

УДК 536.2

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА В СЕНСОРЕ $W/(La,Ce)B_6/W$ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДЕТЕКТОРА

А.А. КУЗАНЯН

Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак, Армения

e-mail: astghik.kuzanyan@gmail.com

(Поступила в редакцию 15 июня 2016 г.)

Представлены результаты компьютерного моделирования процессов распространения тепла в многослойном $W/(La,Ce)B_6/W$ сенсоре термоэлектрического детектора после поглощения одиночного фотона с энергией в диапазоне 1–100 эВ. Подробно изучено влияние параметров компьютерного моделирования на выявление особенностей процессов теплопереноса, протекающих в сенсоре детектора в зависимости от энергии фотона, геометрии сенсора, области поверхности поглотителя, в которой поглотился фотон и глубины, на которой произошла термализация фотона. Оценены энергетическое разрешение и скорость счета сенсора. Показано, что многослойный сенсор с термоэлектриком $(La,Ce)B_6$ способен при температуре 0.5 К регистрировать одиночный фотон в широкой области электромагнитного спектра, он имеет ряд преимуществ по сравнению с сенсором на основе CeB_6 , рабочая температура которого 9 К, и перспективен для использования в науке и технике.

1. Введение

Однослойный сенсор термоэлектрического однофотонного детектора подробно исследовался в работах [1–5]. Он содержит поглотитель и теплоотвод из тяжелого металла, которые нанесены на диэлектрическую подложку и соединены друг с другом термоэлектрическим мостиком. Сенсор термоэлектрического однофотонного детектора не требует источника питания, он максимально прост и обеспечивает возможность создания детекторной матрицы из множества элементов с простой электронной структурой. Результаты исследований методом компьютерного моделирования процессов распространения тепла в однослойном сенсоре термоэлектрического однофотонного детектора, содержащего термоэлектрик $(La,Ce)B_6$ или CeB_6 , выявили закономерности зависимости энергетического разрешения и скорости счета от геометрических размеров компонентов сенсора [6–9]. Было также показано, что форма временной зависимости возникающего на сенсоре сигнала зависит от области поглотителя, в которой произошло поглощение фотона. Поэтому была предложена концепция многослойного

сенсора, которая лишена этого недостатка [10]. Подробные исследования свойств многослойного сенсора W/CeB₆/W для случаев поглощения фотона с энергией 100 эВ и 1 кэВ представлены в [11]. Исследования показали, что генерируемый сенсором сигнал не зависит от расположения области термализации фотона в поглотителе (за исключением краев сенсора), выявили независимость амплитуды генерируемого сигнала от площади сенсора, в то время как увеличение площади сенсора приводит к возрастанию скорости счета фотонов.

Настоящая работа продолжает исследования многослойного термоэлектрического сенсора W/(La,Ce)B₆/W. Рассматриваются характеристики сенсора при поглощении фотонов с энергиями от 1 до 100 эВ. Целью работы является также выявление влияния используемых при компьютерном моделировании параметров на полученные результаты.

2. Методика компьютерного моделирования

Расчеты проводились на основе уравнения распространения тепла из ограниченного объема с использованием трехмерного матричного метода. Подробности использованных подходов и приближений приведены в [7]. Там отмечалось, что точность результатов компьютерного моделирования зависит от таких параметров, как размер зоны термализации фотона, шаг изменения размеров зоны термализации (Δx , Δy , Δz) и шаг расчета по времени Δt . В данной работе изменение этих параметров будет осуществлено в широких пределах с целью выявления их влияния на результаты компьютерного моделирования.

Конструкция многослойного сенсора подробно описана в [11]. В настоящей работе рассматривается многослойный сенсор, в котором поглотитель и теплоотвод выполнены из вольфрама (W), термоэлектрический слой из гексаборида лантана–церия (La,Ce)B₆ и подложка из сапфира. Высокий термоэлектрический КПД соединения (La,Ce)B₆ достигается при 0.5 К. Значения использованных в расчетах физических величин для W, (La,Ce)B₆ и Al₂O₃ при температуре 0.5 К, выбранной в качестве рабочей, приведены в табл. 1.

Табл. 1. Параметры использованных материалов при 0.5 К

Параметр	Материал		
	W	(La,Ce)B ₆	Al ₂ O ₃
Плотность ρ , кг/м ³	19250	4800	4000
Удельная теплоемкость c , Дж/кг×К	2.6×10^{-3}	0.196	9.8×10^{-4}
Теплопроводность λ , Вт/м×К	735	0.94	40
Коэффициент Зеебека S , мкВ/К	—	85	—

Ранее нами было показано, что фотоны с энергией 100 эВ (жесткий УФ) поглощаются с $\sim 100\%$ вероятностью в вольфрамовом поглотителе толщиной 0.5 мкм [6]. Для фотонов с энергией 10 эВ и меньше (от мягкого УФ до ИК) эта толщина составляет 0.1 мкм. Именно эти толщины поглотителя использованы в расчетах в качестве минимальных.

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Регистрация фотонов с энергией 100 эВ

3.1.1. Поглощение фотонов в центре поглотителя

Рассмотрим поглощение фотонов с энергией 100 эВ в геометрическом центре поверхности поглотителя. Исследования временной зависимости возникающей на термоэлектрическом слое разности температур (ΔT) в различных областях сенсора W/CeB₆/W показали, что наибольшие значения ΔT достигаются в центре сенсора непосредственно под местом термализации фотона [17]. Для сенсора W/(La,Ce)B₆/W наблюдается аналогичная картина. Электрический сигнал сенсора соответствует максимальной разности температур на термоэлектрике. Поэтому в дальнейшем будем сравнивать зависимости $\Delta T(t)$, рассчитанные для области, находящейся непосредственно под зоной термализации фотона.

Результаты расчетов процессов распределения тепла в сенсоре W/(La,Ce)B₆/W для фотонов с энергией ~ 100 эВ приведены в табл.2. Размеры поверхности сенсора составляли $x = y = 10$ мкм, зоны термализации фотона – $0.8 \times 0.6 \times 0.4$ мкм³ и толщина поглотителя – 0.5 мкм. Принималось, что фотон попадает в центр поверхности поглотителя и термализуется на глубине 0.2 мкм. В табл.2 приведены: номер расчета, толщина слоя термоэлектрика z_t , шаг расчета по $z - \Delta z$, шаг расчета по времени Δt , толщина теплоотвода z_{hs} , энергия фотона E , максимальное значение разности температур ΔT_m , время достижения максимальной разности температур, прошедшее с момента поглощения фотона t_m , максимальная величина возникающей на сенсоре разности потенциала U_m , время спада сигнала t_b до фонового значения разности температур $\Delta T = 10^{-4}$ К и обратная ей величина (скорость счета) R . Величина U_m рассчитывалась с использованием среднего по литературным данным значения коэффициента Зеебека для гексаборида (La,Ce)B₆ при 0.5 К (табл.1). Также принималось, что максимальная разность потенциала будет соответствовать максимальной разности температур, возникающей по всей поверхности термоэлектрического слоя, независимо от места вывода электрических контактов с поглотителя фотонов и теплоотвода к регистрирующему устройству.

В верхней части таблицы расположены расчеты (1М–7аМ) характеристик сенсоров с различной толщиной термоэлектрического слоя. На рис.1 приведены

временные зависимости $\Delta T(t)$ для представленных в табл.2 расчетов 1М–1сМ, соответствующих толщине термоэлектрика 1 мкм и параметру расчета $\Delta z = 0.1$ мкм. Расчеты проводились с временным шагом Δt : 1М – 0.3 пс, 1аМ – 0.015 пс, 1bМ – 0.001 пс и 1сМ – 0.00005 пс. По приведенным в таблице и рисунке данным видно, что временные зависимости ΔT для толщины термоэлектрического слоя 1 мкм при разных значениях параметра Δt ощутимо отличаются лишь при малых временах (вставка на рис.1), а после достижения максимума кривые практически совпадают. Значения параметров ΔT_m , U_m , $t\Delta T_m$ расчетов 1bМ и 1сМ отличаются мало (табл.2). Можно сделать заключение, что использование в расчетах параметра Δt меньше 0.001 пс может лишь незначительно уточнить характеристики сенсора, но не может изменить их существенно. Существенное изменение характеристик сенсора происходит при уменьшении в расчетах параметра Δz , что видно из табл.2 при сравнении расчетов 1сМ ($\Delta z = 0.1$ мкм) и 1dМ ($\Delta z = 0.001$ мкм). Параметр ΔT_m при этом уменьшается от 1.0302 К до 0.6908 К, т. е. на 31%. Отметим, что это существенное изменение, и продолжим рассмотрение приведенных в табл.2 данных.

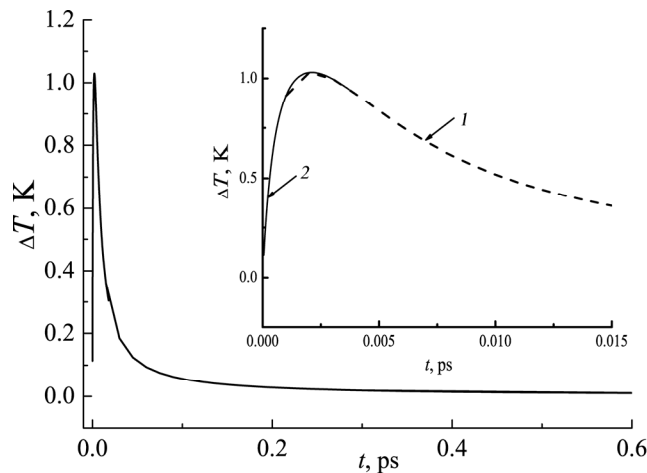


Рис.1. Временная зависимость разности температур ΔT на границах поглотитель–термоэлектрик и термоэлектрик–теплоотвод для толщины термоэлектрического слоя 1 мкм (расчеты 1М–1сМ). На вставке шаг по времени Δt равен: 1 – 0.001 пс, 2 – 0.00005 пс.

Полученные при рассмотрении расчетов серии 1М закономерности реализуются также и в расчетах серий 2М ($z_t = 0.5$ мкм), 3М ($z_t = 0.1$ мкм) и 4М ($z_t = 0.01$ мкм). Дополнительной информацией является то, что с уменьшением толщины термоэлектрика значение ΔT_m не изменяется, а скорость счета растет (рис.2). Скорость счета увеличивается особенно резко, когда толщина термоэлектрика становится меньше 0.1 мкм.

Табл.2. Характеристики W/(La,Ce)B₆/W сенсора при поглощении фотона в центре поглотителя

Номер расчета	z_i , мкм	Δz , мкм	Δt , пс	z_{hs} , мкм	E , эВ	ΔT_m , К	$t\Delta T_m$, пс	U_m , мкВ	t_b , пс	R , ГГц
1M	1	0.1	0.3	1	100	>0.0189	<0.3	>1.6	1860	0.54
1aM	1	0.1	0.015	1	100	>0.3609	<0.015	>30.68		
1bM	1	0.1	0.001	1	100	1.0296	0.002	87.516		
1cM	1	0.1	0.00005	1	100	1.0302	0.0021	87.567		
1dM	1	0.001	0.00005	1	100	0.6908	0.0015	58.718		
2M	0.5	0.1	0.3	1	100	>0.0189	<0.3	>1.6	862.2	3.16
2aM	0.5	0.1	0.015	1	100	>0.3609	<0.015	>30.68		
2bM	0.5	0.1	0.001	1	100	1.0296	0.002	87.516		
2cM	0.5	0.001	0.00005	1	100	0.6908	0.0015	58.718		
3M	0.1	0.01	0.3	1	100	>0.0163	<0.3	>1.38	18.9	52,9
3aM	0.1	0.01	0.001	1	100	1.0211	0.002	86.794		
3bM	0.1	0.01	0.00005	1	100	1.0214	0.002	86.819		
3cM	0.1	0.001	0.00005	1	100	0.6908	0.0015	58.718		
4M	0.01	0.001	0.3	1	100	>0.0189	<0.3	>1.6	0.6	1666
4aM	0.01	0.001	0.015	1	100	>0.3609	<0.015	>30.68	0.465	2150
4bM	0.01	0.001	0.001	1	100	0.6818	0.002	57.953	0.472	2119
4cM	0.01	0.001	0.00005	1	100	0.6908	0.0015	58.718		
5M ¹⁾	0.01	0.001	0.001	1	100	0.6711	0.002	57.044	0.478	2092
6M	0.01	0.0005	0.001	1	100				0.519	1927
6aM	0.01	0.0005	0.00005	1	100	0.4770	0.0014			
7M	0.01	0.0001	0.001	1	100					
7aM	0.01	0.0001	0.00005	1	100	0.4770	0.0014			
8M	0.01	0.001	0.001	1.5	100	0.6818	0.002	57.953	0.54	1852
9M	0.01	0.001	0.001	2	100	0.6818	0.002	57.953	0.57	1754
10M	0.01	0.001	0.001	5	100	0.6818	0.002	57.953	0.75	1333
11M	0.01	0.001	0.001	5	110	0.7499	0.002	63.742	0.78	1282
12M	0.01	0.001	0.001	5	90	0.6136	0.002	52.156	0.72	1388
13M	0.05	0.005	0.001	1	100	0.9969	0.002	84.737	4.5	222
14M	0.05	0.005	0.001	1	110	1.0965	0.002	93.203	4.8	208
15M	0.05	0.005	0.001	1	90	0.8972	0.002	76.262	4.5	222
16M	0.01	0.001	0.001	1	99	0.6750	0.002	57.375	0.465	2150
17M	0.01	0.001	0.001	1	101	0.6886	0.002	58.531	0.474	2110

¹⁾ Размеры зоны термализации $0.8 \times 0.8 \times 0.3$ мкм³.

Полученные результаты легко объяснить с учетом того факта, что у термоэлектрика (La,Ce)B₆ коэффициент теплопроводности значительно меньше, чем у W (табл.1). Термоэлектрический слой является препятствием для распространения тепла в перпендикулярном к поверхности сенсора направлении, и чем

меньше толщина этого слоя, тем быстрее выравнивается разность температур на его границах и достигается большая скорость счета. Для сравнения на рис.2 (кривая 2) приведены значения скорости счета сенсора W/CeB₆/W. Как видно, сенсор W/(La,Ce)B₆/W при малых толщинах термоэлектрического слоя обладает значительно большей скоростью счета фотонов с энергией 100 эВ.

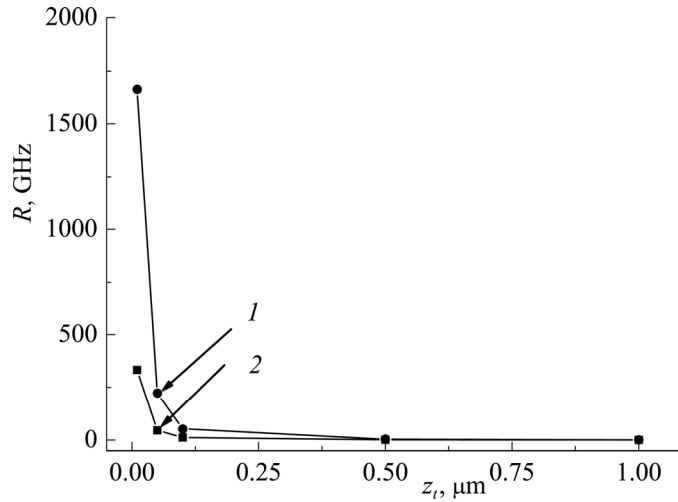


Рис.2. Зависимость скорости счета от толщины термоэлектрического слоя: 1 – по расчетам 1М–4М (для параметра $\Delta t = 0.3$ пс) и 13М, 2 – данные сенсора W/CeB₆/W [11].

Значение параметра ΔT_m не зависит от толщины термоэлектрика, если эта толщина не очень мала, а определяется энергией поглощенного фотона и объемом поглотителя, в который проникает тепло из зоны термализации за промежуток времени $t\Delta T_m$. Этим объясняется зависимость ΔT_m от параметра расчета Δz . По той же причине незначительно, но отличаются характеристики сенсора расчета 5М ($\Delta T_m = 0.6711$ К) от характеристик расчета 4bМ ($\Delta T_m = 0.6818$ К). Эти два расчета, при прочих равных параметрах, отличаются размерами зоны термализации.

Расчеты 6М и 7М в табл.2 показывают как изменятся характеристики сенсора, если параметр Δz уменьшить в 2 и 10 раз. Расчеты 6aМ ($\Delta z = 0.001$ мкм) и 4сМ ($\Delta z = 0.0005$ мкм) отличаются только значением параметра Δz . Уменьшение Δz в 2 раза приводит к уменьшению значения максимального сигнала ΔT_m от 0.6908 К до 0.4770 К (изменение на 31%). При уменьшении Δz еще в 5 раз (расчет 7aМ) значение ΔT_m не изменяется. Можно заключить, что использование в расчетах значений параметра $\Delta z = 0.001$ мкм является достаточно хорошим приближением, которое не может приводить к большим ошибкам. Напомним, что чем меньше параметры Δz и Δt , тем продолжительнее процесс расчета при одинаковой производительности компьютера.

Расчеты 8М–10М вместе с расчетом 4бМ показывают, что, при прочих равных условиях, увеличение толщины теплоотвода от 1 мкм до 5 мкм без изменения значения ΔT_m приводит к увеличению значения t_b , т. е. времени спада ΔT до фонового значения 10^{-4} К, и уменьшению скорости счета от 2119 ГГц до 1333 ГГц. Факт того, что сенсор реально готов к регистрации следующего фотона при таком выборе фонового значения ΔT , становится очевидным при рассмотрении рис.3, где приведены временные зависимости температур на границе поглотитель–термоэлектрик, термоэлектрик–теплоотвод и их разности – параметр ΔT (расчет 4М). При спаде параметра ΔT до фонового значения температура на обеих границах отличается от начальной температуры сенсора всего на 4 мК.

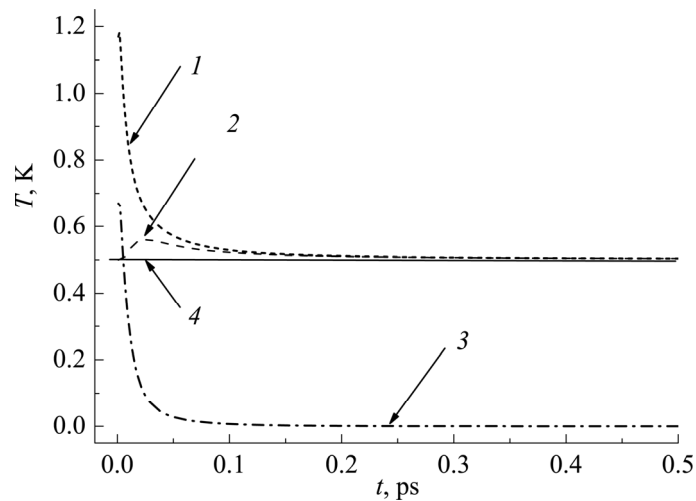


Рис.3. Временная зависимость температур на границах поглотитель–термоэлектрик (1) и термоэлектрик–теплоотвод (2), разности температур между ними (3) по данным расчета 4М и рабочая температура сенсора 0.5 К (4).

Следующие три группы расчетов (10М–12М, 13М–15М, 16М–17М) в табл.2 выявляют зависимость характеристик сенсора для случаев поглощения фотонов с несколько отличающимися от 100 эВ энергиями. Расчеты 10М–12М выполнены для энергий фотона 100 эВ, 110 эВ и 90 эВ при толщинах термоэлектрика 10 нм и теплоотвода 5 мкм. Увеличение энергии фотона на 10 эВ приводит к увеличению параметра U_m на 5.8 мкВ и уменьшению скорости счета на 50 ГГц. Для расчетов 13М–15М (толщины термоэлектрика 50 нм и теплоотвода 5 мкм) увеличение энергии фотона на 10 эВ приводит к увеличению параметра U_m на 8.5 мкВ и уменьшению скорости счета на 14 ГГц. Характеристики первой группы расчетов показывают, что такой сенсор привлекателен для решения задач, где желательно получить большие скорости счета, а второй группы – обеспечение больших значений сигнала.

Отметим, что сенсор $W/(La,Ce)B_6/W$, при одинаковых размерах слоев сенсора и параметрах расчета, обеспечивает получение значительно более высоких характеристик ΔT_m и U_m , чем сенсор $W/CeB_6/W$. Как показано в [11], поглощение фотонов с энергией 100 эВ в сенсоре $W/CeB_6/W$ приводит к появлению сигнала с характеристиками $\Delta T_m \sim 0.0337$ К и $U_m \sim 5$ мкВ, что значительно меньше приведенных в табл.2 для расчета 4сМ значений $\Delta T_m = 0.6818$ К и $U_m \sim 57.9$ мкВ. Эти характеристики отличаются также значительно для энергий поглощенного фотона 100 ± 10 эВ. Как указывалось выше, в случае сенсора $W/(La,Ce)B_6/W$ изменение значений этих характеристик составляет $U_m(100 \text{ К}) - U_m(90 \text{ К}) = 8.5$ мкВ и для сенсора $W/CeB_6/W - 0.55$ мкВ [11].

Завершается табл.2 расчетами 16М и 17М, демонстрирующими, что изменение энергии фотона в 1 эВ на уровне 100 эВ приведет к разнице параметра U_m на 1.2 мкВ.

3.1.2. Поглощение фотонов в различных областях поглотителя

Рассмотрим случаи попадания фотона не в центр поверхности поглотителя и его поглощения на большей, чем рассматривалось выше глубине в 0.2 мкм.

Табл.3. Характеристики $W/(La,Ce)B_6/W$ сенсора при поглощении фотона с энергией 100 эВ в различных областях поглотителя

номер расчета	$x, y, z,$ мкм	$\Delta x, \Delta y, \Delta z,$ мкм	$\Delta T_m,$ К	$t \Delta T_m,$ пс	$U_m,$ мкВ	$t_b,$ пс	$R,$ ГГц
4сМ	0, 0, 0.2	0.8×0.6×0.4	0.6908	0.0015	58.718	0.472	2119
18F ¹⁾	-4.5, -4.5, 0.2	0.8×0.6×0.4	0.7020	0.0017	59.67	0.945	1058
19F ¹⁾	-4.2, -4.2, 0.2	0.8×0.6×0.4	0.6908	0.0015	58.718	0.9011	1110
20F ¹⁾	-3.9, -3.9, 0.2	0.8×0.6×0.4	0.6808	0.0015	58.633	0.8304	1204
21F ¹⁾	-3.6, -3.6, 0.2	0.8×0.6×0.4	0.6908	0.0015	58.718	0.7293	1371
22N ¹⁾	0, -4.5, 0.2	0.8×0.6×0.4	0.6928	0.0015	58.888	0.6496	1539
23N ¹⁾	0, -4.2, 0.2	0.8×0.6×0.4	0.6908	0.0015	58.718	0.6293	1589
24N ¹⁾	0, -3.9, 0.2	0.8×0.6×0.4	0.6908	0.0015	58.718	0.5998	1667
25N ¹⁾	0, -3.6, 0.2	0.8×0.6×0.4	0.6908	0.0015	58.718	0.5626	1777
26M ²⁾	0, 0, 0.15	0.8×0.8×0.3	0.825	0.012	7.013	0.318	3145
27M ²⁾	0, 0, 0.25	0.8×0.8×0.3	0.985	0.009	8.373	0.315	3174
28M ²⁾	0, 0, 0.35	0.8×0.8×0.3	1.308	0.006	11.118	0.3135	3190
29M ²⁾	0, 0, 0.45	0.8×0.8×0.3	1.882	0.0045	15.997	0.311	3215

¹⁾ Толщина поглотителя 0.5 мкм и шаг расчета по времени 0.00005 пс.

²⁾ Толщина поглотителя 1 мкм и шаг расчета по времени 0.0015 пс.

В табл.3 приведены результаты расчетов при использовании следующих параметров: энергия фотонов 100 эВ, размеры поверхности сенсора 10×10 мкм², толщина термоэлектрика 10 нм, шаг расчета по z 1 нм и толщина теплоотвода 1 мкм. В табл.3, кроме параметров включенных в табл.2, приведены координаты центра зоны термализации x, y, z (начало координат расположено в центре поверхности поглотителя) и размеры зоны термализации $\Delta x, \Delta y, \Delta z$.

В первой строчке табл.3 повторены результаты расчета 4сМ, поглощение фотона с энергией 100 эВ в центре поверхности поглотителя. С этими данными проводится сравнение результатов новых расчетов. Расчеты 18F–21F выполнены для случаев поглощения фотона по диагонали поверхности поглотителя, начиная с угла поглотителя. Отметим, что характеристики ΔT_m и $t\Delta T_m$ только у расчета 18F отличаются от данных расчета 4сМ. Несколько иная картина получается для скорости счета. Она значительно ниже в случае термализации фотона в углу поглотителя и возрастает при приближении к центру, но остается меньше для всех расчетов F по сравнению с расчетом 4сМ.

Следующие 4 расчета в табл.3 (22N–25N) выполнены для случая поглощения фотона на прямой, проходящей через середину стороны квадрата поверхности поглотителя и центр. По характеристикам ΔT_m и $t\Delta T_m$ от 4сМ отличается только расчет 22N – поглощение фотона у самого края поглотителя. Скорость счета расчетов N несколько больше, чем расчетов F, но остается меньше, чем у 4сМ. Такое различие значений скорости счета расчетов M, N и F понятно. В случае расчетов M тепло в сенсоре рассеивается по всем направлениям, а в случае расчетов N область сенсора для распространения тепла меньше в 2 раза и в случае расчетов F – в 4 раза.

Вернемся к поглощению фотона в центре поверхности поглотителя и рассмотрим случаи термализации фотона на разной глубине (26M–29M). Отметим, что вероятность достижения фотона определенной глубины в поглотителе резко уменьшается по глубине. Рассмотрим случаи термализации вплоть до глубины 0.45 мкм, вероятность достижения которой у фотона близка к нулю. Из данных табл.3 видно, что при увеличении координаты Z центра зоны термализации, то есть приближения зоны термализации к термоэлектрическому слою, характеристика ΔT_m растет, а $t\Delta T_m$ – уменьшается, что логично. При этом скорость счета увеличивается. Однако более важно, что скорость счета сенсора по данным расчетов 26M–29M (толщина поглотителя 1 мкм) значительно больше, чем в случае поглотителя толщиной 0.5 мкм.

3.2. Регистрация фотонов с энергией 0.9–11 эВ

В табл.4 приведены результаты расчетов при следующих геометрических размерах сенсора и параметрах расчетов: толщины поглотителя, термоэлектрика и теплоотвода составляли 0.1 мкм, 0.01 мкм и 1 мкм, соответственно, размеры

Табл.4. Характеристики сенсора W/(La,Ce)B₆/W при поглощении фотона с энергией 0.9–11 эВ

Номер расчета	E , эВ	ΔT_m , К	$t \Delta T_m$, пс	U_m , мкВ	t_b , пс	R , ГГц
30М	11	1.0384	0.0004	88.264	13.55	74
31М	10	0.9440	0.0004	80.24	13.12	76
32М	9	0.8494	0.0004	72.2	12.61	79
33М	7	0.6608	0.0004	56.168	11.44	87
34М	4	0.3776	0.0004	32.1	8.82	113
35М	1.1	0.1038	0.0004	8.823	1.82	549
36М	1	0.0944	0.0004	8.024	1.31	763
37М	0.9	0.0849	0.0004	7.22	1.091	917

зоны термализации $0.4 \times 0.4 \times 0.04$ мкм³, шаг расчета по z 1 нм, при определении характеристик сенсора ΔT_m , $t \Delta T_m$ и U_m шаг расчета по времени составлял 0.00005 пс, а при определении t_b и R – шаг по времени был равен 0.001 пс.

Из данных табл.4 следует, что мы имеем достаточно большой сигнал по сравнению с предыдущими расчетами, хотя и уменьшили значительно энергию фотона. Это обусловлено тем, что для абсорбции фотона с вероятностью близкой к 1 требуется поглотитель меньшей толщины. Одновременно скорость счета имеет меньшие значения. Расчеты 30М–32М показывают, что на уровне 10 ± 1 эВ разность потенциалов на граничащих с поглотителем и теплоотводом поверхностях термоэлектрического слоя составляет 80.24 ± 8.032 мкВ. Эта характеристика может быть измерена с большим на порядок разрешением, т. е. сенсор

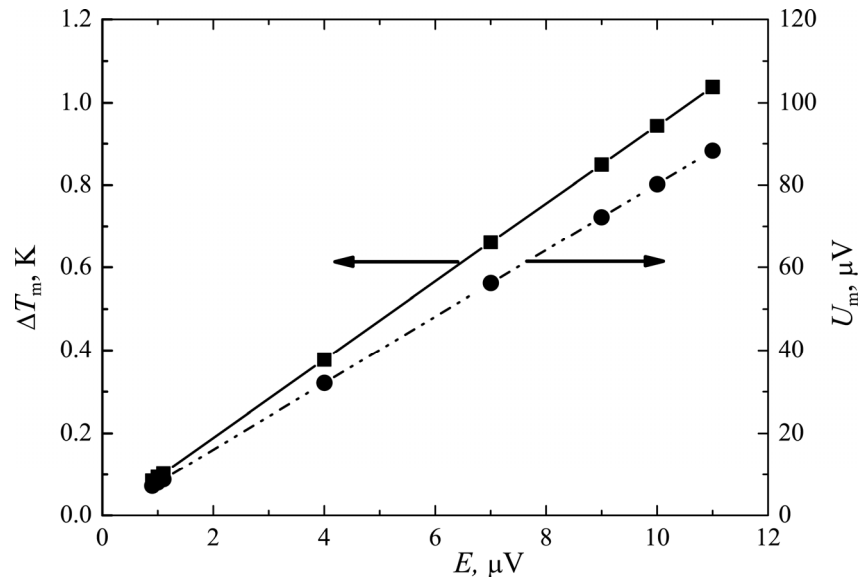


Рис.4. Зависимость характеристик ΔT_m и U_m сенсора W/(La,Ce)B₆/W от энергии поглощенного фотона.

может обеспечить разрешение 0.1 эВ на уровне 10 эВ. Чтобы измерять энергию фотона с разрешением 10% на уровне 1 эВ (расчеты 35М–37М) достаточно суметь измерить разность потенциалов 8.024 ± 0.8 мкВ, а для обеспечения энергетического разрешения 1% точность измерения ΔU должна быть не хуже 80 нВ.

Расчеты 30М–37М демонстрируют, что параметры сенсора ΔT_m и U_m линейно зависят от энергии поглощенного фотона (рис.4). Зависимости $\Delta T_m(E)$ и $U_m(E)$ задаются соответственно уравнениями $\Delta T_m = -2.7 \times 10^{-5} + 0.094E$, $U_m = -4.2 \times 10^{-4} + 8.024E$. Эти данные позволяют утверждать, что используя сенсор W/(La,Ce)B₆/W, как и в случае сенсора на CeB₆, можно определять энергию фотона по максимуму возникающего на сенсоре сигнала.

Из данных табл.4 видно, что характеристика $t\Delta T_m$, время достижения максимального значения сигнала, отсчитанное от момента начала процесса, одинакова для всех расчетов. В отличие от этого характеристики t_b и R (рис.5) зависят от энергии поглощенного фотона. Зависимость $t_b(E)$ можно представить в виде полинома $t_b = 3.3199 + 5.5294E - 0.8615E^2 + 0.0673E^3 - 0.002E^4$. Зависимость $R(E)$ аппроксимируется гиперболой $R = 74E/(-0.9 + E)$.

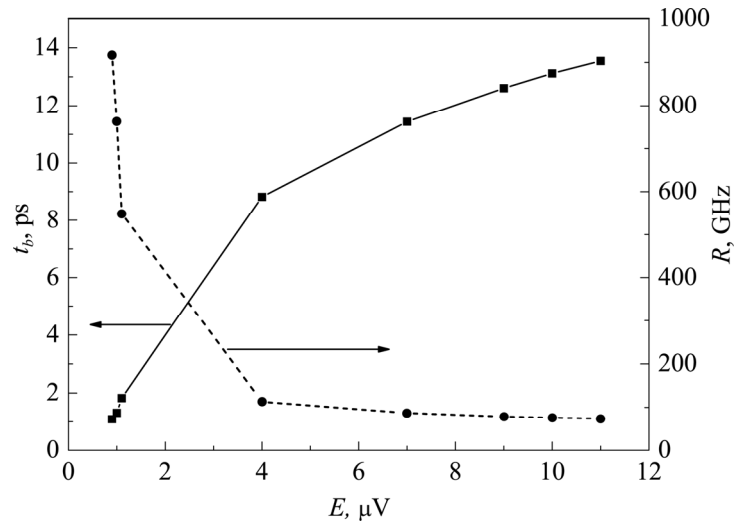


Рис.5. Зависимость времени спада сигнала до фонового значения t_b и скорости счета R от энергии поглощенного фотона.

Из рис.5 видно, что время спада сигнала до фонового значения больше для фотонов с большей энергией. Это вполне логично, т. к. чем больше энергия фотона, тем большее количество тепла образуется в поглотителе в результате его термализации и тем дольше будет продолжаться спад сигнала до фонового значения. В соответствии с этим, скорость счета будет уменьшаться, что мы и видим на рис.5.

4. Заключение

Исследовано влияние параметров компьютерного моделирования на выявление особенностей процессов распространения тепла в многослойном сенсоре термоэлектрического детектора. Показано, что пространственный шаг расчета в 1 нм и временной шаг в 1 фс обеспечивают достаточно хорошее приближение при расчете таких характеристик сенсора, как амплитуда сигнала и скорость счета. Выявлено, что $W/(La,Ce)B_6/W$ сенсор термоэлектрического однофотонного детектора способен обеспечить регистрацию одиночного фотона и определить его энергию в широкой области электромагнитного спектра от ИК до жесткого УФ.

Проведено сравнение характеристик многослойного сенсора с термоэлектрическим слоем из $(La,Ce)B_6$ и CeB_6 . Показано, что в обоих случаях генерируемый сенсором сигнал не зависит от расположения области термализации фотона в поглотителе, за исключением краев сенсора. Одновременно, при прочих равных условиях, сенсор $W/(La,Ce)B_6/W$ обеспечивает получение большего по амплитуде сигнала и большей скорости счета.

Сенсоры с термоэлектриками $(La,Ce)B_6$ и CeB_6 имеют рабочую температуру 0.5 К и 9 К, соответственно. Более низкие температуры обеспечивают более высокие значения параметра сигнал/шум, но одновременно требуют для работы применения более сложного и дорогого в эксплуатации оборудования. Вместе они предоставляют пользователям возможность выбрать более подходящий вариант для решения конкретной задачи.

Автор выражает благодарность А.С. Кузаныну и А.М. Гуляну за интерес к работе и полезные замечания, В.Р. Никогосяну за помощь в проведении расчетов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке ГКН МОН РА (Армения) и РФФИ (Российская Федерация) в рамках совместных научных программ 15RF-018 и 15-53-05047, соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. **K. Wood, D. Van Vechten, G. Fritz et al.** Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., **A 520**, 56 (2004).
2. **A. Gulian, K. Wood, D. Van Vechten et al.** Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., **A 520**, 36 (2004).
3. **A. Gulian, K. Wood, D. Van Vechten, G. Fritz et al.** J. Mod. Opt., **51**, 1467 (2004).
4. **В.А. Петросян.** Известия НАН Армении, Физика, **46**, 194 (2011).
5. **A.A. Kuzanyan, V.A. Petrosyan, A.S. Kuzanyan.** J. Mod. Phys. Conf. Ser., **350**, 012028 (2012).
6. **A.A. Kuzanyan, A.S. Kuzanyan.** Proc. SPIE, **8773**, 87730L-1(2013).
7. **A.A. Kuzanyan.** Nano Studies, **9**, 93 (2014).
8. **A. Kuzanyan, V. Nikoghosyan, A. Kuzanyan.** Proc. SPIE, **9504**, 95040O (2015).

9. A. Kuzanian, V. Nikoghosyan, A. Kuzanyan. Sensors & Transducers, **191**, 57 (2015).
10. A. Kuzanyan, A. Kuzanyan, V. Nikoghosyan. Armenian Patent, no. 2946 (2015).
11. А.А. Кузаний, А.С. Кузаний, В.Р. Никогосян, В.Н.Гурин, М.П. Волков. Известия НАН Армении, Физика, **51**, 244 (2016).

ԶԵՐՄՈՒԹՅԱՆ ՏԱՐԱԾՄԱՆ ՊՐՈՑԵՍՆԵՐԻ ՀԱՄԱԿԱՐԳՉԱՅԻՆ
ՍՈՂԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ ԶԵՐՄԱԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ԴԵՏԵԿՏՈՐԻ W/(La,Ce)B₆/W ՏՎԻԶՈՒՄ
Ա.Ա. ԿՈՒԶԱՆՅԱՆ

Ներկայացված են ջերմաէլեկտրական դետեկտորի W/(La,Ce)B₆/W բազմաշերտ տվիչում 1–100 էՎ էներգիայով մեկ ֆոտոնի կլանման հետևանքով առաջացած ջերմության տարածման պրոցեսների համակարգչային մոդելավորման արդյունքները: Մանրամասն ուսումնասիրված է մոդելավորման պարամետրերի ընտրության ազդեցությունը դետեկտորի տվիչում ջերմափոխանցման առանձնահատկությունների բացահայտման վրա, որոնք կախված են ֆոտոնի էներգիայից, տվիչի երկրաչափությունից, կլանիչի մակերեսին ֆոտոնի կլանման տիրույթից և խորությունից, որում տեղի է ունեցել ֆոտոնի ջերմավորումը:

Գնահատված են տվիչի էներգետիկ լուծողականությունը և հաշվարկի արագությունը: Ցույց է տրված, որ (La,Ce)B₆ ջերմաէլեկտրիկով տվիչը ունակ է գրանցել միակի ֆոտոններ էլետրամագնիսական սպեկտրի լայն տիրույթում 0.5 Կ ջերմաստիճանում: Նշված տվիչը ունի մի շարք առավելություններ CeB₆–ի վրա հիմնված տվիչի համեմատ, որի աշխատանքային ջերմաստիճանն է 9 Կ, և հեռանկարային է գիտության մեջ և տեխնիկայում օգտագործվելու համար:

COMPUTER MODELING OF HEAT DISTRIBUTION PROCESSES
IN W/(La,Ce)B₆/W SENSOR OF THERMOELECTRIC DETECTOR

A.A. KUZANYAN

The results of computer modeling of the processes of heat distribution in W/(La,Ce)B₆/W multilayer sensor of the thermoelectric detector after the absorption of single photons with 1–100 eV energies are presented. The influence of the computer modeling parameters choice on revelation of the peculiarities of heat transmission processes occurring in the sensor of detector depending on the photon energy, the sensor geometry, the absorption area of the absorber surface and the depth of photon thermalization is investigated in details. The energy resolution and count rate of sensor are evaluated. It is shown that the multilayer sensor with (La,Ce)B₆ thermoelectric is capable to register single photon in a wide range of the electromagnetic spectrum at 0.5 K temperature, it has advantages in comparison with the sensor based on of CeB₆, operating temperature of which is 9 K, and it is perspective to be used in the science and technology.