УДК 536.2

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА В ЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКЕ СО СВЕРХПРОВОДЯЩИМИ СЛОЯМИ ОДНОФОТОННОГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДЕТЕКТОРА

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

Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак, Армения

\*e-mail: akuzanyan@yahoo.com

(Поступила в редакцию 13 сентября 2017 г.)

Представлены результаты компьютерного моделирования процессов распространения тепла в трехслойной чувствительной ячейке со сверхпроводящими слоями однофотонного термоэлектрического детектора после поглощения одиночных фотонов с энергией 1–1000 эВ. Рассмотрены различные геометрии чувствительной ячейки, состоящей из CeB<sub>6</sub> или (La,Ce)B<sub>6</sub> термоэлектрического сенсора, поглотителя и теплоотвода из сверхпроводников Nb, Pb или YBCO. Расчеты на основе уравнения распространения тепла из ограниченного объема проводились с использованием трехмерного матричного метода для дифференциальных уравнений. Показано, что, изменяя материалы и размеры элементов чувствительной ячейки, а также рабочую температуру, можно получить детектор для регистрации фотонов в заданном спектральном диапазоне с требуемым энергетическим разрешением и скоростью счета. Такой детектор имеет ряд преимуществ, которые позволяют рассматривать термоэлектрический детекторам.

#### 1. Введение

Однофотонные детекторы, способные определять энергию фотонов и обеспечивать высокую скорость счета, востребованы во многих областях. Они используются в квантовой электронике, астрофизике, физике высоких энергий, квантовой информатике, телекоммуникационных системах, квантовой метрологии, в медицине и других областях. Среди разработок последних лет сверхпроводящие нанопроволочные однофотонные детекторы, имеющие рекордные характеристики, считаются наиболее перспективными [1, 2]. Термоэлектрический однофотонный детектор (TSPD) демонстририрует аналогичные характеристики [3, 4]. Физическая концепция TSPD была предложена в 2000 году [5, 6]. Было показано, что TSPD может составить конкуренцию сверхпроводящим детекторам [3, 7]. Компьютерное моделирование процессов распределения тепла в

однослойной чувствительной ячейке TSPD, содержащей два вольфрамовых поглотителя и термоэлектрический сенсор, выявило ряд особенностей. Наиболее существенной является зависимость формы получаемого сигнала от области термализации фотонов в поглотителе, что в некоторых случаях усложняет возможность определения энергии поглощенного фотона [8-11]. В связи с этим была предложена идея трехслойной чувствительной ячейки TSPD [12], обеспечивающей независимость отклика от области термализации фотона [13]. В работах [14, 15] приведены результаты компьютерного моделирования процессов распределения тепла в трехслойных чувствительных ячейках W/(La,Ce)B<sub>6</sub>/W и W/CeB<sub>6</sub>/W после поглощения фотонов с энергией 1–1000 эВ. Показано, что, уменьшая толщину термоэлектрического слоя, можно получить детекторы для регистрации фотонов со скоростью счета выше десятков гигагерц. Однако, чем тоньше термоэлектрический слой, тем меньше его электрическое сопротивление, что может стать препятствием для регистрации напряжения на чувствительной ячейке. Для уверенной регистрации сигнала сопротивление измерительной цепи должно быть меньше сопротивления термоэлектрического слоя. Проблема может быть решена с использованием сверхпроводящих материалов для поглотителя, теплоотвода и электрических контактов. Мы предложили новый тип термоэлектрического детектора с чувствительной ячейкой, состоящей из двух сверхпроводящих слоев и термоэлектрического слоя между ними [16].

В настоящей работе приведены результаты компьютерного моделирования процессов распространения тепла, протекающих после поглощения одиночных фотонов с энергией 1–1000 эВ в трехслойной чувствительной ячейке TSPD, состоящей из термоэлектрического сенсора и сверхпроводящих поглотителя и теплоотвода. Рассмотрено влияние размеров элементов чувствительной ячейки на основные характеристики детектора – энергетическое разрешение и скорость счета.

#### 2. Методика расчетов

Трехслойная чувствительная ячейка TSPD имеет простую конструкцию и обеспечивает возможность создания матрицы детектора, состоящей из множества чувствительных ячеек с очень простой электронной структурой. На рис.1 показан общий вид чувствительной ячейки. В качестве материала поглотителя и теплоотвода были выбраны свинец (Pb), ниобий (Nb) и высокотемпературный сверхпроводник YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> (YBCO) с критическими температурами 7.2, 9.25 и 90 K, соответственно [17]. Гексабориды лантана–церия (La<sub>1-x</sub>Ce<sub>x</sub>B<sub>6</sub>) и церия (CeB<sub>6</sub>) с высоким термоэлектрическим КПД при температурах ниже 1 K и около 8 K, соответственно, использовались в качестве материалов термоэлектрического



Рис.1. Трехслойная чувствительная ячейка TSPD: *1* – поглотитель, *2* – термоэлектрический сенсор, *3* – теплоотвод и *4* – подложка.

сенсора [3, 4]. Материалом подложки выбран сапфир (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) – диэлектрик с высокой теплопроводностью при низких температурах.

Когда фотон попадает в поглотитель, температура поглотителя возрастает по сравнению с температурой теплоотвода, что приводит к появлению электрического напряжения. Измеряя это напряжение, можно зарегистрировать факт поглощения фотона и определить его энергию. На этом основан принцип работы чувствительной ячейки TSPD.

Компьютерное моделирование процессов, протекающих в чувствительной ячейке после поглощения фотонов с определенной энергией в центре поверхности поглотителя, проводилось на основе уравнения распространения тепла из

Полохита	Материалы								
Параметр	CeB <sub>6</sub>	(La,Ce)B <sub>6</sub>	Nb	Pb	YBCO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	4800	4720	8570	11342	6300	4000			
0.5 K									
Удельная теплоем-		0.196 [18]	4×10 <sup>-3</sup> [20]	0.02 [22]	3×10 <sup>-3</sup> [24]	9.8×10 <sup>-4</sup> [26]			
кость, Дж/кг К									
Теплопроводность,		0.98 [19]	3.128 [21]	10 [23]	0.12 [25]	40 [27]			
Вт/м К									
Коэффициент Зее-		85 [4]							
бека, мкВ/К									
			4 K						
Удельная теплоем- кость, Дж/кг К	14.64[18]		0.236 [20]	0.7 [29]	0.048 [24]	88×10 <sup>-4</sup> [26]			
Теплопроводность, Вт/м К	0.25 [19]		7.8 [21]	400 [22]	1 [25]	300 [27]			
Коэффициент Зее- бека, мкВ/К	70 [4]								
8 K									
Удельная теплоем- кость, Дж/кг К	9.3 [18]		2.325 [20]			539 ×10 <sup>-4</sup> [26]			
Теплопроводность, Вт/м К	0.7 [19]		34.1 [21]			1060 [28]			
Коэффициент Зее- бека, мкВ/К	140 [4]								

Табл.1. Параметры использованных материалов

ограниченного объема с использованием трехмерного матричного метода. Подробности примененных подходов и приближений приведены в работах [9, 14]. Использованные в расчетах параметры материалов и ссылки, в которых приведены эти параметры, представлены в табл.1.

Толщина поглотителя является наиболее важной характеристикой чувствительной ячейки TSPD. Мы выбирали этот параметр исходя из необходимости обеспечить высокую вероятность поглощения фотонов в поглотителе. В работе [30] показано, что вероятность поглощения фотонов с энергией 1000, 100 и 10 эВ будет превышать 0.999 в свинцовом поглотителе толщиной 1.5, 0.5 и 0.2 мкм, соответственно. На рис.2 приведены вероятности достижения фотонов с энергией 1000, 100 и 10 эВ определенных глубин в свинцовом поглотителе, которые показывают, что вероятность поглощения в верхних слоях поглотителя является довольно высокой.



Рис.2. Вероятность достижения глубины L в свинцовом поглотителе фотона с энергией: 1 - 10 эВ, 2 - 100 эВ и 3 - 1 кэВ.

Проведем аналогичные расчеты для ниобиевого поглотителя. Используя закон Бугера–Ламберта и значения коэффициента линейного затухания Nb, для фотонов с энергий 1000, 100 и 10 эВ, которые равны соответственно 3.218, 4.519 и 160.5 мкм<sup>-1</sup> [31], нетрудно подсчитать, что вероятность поглощения фотона с энергией 1000, 100 и 10 эВ в ниобиевом поглотителе толщиной 1.5, 1 и 0.03 мкм, соответственно, будет превышать 0.99. Более тонкие ниобиевые поглотители или поглотители, изготовленные из других сверхпроводников, могут быть использованы для обеспечения поглощения фотонов с энергией менее 10 эВ с такой же высокой вероятностью.

# 3. Результаты и их обсуждение

# 3.1. Регистрация фотонов чувствительной ячейкой TSPD с сенсором CeB<sub>6</sub>

Нашей задачей является исследование характеристик чувствительной ячейки TSPD с сенсором CeB<sub>6</sub> или (La, Ce)B<sub>6</sub>, сверхпроводящими поглотителем и теплоотводом при поглощении фотонов ИК, УФ и рентгеновского диапазонов. Рассмотрим сначала результаты компьютерного моделирования процессов распространения тепла в чувствительной ячейке TSPD с сенсором CeB<sub>6</sub>.

№ pac-	$Z_1$ ,	Z2,	Z3,	Ε,	$\Delta T_{\mathrm{m}},$	t <sub>m</sub> ,	V <sub>m</sub> ,	tb,	<i>R</i> ,
чета	МКМ	МКМ	МКМ	эΒ	$10^{-4} \mathrm{K}$	пс	мкВ	пс	ГГц
	-	- <b>r</b>		1	8 K	1	-	-	- 1
NC1-8	1	1	1	100	>0.8	>513			
NC2-8	1	0.5	1	100	0.9525	891.3			
NC3-8	1	0.1	1	100	0.9089	771			
NC4-8	1	0.01	1	100	0.158	416.1			
NC5-8	2	0.01	1	100	0.0096	1858.2			
NC6-8	0.5	0.01	1	100	3.5194	62.4			
NC7-8	1	0.01	2	100	0.1583	416.1			
NC8-8	1	0.01	0.5	100	0.1583	417.3			
NC11-8	0.03	0.1	1	10	689	2.4	9.646	>500	<2
NC12-8	0.03	0.05	1	10	689	2.7	9.646	322.8	3.1
NC13-8	0.03	0.01	1	10	688	2.4	9.632	44.1	22.7
NC14-8	0.03	0.01	1	9	619	2.4	8.67	44.1	22.7
NC15-8	0.03	0.01	1	11	756	2.4	10.584	44.1	22.7
NC16-8	0.03	0.01	1	7	481	2.4	6.734	44.1	22.7
NC17-8	0.03	0.01	1	4	275	2.4	3.85	43.8	22.8
NC18-8	0.03	0.01	1	1	69	2.4	0.966	42	23.8
NC19-8	0.03	0.01	1	0.9	62	2.1	0.868	41.7	24
NC20-8	0.03	0.01	1	1.1	75.6	2.4	1.058	42	23.8
	•				4 K			•	
NC1-4	1	1	1	100	0.2617	124.8			
NC2-4	1	0.5	1	100	0.1806	103.5			
NC3-4	1	0.1	1	100	0.0428	91.2			
NC4-4	1	0.01	1	100	0.0041	89.4			
NC5-4	1	2	1	100	0.5836	146.7			
NC6-4	1	4	1	100	1.1617	149.1			
NC7-4	1	0.01	2	100	0.0041	89.7			
NC8-4	1	0.01	0.5	100	0.0041	89.1			
NC10-4	1	8	1	100	2.2803	149.7			

Табл.2. Характеристики чувствительной ячейки TSPD с ниобиевыми поглотителем и теплоотводом, термоэлектрическим сенсором CeB<sub>6</sub>

После поглощения фотона в поглотителе чувствительной ячейки TSPD на термоэлектрическом слое возникает электрическое напряжение *V*, величина которого пропорциональна разности температур на границах этого слоя и коэффициенту Зеебека термоэлектрика. Как следует из табл.1 термоэлектрик СеВ<sub>6</sub> имеет высокое значение коэффициента Зеебека в области 4–8 К. Из выбранных нами материалов при температуре 8 К сверхпроводниками являются Nb и YBCO, а при 4 К также Pb.

В табл.2 приведены результаты компьютерного моделирования процессов распространения тепла в чувствительной ячейке TSPD с сенсором CeB<sub>6</sub> и размерами поглотителя X = Y = 10 мкм (см. рис.1). Те же размеры поглотителя были использованы и во всех последующих расчетах. В таблице приведены номер расчета, толщина поглотителя  $Z_1$ , сенсора  $Z_2$ , теплоотвода  $Z_3$ , энергия фотона E, максимальное значение возникающей на сенсоре после поглощения фотона разности температур  $\Delta T_m$ , время достижения максимальной разности температур  $t_m$ , максимальная величина возникающего на сенсоре напряжения  $V_m$ , время спада разности температур до фонового ( $10^{-4}$  K) значения  $t_b$  и скорость счета  $R = 1/t_b$ .

Как видно из первых восьми расчетов (NC1-8-NC8-8), при регистрации фотонов с энергией 100 эВ параметр  $\Delta T_{\rm m}$  принимает значения меньше фонового для всех случаев, когда толщина поглотителя равна 1 мкм, и только при  $Z_1 = 0.5$  мкм параметр  $\Delta T_m$  несколько больше (NC1-6). Большей величине толщины термоэлектрика  $Z_2$  соответствуют большие значения параметра  $\Delta T_{\rm m}$  (NC1-8-NC4-8), что является положительной тенденцией. При этом с увеличением  $Z_2$ увеличиваются время достижения максимума сигнала  $t_{\rm m}$  и параметр  $t_{\rm b}$ , что приводит к уменьшению скорости счета. Увеличение или уменьшение толщины теплоотвода в 2 раза, при прочих равных условиях, не оказывает влияния на параметры  $\Delta T_{\rm m}$  и  $t_{\rm m}$  (NC4-8, NC7-8, NC8-8). Таким образом, чувствительная ячейка с Nb-сверхпроводником и сенсором СеВ<sub>6</sub> с рабочей температурой 8 К не является удачным выбором для регистрации УФ фотонов с энергией 100 эВ. Результаты расчетов NC1-4-NC10-4 свидетельствуют о том, что вышесказанное верно также для чувствительной ячейки Nb/CeB<sub>6</sub>/Nb при рабочей температуре 4 К. Отметим вытекающий из сравнения расчетов NC1-4, NC5-4 и NC10-4 результат. Увеличивая толщину термоэлектрика  $Z_2$ , можно увеличить параметр  $\Delta T_{\rm m}$ , который все-таки ненамного превышает уровень фона.

Обнадеживающие результаты были получены при исследовании процесса регистрации фотонов с энергией 0.9–11 эВ (ближний ИК–ближний УФ диапазон). Расчеты NC11-8–NC20-8 показывают, что эти фотоны может успешно регистрировать чувствительная ячейка Nb/CeB<sub>6</sub>/Nb. Значения параметра  $\Delta T_m$  в десятки и сотни раз превосходят фон, при этом скорость счета достигает десятков гигагерц. Сравнение характеристик расчетов NC11-8–NC13-8 для фотонов с энергией 10 эВ показывает, что при прочих равных условиях уменьшение толщины термоэлектрика с 0.1 мкм до 0.01 мкм не оказывает влияния на величину

параметра  $\Delta T_{\rm m}$ , однако скорость счета при этом возрастает на два порядка. Поэтому в расчетах NC13-8-NC20-8 для фотонов с энергией 0.9-11 эВ мы использовали одну и ту же величину параметра  $Z_2 = 0.01$  мкм. В этих расчетах одинаковы также толщины поглотителя и теплоотвода, т. е. расчеты NC13-8-NC20-8 проведены для одной и той же конструкции чувствительной ячейки TSPD. Зависимости параметров  $V_{\rm m}$  и R от энергии поглощенного фотона по результатам этих расчетов приведены на рис.3, из которого видно, что возникающее на сенсоре напряжение линейно увеличивается с увеличением энергии поглощенного фотона. Это очень важный результат, позволяющий определять энергию фотона по измеряемому в эксперименте значению параметра  $V_{\rm m}$ . С уменьшением энергии фотона несколько уменьшается параметр *t*<sub>b</sub> и увеличивается скорость счета, что логично, т. к. чем меньше энергия фотона, тем меньше выделяемое им в поглотителе количество тепла и меньше время, необходимое для перехода этого тепла в подложку. Аналогичные закономерности наблюдались ранее для трехслойной чувствительной ячейки с вольфрамовым абсорбером [14, 15] и сенсором FeSb<sub>2</sub> [32]. Можно сделать вывод, что, наблюдаемые закономерности являются общими для трехслойной конструкции чувствительной ячейки TSPD.



Рис.3. Зависимость параметров  $V_{\rm m}$  (1) и R (2) от энергии поглощенного фотона по данным расчетов NC13-8–NC20-8.

Сравнение параметров  $V_m$  расчетов NC13-8, NC14-8 и NC19-8, NC20-8 показывает, что при разнице энергий фотонов на 10% на уровне 10 и 1 эВ параметры  $V_m$  отличаются на 0.94 и 0.1 мкВ, соответственно. В наши дни можно с легкостью экспериментально измерять значения напряжения даже на порядки ниже вышеперечисленных. Таким образом, можно утверждать, что чувствительная ячейка Nb/CeB<sub>6</sub>/Nb обеспечивает энергетическое разрешение не хуже 1% для фотонов с энергией как 10, так и 1 эВ.

Значения параметров  $V_{\rm m}$  для расчетов NC1-4–NC10-4 (табл.2) для чувствительной ячейки Nb/CeB<sub>6</sub>/Nb с рабочей температурой 4 К меньше фонового значения 10<sup>-4</sup> К у всех расчетов кроме NC6-4 и NC10-4 для ячеек с толщиной термоэлектрического слоя 4 и 8 мкм. Однако и для этих ячеек параметр  $V_{\rm m}$  ненамного превосходит фон, а параметр  $t_{\rm m}$  возрастает до 149 пс. Низкие значения параметров  $V_{\rm m}$  и скорости счета, получаемые для этих расчетов, позволяют сделать заключение о неперспективности использования чувствительной ячейки Nb/CeB<sub>6</sub>/Nb с рабочей температурой 4 К для регистрации фотонов с энергией 100 эВ.

№ pac-	Z1,	$Z_2$ ,	Z3,	Ε,	$\Delta T_{\mathrm{m}},$	t <sub>m</sub> ,	Vm,	tь,	<i>R</i> ,	
чета	МКМ	МКМ	МКМ	эВ	$10^{-4} \mathrm{K}$	пс	мкВ	пс	ГГц	
Pb										
PC1-4	1	0.01	1	1000	0.091	7.2	0.001			
PC2-4	0.4	0.01	1	100	2,3	0.977	0.016	2.216	451	
PC3-4	0.15	0.01	1	10	6.9	0.234	0.048	0.839	1192	
PC4-4	0.1	0.01	1	1	1.805	0.116	0.013	0.266	3759	
PC5-4	0.15	0.02	1	10	15.5	0.245	0.109	1.179	848	
PC6-4	0.15	0.05	1	10	37	0.3315	0.259	1.805	554	
PC7-4	1	0.05	1	1000	0.465	7.5	0.003			
PC8-4	1	0.5	1	1000	2.77	12.6	0.019	37.5	27	
	YBCO									
YC3-4	0.1	0.01	1	10	8.2	1.8	0.057	12	83.3	
YC4-4	0.05	0.01	1	1	18.5	0.348	0.13	1.938	516	
YC5-4	0.08	0.01	1	10	39.9	0.9	0.279	36	27.8	
YC6-4	0.08	0.01	0.1	10	48	0.87	0.336	27	37	
YC7-4	0.08	0.01	0.01	10	81	0.93	0.567	25.8	38.8	

Табл.3. Характеристики чувствительных ячеек Pb/CeB<sub>6</sub>/Pb и YBCO/CeB<sub>6</sub>/YBCO

Характеристики чувствительных ячеек Pb/CeB<sub>6</sub>/Pb и YBCO/CeB<sub>6</sub>/YBCO с рабочей температурой 4 К приведены в табл.3. Обозначения столбцов такие же, как и в табл.2. Рассмотрим сначала результаты расчетов чувствительной ячейки Pb/CeB<sub>6</sub>/Pb. По результатам расчета PC1-4 для фотона с энергией 1 кэВ значения параметр  $\Delta T_{\rm m}$  меньше фонового. Увеличение толщины термоэлектрика  $Z_2$  в 5 раз (расчет PC7-4) увеличивает параметр  $\Delta T_{\rm m}$ , однако он остается меньше фонового значения, и только увеличиВ  $Z_2$  в 50 раз (расчет PC8-4), получаем  $\Delta T_{\rm m}$  выше фона и скорость счета 27 ГГц. При еще большем увеличении  $Z_2$  получим больший параметр  $\Delta T_{\rm m}$ , но проиграем в скорости счета.

Величина параметра  $\Delta T_m$  имеет значения выше фона для расчетов PC2-4 (100 эВ), PC3-4, PC5-4, PC6-4 (10 эВ) и PC4-4 (1 эВ). При этом параметр *R* расчетов PC3-4 и PC4-4 достигает нескольких терагерц. Здесь также увеличением толщины  $Z_2$  можно получить больший параметр  $\Delta T_m$ , проиграв при этом в скорости счета, что демонстрируют расчеты PC3-4, PC5-4 и PC6-4 для фотонов с энергией 10 эВ.



Рис.4. Временная зависимость  $\Delta T$  по данным расчетов YC3-4 (пунктирная кривая) и YC5-4 (сплошная кривая).

Расчеты в нижней части табл.3 показывают, что чувствительная ячейка YBCO/CeB6/YBCO может быть успешно применена для регистрации фотонов ИК и УФ диапазонов. Параметр  $\Delta T_{\rm m}$  расчетов YC3-4–YC7-4 выше фона, а скорость счета достигает десятков гигагерц. На рис.4 показана временная зависимость  $\Delta T$  по данным расчетов YC3-4 и YC5-4. На обеих кривых имеем максимум отклика в области до 5 пс с начала процесса. Затем наблюдается медленный спад сигнала до фонового значения, который обусловлен материалом и толщиной теплоотвода. Если уменьшить толщину  $Z_3$  в 10 и 100 раз (расчеты YC6-4 и YC7-4), которая для расчетов YC3-4–YC5-4 составляла 1 мкм, то можно достичь более высоких скоростей счета. Толщина  $Z_3$  может быть значительно уменьшена, т. к. в данной конструкции чувствительной ячейки основная функция этого слоя – служить сверхпроводящим контактом. Из табл.1 видно, что при 4 К теплопроводность YBCO в 300 раз меньше, чем у сапфира, и третий слой чувствительной ячейки YBCO/CeB<sub>6</sub>/YBCO является скорее тепловым затвором, чем теплоотводом.

# 3.2. Регистрация фотонов чувствительной ячейкой TSPD с сенсором (La,Ce)В<sub>6</sub>

Как видно из табл.1, гексаборид (La,Ce)В<sub>6</sub> имеет высокий коэффициент Зеебека при температуре 0.5 К. Именно при этой температуре будут рассматрены характеристики трехслойной чувствительной ячейкой TSPD с сенсором (La,Ce)В<sub>6</sub> и сверхпроводящими поглотителем и теплоотводом. Результаты расчетов приведены в табл.4, обозначения которой соответствуют табл.2. Рассмотрим сначала характеристики чувствительной ячейки Nb/(La,Ce)B<sub>6</sub>/Nb. При прочих равных условиях толщина сенсора уменьшается от 1 до 0.01 мкм в расчетах NLC1–NLC4 для фотонов с энергией 100 эВ. Кривые зависимостей  $\Delta T_m$  и *R* от толщины *Z*<sub>2</sub> представлены на рис.5. С уменьшением толщины сенсора параметр  $\Delta T_m$  уменьшается, а *R* – возрастает. Параметр  $\Delta T_m$  несколько мал при толщине сенсора 0.01 мкм, однако скорость счета достигает 222 ГГц. В любом случае, для решения конкретных задач, изменяя толщину сенсора, можно добиться больших значений как соотношения сигнал/шум, так и скорости счета.

Варьирование толщины теплоотвода (расчеты NLC7 и NLC8) не влияет на значения параметров  $\Delta T_{\rm m}$  и  $V_{\rm m}$ , однако скорость счета имеет несколько большие значения при малых величинах  $Z_3$ . Это не удивительно, так как теплопроводность сапфировой подложки значительно больше, чем у ниобиевого теплоотвода. Расчеты, представленные в табл.4 для фотонов с энергий 11 эВ и меньше, выполнены для толщины поглотителя 0.03 мкм. Такая толщина ниобиевого поглотителя обеспечивает поглощение фотонов в данном диапазоне энергий с вероятностью близкой к единице. Расчеты NLC11 и NLC13 показывают, что



Рис.5. Зависимость параметров  $\Delta T_{\rm m}$  (1) и R (2) от толщины термоэлектрика (расчеты NLC1–NLC4).

уменьшение толщины сенсора приводит для фотона с энергией 10 эВ к увеличению скорости счета, поэтому в дальнейших расчетах использовалась толщина  $Z_2 = 0.01$  мкм.

Расчеты NLC13–NLC15 проводились для случая поглощения фотонов с энергиями 9, 10 и 11 эВ. Параметр  $\Delta T_{\rm m}$  этих расчетов намного больше по сравнению со значением этого параметра для расчетов NLC1–NLC8, хотя при этом энергия фотона уменьшилась на порядок. Ситуация проясняется при учете изменения толщины поглотителя. При переходе от исследования фотонов с энергией 100 эВ на фотоны с энергией 10 эВ мы уменьшаем толщину поглотителя с 1 до 0.03 мкм. Из данных табл.4 для поглощения фотонов с энергией 9, 10 и 11 эВ значения параметра  $V_{\rm m}$  равны 42.66, 47.36 и 52.14 мкВ, соответственно. Разность

№ pac-	$Z_1$ ,	Z2,	Z3,	Ε,	$\Delta T_{\rm m},$	tm,	Vm,	tь,	<i>R</i> ,
чета	МКМ	МКМ	МКМ	эВ	$10^{-4}  \text{K}$	пс	мкВ	пс	ГГц
Nb									
NLC1	1	1	1	100	21.27	0.936	1.878	>130	<7.7
NLC2	1	0.5	1	100	21.27	0.936	1.878	55.5	18
NLC3	1	0.1	1	100	19.8	0.708	1.683	12.6	79
NLC4	1	0.01	1	100	3.21	0.366	0.273	4.5	222.2
NLC5	2	0.01	1	100	0.2	2.1	0.017	4.8	208.3
NLC6	0.5	0.01	1	100	56.8	0.012	4.828	4.2	239.1
NLC7	1	0.01	2	100	3.2	0.33	0.272	5.1	196.1
NLC8	1	0.01	0.5	100	3.2	0.33	0.272	3.6	277.8
NC11	0.03	0.1	1	10	560.2	0.0028	47.62	2.4	416.7
NC13	0.03	0.01	1	10	557.2	0.0026	47.36	1.53	653.6
NC14	0.03	0.01	1	9	501.9	0.0024	42.66	1.5	666.7
NC15	0.03	0.01	1	11	613.4	0.0024	52.14	1.554	643.5
NC16	0.03	0.01	1	7	390.3	0.0024	33.18	1.422	703.2
NC17	0.03	0.01	1	4	223.1	0.0024	18.96	1.248	801.3
NC18	0.03	0.01	1	1	55.8	0.0024	4.743	0.822	1216
NC19	0.03	0.01	1	0.9	50.2	0.0024	4.267	0.792	1262
NC20	0.03	0.01	1	1.1	61.3	0.0024	5.211	0.846	1182
Pb									
PLC1	1	0.01	1	1000	35.7	0.648	0.304	14.61	68.5
PLC2	0.4	0.01	1	100	886.7	0.066	7.537	1.626	615
PLC3	0.15	0.01	1	10	1287	0.03	10.94	0.528	1894
PLC4	0.1	0.01	1	1	1132	0.024	9.622	0.186	5376
YBCO									
YLC3	0.1	0.01	1	10	18.8	0.12	1.6	8.13	123
YLC4	0.05	0.01	1	1	89.3	0.0354	7.59	1.92	520.8

Табл.4. Характеристики чувствительной ячейки сверхпроводник/(La, Ce)В<sub>6</sub>/сверхпроводник

энергий 1 эВ на уровне 10 эВ соответствует напряжению 4.7 мкВ. Регистрация сигнала с точностью 0.47 мкВ обеспечит энергетическое разрешение 0.1 эВ. Одновременно, положительным является то, что параметр R расчетов NLC13–NLC15 составляет несколько сотен гигагерц.

Расчеты NLC13–NLC20 проводились с аналогичными размерами элементов чувствительной ячейки. Наблюдаемая, также как и представленная на рис.3, линейная зависимость Vm(E) показывает, что измеренный в эксперименте параметр Vm может быть использован для точного определения энергии поглощенного фотона и в случае чувствительной ячейки Nb/(La, Ce)B6 /Nb.

Согласно данным табл.4, для ИК-фотонов с энергиями 1.1, 1 и 0.9 эВ (расчеты NLC18–NLC20) параметр Vm равен 5.211, 4.743 и 4.267 мкВ, соответственно. Таким образом, разность энергий 0.1 эВ на уровне 1 эВ соответствует разности параметров Vm на 0.468 мкВ. Можно утверждать, что для ИК-фотонов точность оценки энергии фотона также может быть лучше 1%, а скорость счета чувствительной ячейки Nb/(La, Ce)B<sub>6</sub>/Nb может достигать нескольких терагерц.

Далее рассмотрим результаты компьютерного моделирования регистрации фотонов с использованием в чувствительной ячейке сверхпроводников Pb и YBCO. Геометрические размеры чувствительных ячеек Pb/(La,Ce)B<sub>6</sub>/Pb, YBCO/(La,Ce)B<sub>6</sub>/YBCO и результаты расчетов представлены в табл.4. Поверхность поглотителя также имеет размеры X = Y = 10 мкм и материалом подложки является Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Расчеты, представленные в табл.4 для фотонов с энергией 1 кэВ (PLC1)-



Рис.6. Зависимость от энергии фотона параметров  $V_m(1)$  и R(2) для чувствительных ячеек Nb/(La,Ce)B<sub>6</sub>/Nb (пунктирные линии) и Pb/(La, Ce)B<sub>6</sub>/Pb (сплошные линии).

1 эВ (PLC4), выполнены для толщин поглотителя 1–0.01 мкм. Как упоминалось выше, такие толщины свинцового поглотителя обеспечивают высокую вероятность поглощения фотонов в этом диапазоне энергий. Рассмотрение данных табл.4 для Pb/(La,Ce)B<sub>6</sub>/Pb позволяет заключить, что параметры  $V_m$  и R достигают значений, которые дают возможность уверенно регистрировать одиночные фотоны с энергией в диапазоне 1–1000 эВ, обеспечивая скорость счета от десятков гигагерц до терагерц. Из сравнения параметров  $V_m$  и R для чувствительных ячеек Nb/(La,Ce)B<sub>6</sub>/Nb и Pb/(La,Ce)B<sub>6</sub>/Pb для всех рассмотренных энергий, а параметр  $V_m$  выше для энергий фотонов 1 и 100 эВ. Согласно расчетам регистрации фотонов с энергией 10 эВ, параметр  $V_m$  выше для чувствительной ячейки Nb/(La, Ce)B<sub>6</sub>/Nb.

В табл.4 представлены также результаты компьютерного моделирования для детектирования фотонов 10 и 1 эВ с использованием сверхпроводников YBCO. Можно утверждать, что чувствительная ячейка YBCO/(La,Ce)B<sub>6</sub>/YBCO также может быть использована для обнаружения УФ- и ИК-фотонов с высокой эффективностью, энергетическим разрешением и скоростью счета.

#### 4. Заключение

На основе полученных результатов сделаны следующие выводы. Во-первых, трехслойная чувствительная ячейка TSPD, в которой в качестве термоэлектрического слоя используется гексаборид (La,Ce) $B_6$  или Ce $B_6$ , а поглотителем и теплоотводом служат сверхпроводники Nb, Pb или YBCO, может регистрировать одиночные фотоны в широком диапазоне электромагнитного спектра от ИК до рентгеновского, обеспечивая энергетическое разрешение не менее 1% и скорость счета выше десятков гигагерц. Во-вторых, соотношением энергетическое разрешение/скорость счета можно варьировать, изменяя геометрические размеры и материалы элементов чувствительной ячейки. В-третьих, принимая во внимание преимущества термоэлектрического детектора, такие как простая конструкция, высокое пространственное разрешение и отсутствие строгих требований к поддержанию рабочей температуры, можно утверждать, что термоэлектрические детекторы с многослойной чувствительной ячейкой, содержащей сверхпроводящие слои, могут быть реальными конкурентами сверхпроводящих нанопроволочных детекторов с рекордными характеристиками.

Следует отметить, что использование сверхпроводников при конструировании чувствительной ячейки TSPD, наряду с решением основной задачи – снижение электрического сопротивления измерительной цепи по сравнению с сопротивлением термоэлектрического слоя, решает проблему оптимизации конструкции контактов для подключения датчика к электронике. Отметим также, что при увеличении площади поверхности чувствительной ячейки по сравнению с использованными в данной работе размерами может быть достигнута более высокая скорость счета.

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

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. R.H. Hadfield. Nature Photonics, 3, 696 (2009).
- 2. T. Yamashita, S. Miki, H. Terai. IEICE Transactions on Electronics, E100-C, 274 (2017).
- 3. A. Gulian, K. Wood, D. van Vechten, G. Fritzdet. J. Mod. Opt., 51, 1467 (2004).
- 4. В.А. Петросян. Известия НАН Армении, Физика, 46, 194 (2011).
- 5. 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).
- 6. 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).
- A. Gulian, K. Wood, D. van Vechten, G. Fritz, H.-D. Wu, S. Bounnak, K. Bussman, K. Winzer, S. Kunii, V. Gurin, M. Korsukova, C. Mitterer, M. Carlsson, F. Golf, A. Kuzanyan, G. Badalyan, S. Harutyunyan, S. Petrosyan, V. Vardanyan, T. Paronyan, V. Nikoghosyan. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., A520, 36 (2004).
- 8. A.A. Kuzanyan. Nano Studies, 9, 93 (2014).
- 9. A. Kuzanyan, V. Nikoghosyan, A. Kuzanyan. Proc. SPIE, 9504, 950400 (2015).
- 10. A. Kuzanyan, V. Nikoghosyan, A. Kuzanyan. Sensors & Transducers, 191, 57 (2015).
- 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. Кузанян, А.С. Кузанян, В.Р. Никогосян, В.Н. Гурин, М.П. Волков. Известия НАН Армении, Физика, **51**, 244 (2016).
- A.A. Kuzanyan, A.S. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan. Sensors & Transducers, 207, 21 (2016).
- 15. **А.А. Кузанян.** Известия НАН Армении, Физика, **51**, 484 (2016).
- 16. A. Kuzanyan, A. Kuzanyan, V. Nikoghosyan. Armenian Patent, no. 3043, 2016.
- 17. C.P. Poole. Handbook of Superconductivity. San Diego, Academic Press, 2000.
- Y. Peysson, C. Ayache, B. Salce, J. Rossat-Mignod, S. Kunii, T. Kasuya. J. Magnetism and Magnetic Materials, 47&48, 63 (1985).
- 19. Y. Peysson, C. Ayache, B. Salce. J. Magnetism and Magnetic Materials, 59, 33(1986).
- 20. H.A. Leupold, H.A. Boorse. Phys. Rev., 134, 5A (1964).
- 21. S.M. Wasim, N.H. Zebouni. Phys. Rev., 187, 10 (1969).
- 22. Л.П. Межов-Деглин. ЖЭТФ, 77, 733 (1979).
- 23. https://www.bnl.gov/magnets/staff/gupta/cryogenic-data-handbook/Section8.pdf
- 24. K.A. Moler, D.J. Baar, R. Liang, W.N. Hardy, A. Kapitulnik. arXiv:condmat/9505129v1.
- 25. C. Uher. Physical Properties of High Temperature Superconductors, D.M. Agrinsberg (Ed.). Singapore, Word Scientific, pp. 3; 159, 1992.
- G.T. Furukawar, T.B. Douglasr, R.E. McCoske Yr, D.C. Ginnings. J. Research National Bureau Stand., 57, 67 (1956).
- 27. http://www.phys.ufl.edu/ireu/IREU2013/pdf\_reports/Allen\_Scheie\_FinalReport.pdf
- 28. S. Alterovitz, G. Deutscher, M. Gershenson. J. Appl. Phys., 46, 3637 (1975).
- 29. https://www.bnl.gov/magnets/staff/gupta/cryogenic-data-handbook/Section8.pdf

- 30. A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan. Proc. SPIE, 10229, 102290P (2017).
- 31. C.T. Chantler. J. Phys. Chem. Ref. Data, 24, 1 (1995).
- 32. А.А. Кузанян, В.Р. Никогосян, А.С. Кузанян. Известия НАН Армении, Физика, 52, 341 (2017).

#### ՄԻԱՖՈՏՈՆ ՋԵՐՄԱԷԼԵՏՐԱԿԱՆ ԴԵՏԵԿՏՈՐԻ ԳԵՐՀԱՂՈՐԴԻՉ ՇԵՐՏԵՐ ՊԱՐՈՒՆԱԿՈՂ ԵՌԱՇԵՐՏ ՉԳԱՅՈՒՆ ՏԱՐՐՈՒՄ ՋԵՐՄՈՒԹՅԱՆ ՏԱՐԱԾՄԱՆ ՊՐՈՑԵՄՆԵՐԻ ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՈՒՄ

#### Ա.Ա. ԿՈԻՉԱՆՅԱՆ, Վ.Ռ. ՆԻԿՈՂՈՍՅԱՆ, Ա.Ս. ԿՈԻՉԱՆՅԱՆ

Ներկայացված են ջերմաէլեկտրական դետեկտորի գերհաղորդիչ ջերտեր պարունակող եռաշերտ զգայուն տարրում 1–1000 էՎ էներգիայով միակի ֆոտոնների կլանման արդյունքում առաջացած ջերմության տարածման պրոցեսների համակարգչային մոդելավորման արդյունքները։ Դիտարկել են CeB<sub>6</sub> կամ (La,Ce)B<sub>6</sub> ջերմաէլեկտրական տվիչ, Nb, Pb կամ YBCO գերհաղորդիչ ջերմատար և կլանիչ պարունակող զգայուն տարրի տարբեր երկրաչափություններ։ Հաշվարկները հիմնված են սահմանափակ ծավալից ջերմության տարածման հավասարման վրա և իրականացվում են դիֆերենցիալ հավասարումների եռաչափ մատրիցային մեթոդով։ Ցույց է տրված, որ զգայուն տարրի նյութերի և չափերի, ինչպես նաև դետեկտորի աշխատանքային ջերմաստիձանի փոփոխությամբ հնարավոր է ստանալ սպեկտրի տվյալ տիրույթում, պահանջվող էներգետիկ լուծաչափով և հաշվարկի արագությամբ ֆոտոնների գրանցման դետեկտոր։ Նման դետեկտորը ունի մի շարք առավելություններ, որոնք թույլ են տալիս դիտարկել ջերմաէլեկտրական դետեկտորը որպես առավել հեռանկարային միաֆոտոնային դետեկտորների իրական այլընտրանք։

## SIMULATION OF HEAT PROPAGATION PROCESSES IN THE DETECTION PIXEL WITH SUPERCONDUCTING LAYERS OF SINGLE-PHOTON THERMOELECTRIC DETECTOR

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

The results of computer simulation of heat propagation processes in the three-layer detection pixel with superconducting layers of thermoelectric detector after the absorption of single photons of 1-1000 eV energy are presented. We considered different geometries of the detection pixel consisting of CeB<sub>6</sub> or (La,Ce)B<sub>6</sub> thermoelectric sensor, absorber and heat sink from Nb, Pb or YBCO superconductors. The calculations based on the heat conduction equation from the limited volume are carried out by the three-dimensional matrix method for differential equations. It is shown, that by changing materials and sizes of the detector for the registration of photons within the given spectral range with the required energy resolution and count rate. Such detector has a number of advantages, that allow to consider the thermoelectric detector as a real alternative to the most promising single photon detectors.