двух толщин поглотителя $Z_1 = 1 \text{ мкм}$ (расчеты LLCL1 и LLCL5) и $Z_1 = 0.5 \text{ мкм}$ (LLCL11 и LLCL15), которые выполнены при одинаковых толщинах сенсора и теплоотвода $Z_2 = Z_3 = 1 \text{ мкм}$.

Табл.2. Характеристики чувствительного элемента TSPD с поглотителем LaB_6 и сенсором $(\text{La}_{0.99}\text{Ce}_{0.01})\text{B}_6$

Номер расчета	Z_1 , мкм	Z_2 , мкм	Z_3 , мкм	E , эВ	ΔT_m , 10^{-4} К	t_m , пс	V_m , мкВ	t_b , пс	R , ГГц
LLCL1	1	1	1	4.13	94	4.5	0.799	966.9	1.03
LLCL5	1	1	1	0.5	11.4	4.5	0.097	85.5	11.7
LLCL6	1	0.1	1	4.13	34.2	3.3	0.291	48.3	20.7
LLCL10	1	0.1	1	0.5	4.14	3.3	0.035	14.7	68
LLCL11	0.5	1	1	4.13	537.4	1.5	4.568	1950	0.51
LLCL15	0.5	1	1	0.5	65	1.5	0.553	136.5	7.3
LLCL21	0.5	0.1	0.1	4.13	12.2	1.8	0.104	39.6	25.3
LLCL25	0.5	0.1	0.1	0.5	1.47	1.8	0.013	9.6	104.2
LLCL26	0.1	0.1	0.1	4.13	54.63	0.207	0.464	53	18.9
LLCL27	0.1	0.1	0.1	0.5	23.3	0.207	0.198	36	27.8
LLCL28	0.5	4	1	0.8	104	1.5	0.884	304.5	3.28
LLCL29	0.5	2	1	0.8	104	1.5	0.884	283.8	3.5
LLCL30	0.5	1	1	0.8	104	1.5	0.884	201.9	4.95
LLCL31	0.5	0.6	1	0.8	100.3	1.5	0.853	165.3	6
LLCL32	0.5	0.4	1	0.8	95.1	1.5	0.808	125.7	8
LLCL33	0.5	0.2	1	0.8	81.2	1.5	0.69	58.5	17.1
LLCL34	0.5	0.1	1	0.8	59.7	1.5	0.508	19.5	51.3

При рассмотрении данных в табл.2 можно сделать следующие выводы: при одинаковой геометрии чувствительного элемента параметр t_m не зависит от энергии фотона и уменьшается с уменьшением толщины поглотителя.

О величине сигнала и быстродействии чувствительного элемента можно сказать следующее. Из рис.1 видно, что параметр V_m растет с увеличением энергии фотона E . Значения параметра V_m и наклон зависимости $V_m(E)$ зависят от толщины поглотителя Z_1 . Оптимальной является толщина $Z_1 = 0.5$ мкм, т. к. при $Z_1 = 1$ параметр V_m имеет меньшие значения. Скорость счета уменьшается с увеличением энергии фотона E и становится больше для более толстого поглотителя. Таким образом, уменьшение толщины поглотителя быстрее приводит к достижению максимума сигнала и увеличивает время спада сигнала до уровня фона. При меньшей толщине поглотителя тепло, выделенное при поглощении фотона в приповерхностной области поглотителя, быстрее доходит до границы с сенсором и быстрее достигается максимум сигнала. При этом сигнал больше в случае более тонкого поглотителя и для его спада до фонового значения требуется больше времени. Следовательно, скорость счета имеет меньшие значения при одной и той же энергии поглощенного фотона.

Сравнение расчетов LLCL1 и LLCL6 ($Z_1 = Z_3 = 1$ мкм и $E = 4.13$ эВ) показывает, что уменьшение толщины сенсора от 1 до 0.1 мкм (в 10 раз) приводит к увеличению скорости счета в 20 раз и к уменьшению параметров ΔT_m и V_m в

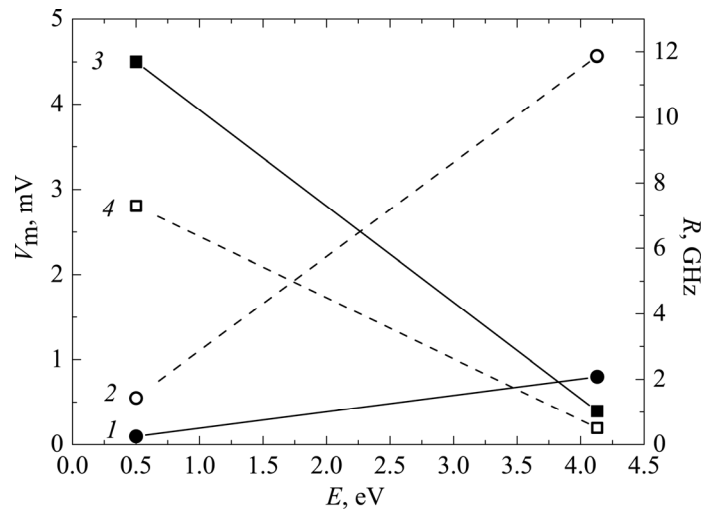


Рис.1. Зависимость параметров V_m (1, 2) и R (3, 4) от энергии фотона для разных толщин поглотителя при одинаковых толщинах сенсора и теплоотвода $Z_2 = Z_3 = 1$ мкм. Толщине поглотителя $Z_1 = 1$ мкм (1, 3) соответствуют расчеты LLCL1 и LLCL5 и толщине $Z_1 = 0.5$ мкм (2, 4) – расчеты LLCL11 и LLCL15.

2.7 раза. При энергии фотона $E = 0.5$ эВ уменьшение толщины сенсора в 10 раз приводит к меньшему увеличению скорости счета (5.8 раз), а уменьшение параметра ΔT_m происходит во столько же раз, как при $E = 4.13$ эВ (расчеты LLCL5 и LLCL10).

Зависимость параметров V_m и R от энергии фотона для толщин поглотителя 0.5 и 0.1 мкм при одинаковых толщинах сенсора и теплоотвода $Z_2 = Z_3 = 0.1$ мкм представлена на рис.2 (расчеты LLCL21 и LLCL25–LLCL27). Как и при расчетах для толщин $Z_2 = Z_3 = 1$ мкм (рис.1), параметр V_m растет с увеличением энергии фотона E . Значения параметра V_m и наклон зависимости $V_m(E)$ больше при меньшей толщине поглотителя Z_1 . Для энергии фотона 4.13 эВ при толщине поглотителя 0.1 мкм параметр V_m имеет значение 0.464 мкВ, а для фотона с энергией 0.5 эВ – 0.198 мкВ. Скорость счета уменьшается с увеличением энергии фотона и больше для более толстого поглотителя. Для энергии фотона 0.5 эВ и толщины поглотителя 0.5 мкм достигается скорость счета 104 ГГц. Время достижения максимума сигнала при $Z_1 = 0.1$ мкм составляет 0.2 пс, а при $Z_1 = 0.5$ мкм параметр t_m больше в 9 раз. Параметр t_m в отличие от параметра t_b не зависит от энергии фотона.

Сравнение результатов расчетов LLCL11, LLCL15 и LLCL30 показывает, что характер зависимости параметров ΔT_m и R от энергии фотона при одинаковой геометрии чувствительного элемента не вызывают вопросов: с увеличением

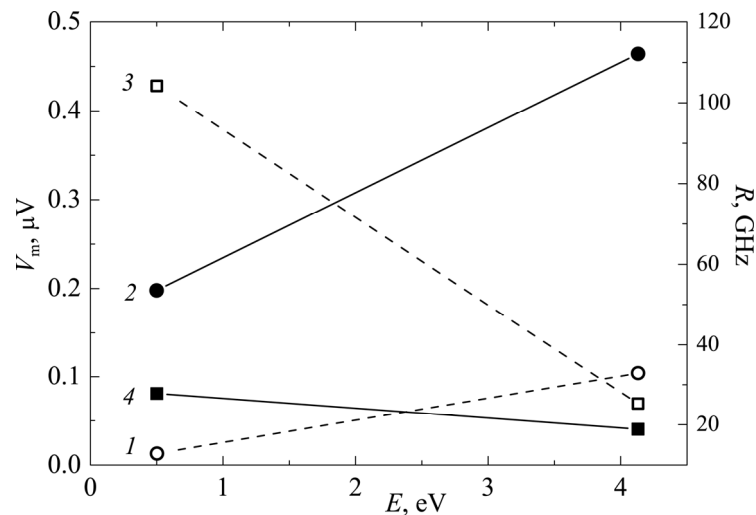


Рис.2. Зависимость параметров V_m (1, 2) и R (3, 4) от энергии фотона для разных толщин поглотителя при одинаковых толщинах сенсора и теплоотвода $Z_2 = Z_3 = 0.1$ мкм. Толщине поглотителя $Z_1 = 0.5$ мкм (1, 3) соответствуют расчеты LLCL21 и LLCL25, толщине $Z_1 = 0.1$ мкм (2, 4) – расчеты LLCL26 и LLCL27.

энергии фотона ΔT_m растет, а R уменьшается. Отметим, что зависимость максимального значения сигнала от энергии фотона имеет линейный характер. Зависимости параметров ΔT_m (1) и R (2) от энергии фотона при толщинах поглотителя $Z_1 = 0.5$ мкм, сенсора и теплоотвода $Z_2 = Z_3 = 1$ мкм представлены на рис.3.

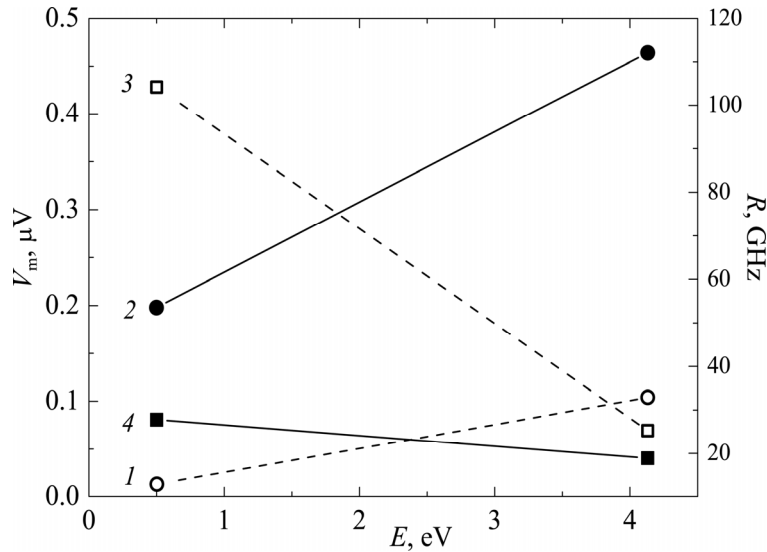


Рис.3. Зависимость параметров ΔT_m (1) и R (2) от энергии фотона при толщинах поглотителя $Z_1 = 0.5$ мкм, сенсора и теплоотвода $Z_2 = Z_3 = 1$ мкм (расчеты LLCL11, LLCL15 и LLCL30).

В расчетах LLCL28–LLCL34 более подробно исследована зависимость параметров чувствительного элемента TSPD от толщины сенсора для фотонов с энергией 0.8 эВ (1550 нм). Анализ результатов моделирования процессов распространения тепла в $\text{LaB}_6/(\text{La}_{0.99}\text{Ce}_{0.01})\text{B}_6/\text{LaB}_6/\text{Al}_2\text{O}_3$ трехслойном чувствительном элементе термоэлектрического детектора показывает, что уменьшение толщины сенсора от 4 до 1 мкм не приводит к изменению параметра V_m . Дальнейшее уменьшение Z_2 до 0.1 мкм приводит к уменьшению V_m приблизительно в 1.7 раза (рис.4). Уменьшение толщины сенсора от 4 до 0.1 мкм приводит к увеличению скорости счета в 15 раз и достижению значения $R = 51.3$ ГГц.

Изменение толщины как поглотителя, так и сенсора изменяет параметры V_m и t_b , определяющие соответственно энергетическое разрешение и скорость счета детектора, причем увеличение одного из параметров сопровождается уменьшением другого. Соответственно, для каждой конкретной задачи должна подбираться оптимальная геометрия чувствительного элемента.

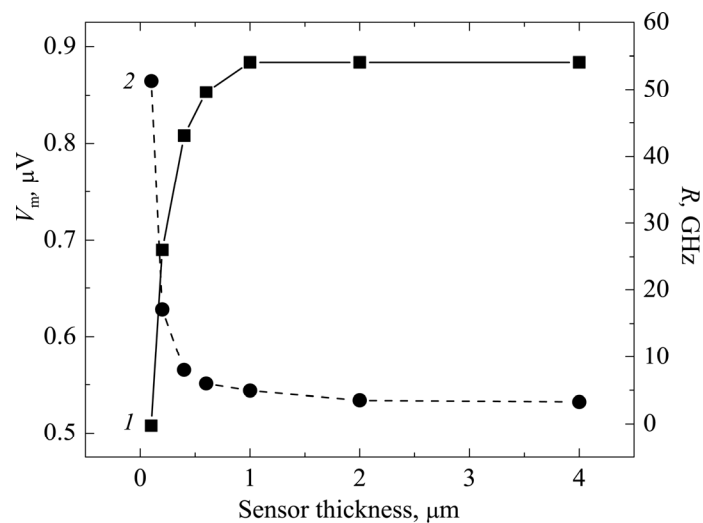


Рис.4. Зависимость параметров V_m (1) и R (2) от толщины сенсора Z_2 при одинаковых толщинах поглотителя $Z_1 = 0.5$ мкм и теплоотвода $Z_3 = 1$ мкм (расчеты LLCL28–LLCL34, $E = 0.8$ эВ).

3.2. Регистрация фотонов трехслойным чувствительным элементом TSPD с поглотителем LaB_6 и сенсором CeB_6

Результаты компьютерного моделирования процессов распространения тепла в трехслойном чувствительном элементе TSPD с поглотителем LaB_6 и термоэлектрическим сенсором CeB_6 представлены в табл.3.

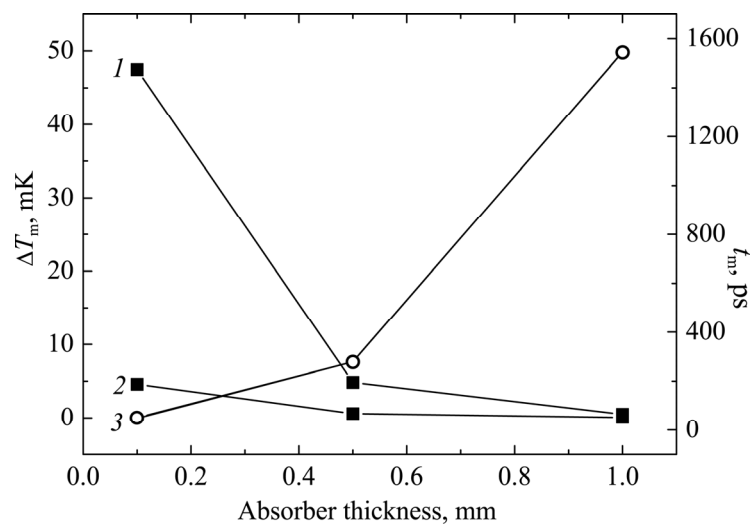


Рис.5. Зависимость параметров ΔT_m (1 – $E = 4.13$ эВ и 2 – $E = 0.5$ эВ) и t_m (3 – $E = 4.13$ эВ и $E = 0.5$ эВ) от толщины поглотителя при одинаковых толщинах сенсора и теплоотвода $Z_2 = Z_3 = 1$ мкм (расчеты LCL1, LCL5 и LCL11–LCL20).

Сравнение расчетов LCL1 и LCL5, в которых использована толщина термоэлектрика 1 мкм, с расчетами LCL6 и LCL10 (толщина термоэлектрика 0.1 мкм) показывает, что меньшей толщине термоэлектрика соответствует меньший на порядок параметр ΔT_m при несколько более быстром достижении значения максимума. Время спада сигнала до фонового значения очень большое. По результатам этих расчетов, кроме расчета LCL1, максимальный сигнал меньше фонового значения.

Сравним расчеты для разных толщин поглотителя при толщинах термоэлектрика и теплоотвода 1 мкм. Это расчеты LCL1 и LCL5 (толщина поглотителя 1 мкм), расчеты LCL11 и LCL15 (толщина поглотителя 0.5 мкм) и расчеты LCL16 и LCL20 (толщина поглотителя 0.1 мкм). Как из табл.3, так и рис.5 видно, что с уменьшением толщины поглотителя время достижения максимума сигнала уменьшается, а максимальное значение сигнала увеличивается. Время достижения максимума сигнала практически не зависит от энергии фотона. Параметр t_m одинаков для фотонов с энергией 0.5 и 4.13 эВ при толщинах поглотителя 1 и 0.5 мкм и отличается на 5 % при толщине поглотителя 0.1 мкм. Максимальный сигнал, как и следовало ожидать, возрастает с увеличением энергии поглощенного фотона. Из наших предыдущих исследований известно, что зависимость максимального сигнала от энергии фотона – линейная функция.

Табл.3. Характеристики чувствительного элемента TSPD с поглотителем LaB₆ и сенсором CeB₆

Номер расчета	Z ₁ , мкм	Z ₂ , мкм	Z ₃ , мкм	E, эВ	ΔT_m , 10 ⁻⁴ K	t_m , пс	V _m , мкВ	t _b , пс	R, ГГц
LCL1	1	1	1	4.13	5.02	1545	0.075	—	—
LCL5	1	1	1	0.5	0.607	1545	0.009	—	—
LCL6	1	0.1	1	4.13	0.544	897	0.008	—	—
LCL10	1	0.1	1	0.5	0.066	897	0.001	—	—
LCL11	0.5	1	1	4.13	48.2	279	0.723	10 000	0.1
LCL15	0.5	1	1	0.5	5.83	279	0.087	2800	0.36
LCL16	0.1	1	1	4.13	474.7	48.6	7.12	3750	0.27
LCL20	0.1	1	1	0.5	45.85	51.1	0.688	2500	0.4
LCL21	0.5	0.1	0.1	4.13	11.21	200.76	0.168	1850	0.54
LCL25	0.5	0.1	0.1	0.5	1.36	200.76	0.02	454.56	2.2
LCL26	0.1	0.1	0.1	4.13	337.81	39.6	5.067	2250	0.44
LCL30	0.1	0.1	0.1	0.5	32.6	41.4	0.489	1200	0.83
LCL31a	0.5	1	1	0.8	9.323	279	0.14	4416	0.23
LCL32	0.5	0.6	1	0.8	9.323	279	0.14	3100	0.32
LCL33	0.5	0.4	1	0.8	2.604	264	0.039	1300	0.77
LCL34	0.5	0.2	1	0.8	2.519	231	0.038	831	1.2
LCL35	0.5	0.1	1	0.8	1.958	165	0.029	468	2.14

Отметим, что в табл.3 для первых 4 расчетов отсутствуют данные по параметрам t_b и R , так как время спада сигнала до фонового значения было очень большое и расчеты прерывались. Однако по данным расчетов для толщин поглотителя 0.5 и 0.1 мкм можно утверждать, что с уменьшением толщины поглотителя время спада сигнала до фонового значения 10^{-4} К уменьшается, а скорость счета увеличивается. Подтверждением такой зависимости являются данные расчетов LCL21–LCL30, в которых толщины сенсора и теплоотвода равны 0.1 мкм. Зависимость параметров ΔT_m и R этих расчетов от энергии фотона представлена на рис.6. Можно видеть, что при одинаковой энергии скорость счета выше у чувствительного элемента с более тонким поглотителем. Сигнал ожидаемо выше в случае более тонкого поглотителя и возрастает с увеличением энергии поглощенного фотона. Уменьшением толщины поглотителя в 5 раз добиваемся увеличения максимума сигнала в 30 раз. Однако при тех же значениях толщины поглотителя максимальный сигнал меньше в случае $Z_2 = Z_3 = 0.1$ мкм по сравнению с результатами расчетов при $Z_2 = Z_3 = 1$ мкм. В данной группе расчетов большие значения получаются для параметра скорость счета, который для расчета LCL25 достигает 2.2 ГГц.

По наклону прямой зависимости $\Delta T_m(E)$ на рис.6 можно рассчитать энергетическое разрешение рассмотренных чувствительных элементов. Для толщин $Z_1 = Z_2 = Z_3 = 0.1$ мкм получим, что для рассмотренной области энергий 0.5–4.13 эВ различие энергии фотона на 10% приведет к разнице значений

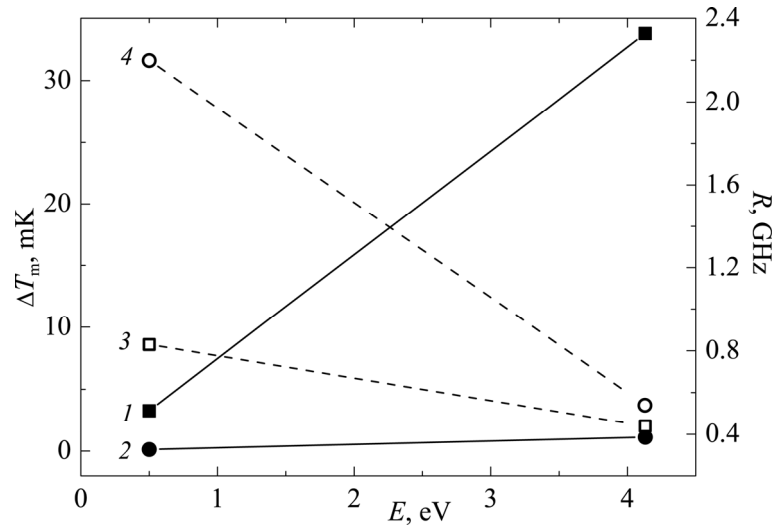


Рис.6. Зависимости параметров ΔT_m (1 – $Z_1 = 0.1$ мкм и 2 – $Z_1 = 0.5$ мкм) и R (3 – $Z_1 = 0.1$ мкм и 4 – $Z_1 = 0.5$ мкм) от энергии фотона при одинаковых толщинах сенсора и теплоотвода $Z_2 = Z_3 = 0.1$ мкм (расчеты LCL21–LCL30).

параметра V_m на 0.126 мкВ, а различие энергии на 1% приведет к разнице регистрируемого сигнала в 0.012 мкВ. Такая разница сигнала может быть надежно зарегистрирована современной электроникой, и можно смело говорить о достижении энергетического разрешения 1%.

Рассмотрим зависимость характеристик чувствительного элемента $\text{LaB}_6/\text{CeB}_6/\text{LaB}_6/\text{Al}_2\text{O}_3$ от толщины термоэлектрика при неизменных толщинах поглотителя 0.5 мкм и теплоотвода 1 мкм. Это расчеты LCL31–LCL35 для энергии фотона 0.8 эВ. Зависимость возникающего на сенсоре электрического напряжения и скорости счета от толщины термоэлектрического слоя Z_2 приведена на рис.7. Видно, что максимальный сигнал начинает спадать, когда Z_2 становится меньше 0.6 мкм. При этих же толщинах начинается увеличение скорости счета. Таким образом, для задач, требующих высокого энергетического разрешения, можно использовать чувствительный элемент с термоэлектрическим слоем ≥ 0.6 мкм, а для задач, при решении которых нужна высокая скорость счета, использовать чувствительный элемент с термоэлектрическим слоем ≤ 0.6 мкм.

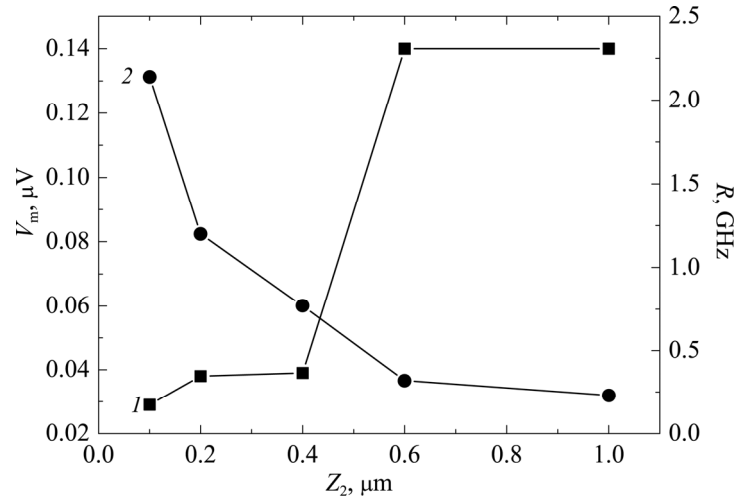


Рис.7. Зависимость параметров V_m (1) и R (2) от толщины сенсора при одинаковых толщинах поглотителя $Z_1 = 0.5$ мкм и теплоотвода $Z_3 = 1$ мкм (расчеты LCL31–LLCL35, $E = 0.8$ эВ).

4. Заключение

Исследованы характеристики трехслойного чувствительного элемента TSPD с поглотителем LaB_6 и сенсором $(\text{La,Ce})\text{B}_6$ и CeB_6 . Полученные результаты показывают, что такой детектор может регистрировать одиночные фотоны в области длин волн от УФ до ближнего ИК. При этом обеспечивается гигагерцовая

скорость счета, энергетическое разрешение не хуже 1% и системная эффективность детектирования превосходит 90%. Последнее утверждение делается на основе того, что использование поглотителя LaB_6 позволит достичь значений $\eta_o = 95\%$ (эффективность оптической связи фотонов и чувствительного элемента) и $\eta_a = 99.9\%$ (эффективность поглощения фотонов), а для сенсоров $(\text{La,Ce})\text{B}_6$ и CeB_6 параметр η_i (внутренняя эффективность детектирования) может достигать значения, близкого к 100%, так как при правильном подборе геометрии чувствительного элемента обеспечивается большое соотношение сигнал/шум.

Близость параметров элементарной ячейки и коэффициента объемного расширения гексаборидов, использованных в конструкции трехслойного чувствительного элемента, открывает возможность получения гетероструктур высокого качества и их использования в качестве чувствительного элемента термоэлектрического детектора при гелиевых температурах. Такие структуры устойчивы к термоциклированию и обладают механическими характеристиками, гарантирующими их длительное применение при оптимальных рабочих температурах для сенсоров $(\text{La,Ce})\text{B}_6$ и CeB_6 соответственно 0.5 и 9 К. Преимуществами трехслойного чувствительного элемента TSPD по сравнению с однослойным являются: независимость формы сигнала и максимального значения сигнала от области поглощения фотона на поверхности поглотителя, линейный характер зависимости максимального сигнала от энергии фотона, что позволяет определять энергию поглощенного фотона по измеренному в эксперименте максимальному сигналу и большая площадь поверхности поглотителя. Таким образом, можно полагать, что именно трехслойный чувствительный элемент TSPD на основе редкоземельных гексаборидов составит конкуренцию сверхпроводящим детекторам при решении ряда задач однофотонного детектирования.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. А.А. Кузаян, А.С. Кузаян, В.Р. Никогосян. Известия НАН Армении, Физика, **53**, 320 (2018).
2. R.H. Hadfield. Nature Photonics, **3**, 696 (2009).
3. T. Yamashita, S. Miki, H. Terai. IEICE Transactions on Electronics, **E100-C**, 274 (2017).
4. A. Gulian, K. Wood, D. van Vechten, G. Fritzdet. J. Mod. Opt., **51**, 1467 (2004).
5. 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, A. Kuzanyan, G. Badalyantz, S. Harutyunyan, S. Petrosyan, V. Vardanyan, T. Paronyan, V. Nikoghosyan. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, **A520**, 36 (2004).
6. 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. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A **520**, 56 (2004).
7. В.А. Петросян. Известия НАН Армении, Физика, **46**, 194 (2011).
8. A.A. Kuzanyan, A.S. Kuzanyan. Proc. SPIE, **8773**, 87730L (2013).
9. A. Kuzanyan, V. Nikoghosyan, A. Kuzanyan. Sensors & Transducers, **191**, 57 (2015).
10. A.A. Kuzanyan. Nano Studies, **9**, 93 (2014).
11. A.A. Kuzanyan, A.S. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan. J. Phys. Conf. Ser., **673**, 012007 (2016).
12. A. Kuzanyan, A. Kuzanyan, V. Nikoghosyan. Armenian Patent, no 2946, 2015.
13. А.А. Кузаныян, А.С. Кузаныян, В.Р. Никогосян, В.Н. Гурин, М.П. Волков. Известия НАН Армении, Физика, **51**, 244 (2016).
14. A. Kuzanyan, A. Kuzanyan, V. Nikoghosyan. Armenian Patent, no 3043, 2016.
15. 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).
16. A.E. Lita, B. Calkins, L.A. Pellochoud, A.J. Miller, S. Nam. Proc. 13th Int. Workshop LTD 13, CP1185, 351 (2009).
17. A.E. Lita, B. Calkins, L.A. Pellochoud, A.J. Miller, S. Nam. Proc. SPIE, **7681**, 76810D (2010).
18. D. Rosenberg, A.E. Lita, A.J. Miller, S. Nam, R.E. Schwall. IEEE Trans. Appl. Supercond., **15**, 575 (2005).
19. 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).
20. 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).
21. 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).
22. 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).
23. A.A. Kuzanyan, A.S. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan. Sensors & Transducers, **207**, 21 (2016).
24. А.А. Кузаныян. Известия НАН Армении, Физика, **51**, 484 (2016).
25. M.A. Otdal, R.J. Bell, R.W. Alexander, L.A. Newquist, M.R. Querry. Appl. Opt., **27**, 1203 (1988).
26. С.И. Петросян, А.А. Кузаныян, Г.Р. Бадалян, А.С. Кузаныян. Известия НАН Армении, Физика, **53**, 208 (2018).
27. D.S. Bethune, W.P. Risk, G.W. Pabst. J. Modern Optics, **51**, 1359 (2004).
28. F. Zappa, A.L. Lacaita, D. Covas, P. Lovati. Opt. Eng., **35**, 938 (1996).
29. В.Н. Гурин, М.М. Корсукова, М.Г. Карин, К.К. Сидорин, И.А. Смирнов, Ф.И. Шельх. ФТТ, **22**, 715 (1980).
30. А.С. Игитян, Е.А. Кафадарян, Н.Р. Агамалян, С.И. Петросян, Г.Р. Бадалян, И.А. Гамбарян, Р.К. Овсепян, О.С. Семерджян. Известия НАН Армении, Физика, **49**, 415 (2014).
31. H. Takeda, H. Kuno, K. Adachi. J. Am. Ceram. Soc., **91**, 2897 (2008).

32. E. Sani, L. Mercatelli, M. Meucci, L. Zoli, D. Sciti. Scientific Reports, **7**, 718 (2017).
33. M.M. Korsukova, V.N. Gurin, Sh. Otani, Y. Ishizava. Solid State Commun., **99**, 215 (1996).
34. A.A. Кузаныян, В.Р. Никогосян, А.С. Кузаныян. Известия НАН Армении, Физика, **53**, 96 (2018).
35. G. Schell, H. Winter, H. Rietschel, F. Gompf. Phys. Rev. B, **25**, 1589 (1982).
36. D. van Vechten, K. Wood, G. Fritz, J. Horwitz, A. Gyulamiryan, A. Kuzanyan, V. Vartanyan, A. Gulian. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., **444**, 42 (2000).
37. 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. Horwitz, A.M. Gulian. Proc. SPIE, **4140**, 459 (2000).
38. As. Kuzanyan, Ar. Kuzanyan, V. Nikoghosyan. Sensors & Transducers, **207**, 21 (2016).
39. A. Kuzanyan. Sensors & Transducers, **217**, 28 (2017).
40. A.A. Кузаныян, В.Р. Никогосян, А.С. Кузаныян. Proc. of SPIE, **10229**, 102290P (2017).
41. М.А. Анисимов, В.В. Глушков, А.В. Богач, С.В. Демишев, Н.А. Самарин, С.Ю. Гаврилкин, К.В. Мицень, Н.Ю. Шицевалова, А.В. Левченко, В.Б. Филиппов, С. Габони, К. Флахбарт, Н.Е. Случанко. ЖЭТФ, **143**, 877 (2013).
42. Y. Peysson, C. Ayache, B. Salce. J. Magnetism and Magnetic Materials, **59**, 33 (1986).
43. G.T. Furukawar, T.B. Douglasr, R.E. McCoske Yr, D.C. Ginnings. J. Research National Bureau Stand., **57**, 67 (1956).
44. http://www.phys.ufl.edu/ireu/IREU2013/pdf_reports/Allen_Scheie_FinalReport.pdf
45. T. Fujita, M. Suzuki, T. Komatsubara, S. Kunii, T. Kasuya, T. Ohtsuka. Solid State Commun., **35**, 569 (1980).
46. П.А. Попов, В.В. Новиков, А.А. Сидоров, Е.В. Максименко. Неорган. материалы, **43**, 1324 (2007).
47. D.A. Ditmars, S. Ishihara, S.S. Chang, G. Bernstein, E.D. West. J. Res. Nat. Bur. Stand., **87**, 159 (1982).
48. R. Berman, E.L. Foster, J.M. Ziman. Proc. R. Soc. Lond. A, **231**, 130 (1955).
49. V. Petrosyan, V. Vardanyan, V. Kuzanyan, M. Konovalov, V. Gurin, A. Kuzanyan. Solid State Sciences, **14**, 1653 (2012).

ՀԱԶՎԱԳՅՈՒՏ ՀՈՂԵՐԻ ՀԵՔՍԱԲՈՐԻԴՆԵՐԻ ՀԻՄՔՈՎ ՄԻԱՖՈՏՈՆ ՋԵՐՄԱԷԼԵՏՐՈՒՄԱՆ ԴԵՏԵԿՏՈՐԻ ԵՌԱՇԵՐՏ ԶԳԱՅՈՒՆ ՏԱՐԸ

Ա.Ս. ԿՈՒԶԱՆՅԱՆ, Ա.Ա. ԿՈՒԶԱՆՅԱՆ, Վ.Ռ. ՆԻԿՈԳՈՍՅԱՆ

Ներկայացված են ջերմաէլեկտրական միաֆոտոն դետեկտորի եռաշերտ զգայուն տարրում 0.5–4.13 էՎ էներգիայով միակի ֆոտոնների կլանումից հետո ջերմության տարածման պրոցեսների համակարգչային մոդելավորման արդյունքները: Դիտարկված են հազվագյուտ հողերի հեքսաբորիդներից բաղկացած զգայուն տարրի տարբեր երկրաչափություններ: Որպես կլանիչի նյութ ընտրված է լանթանի հեքսաբորիդը (LaB_6), ջերմաէլեկտրական տվիչ՝ ցերիումի հեքսաբորիդը (CeB_6) և լանթան ցերիումի հեքսաբորիդը ($(\text{La}_{0.99}\text{Ce}_{0.01})\text{B}_6$): Նպատակն է լուծել մոտ ինֆրակարմիրից մինչև

ուլտրամանուշակագույն տիրույթի ֆոտոնների դետեկտման բարձր արդյունավետություն ապահովելու խնդիրը: Համակարգչային մոդելավորումը իրականացվել է սահմանափակ ծավալից ջերմության տարածման հավասարման հիման վրա՝ դիֆֆերենցիալ հավասարումների համար կիրառելով եռաչափ մատրիցային մեթոդը: Ցույց է տրված, որ միայն հեքսաբորիդներից պատրաստված եռաշերտ զգայուն տարրով միաֆոտոն դետեկտորը կունենա գիգահերցային հաշվարկի արագություն, բարձր էներգետիկ լուծաչափ և 90% գերազանցող ֆոտոնների դետեկտման արդյունավետություն: Հաշվի առնելով եռաշերտ զգայուն տարրի առավելությունները միաշերտի համեմատությամբ կարելի է պնդել, որ եռաշերտ զգայուն տարրը ավելի լայն հեռանկարներ ունի միաֆոտոնային դետեկտման մի շարք խնդիրներ լուծելու համար:

THREE-LAYER DETECTION PIXEL OF SINGLE-PHOTON THERMOELECTRIC DETECTOR BASED ON RARE-EARTH HEXABORIDES

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

The results of computer simulation of heat propagation processes in the three-layer detection pixel of single-photon thermoelectric detector after the absorption of single photons with 0.5–4.13 eV energies are presented. Various geometries of detection pixel consisting of rare-earth hexaborides are considered. Lanthanum hexaboride (LaB_6) is chosen as the absorber material, and for the materials of thermoelectric sensor are chosen cerium (CeB_6) and lanthanum–cerium ($\text{La}_{0.99}\text{Ce}_{0.01}\text{B}_6$) hexaborides. The problem to achieve high system efficiency of thermoelectric detector for photons detection in the wavelength range from UV to near IR rang is solved. Computer modeling 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 a single-photon thermoelectric detector with a three-layer detection pixel made only of hexaborides will have gigahertz count rate, high energy resolution, and detection efficiency exceeding 90%. Taking into account the advantages of three-layer detection pixel compared to the single-layer it can be argued that three-layer detection pixel of the thermoelectric detector has great prospects to solve a number of single-photon detection tasks.