

УДК 536.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА В МНОГОСЛОЙНОМ СЕНСОРЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОДНОФОТОННОГО ДЕТЕКТОРА

**А.А. КУЗАНЯН¹, А.С. КУЗАНЯН^{1*}, В.Р. НИКОГОСЯН¹,
В.Н. ГУРИН², М.П. ВОЛКОВ²**

¹Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак, Армения

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: akuzanyan@yahoo.com

(Поступила в редакцию 21 октября 2015 г.)

Представлены результаты компьютерного моделирования процессов распространения тепла в многослойном сенсоре термоэлектрического детектора после поглощения одиночного фотона с энергиями 1 кэВ и 100 эВ. Рассмотрены варианты различных геометрий сенсора, состоящего из вольфрамового поглотителя и термоэлектрического слоя из гексаборида церия. Подробно изучены различия временной зависимости возникающего на термоэлектрическом слое сигнала при поглощении фотона в различных областях поглотителя. Оценены энергетическое разрешение и скорость счета сенсора. Показано, что многослойный сенсор имеет ряд преимуществ по сравнению с однослойным сенсором и перспективен для использования в различных областях науки и техники.

1. Введение

Развитие науки и высоких технологий требует все более точных и удобных методов регистрации различных физических объектов. Однофотонные детекторы (SPD) относятся к числу устройств, которые востребованы в самых различных областях деятельности человека. Это и наука (квантовая электроника, физика высоких энергий, астрофизика, космическая астрофизика, оптика, квантовая физика, метрология и квантовая метрология) и новейшие технологии (квантовая информатика, квантовые компьютеры, телекоммуникация, рентгеновский микроанализ, анализ дефектов микрочипов, компьютерная томография и другие области медицины) [1–3]. Среди SPD, разработанных в последние десятилетия, наиболее перспективным считается сверхпроводящий нанопроволочный детектор (SNSPD), предложенный в 2001 году группой ученых под руководством Г.Н. Гольцмана [4]. SNSPD превосходят по своим характеристикам все ранее известные, обладают низким темновым счетом, гигагерцовой скоростью счета и могут регистрировать фотоны в широкой области электромагнитного спектра [5–7].

Похожими характеристиками обладает термоэлектрический однофотонный детектор (TSPD), физическая концепция которого явилась единственно новым подходом в методах детектирования одиночных фотонов за довольно продолжительное время [8]. Концепция TSPD была предложена группой американских и армянских ученых, возглавляемых А.М. Гуляном в 2000 году [9,10]. Исследования последних лет показали, что TSPD могут составить конкуренцию SNSPD, превосходить их по некоторым своим свойствам и характеристикам [11–15].

Настоящая работа продолжает цикл исследований по компьютерному моделированию процессов распространения тепла в сенсоре термоэлектрического детектора [16–18]. Подробно рассматриваются свойства многослойного сенсора TSPD, предложенного ранее [19].

2. Однослойные и многослойные сенсоры TSPD

Однослойный сенсор TSPD подробно исследовался в работах [10–18]. Он содержит два поглотителя из тяжелого металла, которые нанесены на диэлектрическую подложку и соединены друг с другом термоэлектрическим мостиком. Когда в один из поглотителей попадает фотон, его температура повышается по сравнению с другим, на концах термоэлектрического мостика возникает разность потенциалов, измеряя которую можно зарегистрировать акт поглощения фотона и определить его энергию. Работа такого сенсора не требует дополнительного источника питания или приложенного напряжения, а значит и дополнительных контактов, поэтому сенсор TSPD имеет максимально простую конструкцию и обеспечивает возможность создания детекторной матрицы из множества сенсоров с простой электронной структурой [20]. Однако такой сенсор имеет недостаток, ограничивающий его применение. Энергия фотона определяется по интегралу временной зависимости сигнала, и если время спада сигнала до фонового значения больше времени прохождения тепла через границу металл–диэлектрик, так называемой границы Капицы, то часть тепла уйдет в подложку и точно определить энергию фотона будет невозможно.

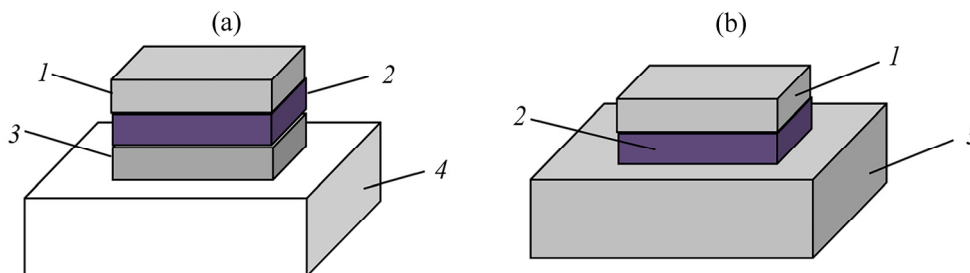


Рис.1. Многослойный сенсор TSPD: 1 – поглотитель, 2 – термоэлектрический слой, 3 – теплоотвод и 4 – подложка.

Энергию фотона нельзя определить и по максимальному значению возникающего на термоэлектрическом мостике сигнала, так как форма временной зависимости сигнала сильно зависит от того, в какой области абсорбера поглотился фотон [16–18]. Чтобы избавиться от этой неоднозначности, мы воспользуемся многослойной конструкцией сенсора TSPD, представленной на рис.1.

Многослойный сенсор может быть изготовлен в двух вариантах. В первом случае на диэлектрическую подложку напылен проводник, который выполняет роль электрического контакта и теплоотвода (рис.1а). На теплоотвод последовательно напыляются термоэлектрик и поглотитель. Во втором случае, нижний слой выполняет три роли: электрического контакта, теплоотвода и обеспечения жесткости конструкции (рис.1б).

3. 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 [16]. Здесь же отметим, что в качестве материала поглотителя и теплоотвода нами выбран вольфрам (W), термоэлектриком является гексаборид церия (CeB_6), имеющий высокий термоэлектрический КПД при 9 К. Именно эта температура определена как рабочая для сенсора TSPD. Значения использованных в расчетах физических величин W и CeB_6 приведены в табл.1.

Табл.1. Параметры использованных материалов при 9 К

Параметр	W	CeB_6
Плотность ρ , кг/м ³	19250	4800
Удельная теплоемкость c , Дж/кг К	0.197	7.3
Вклад электронов в удельную теплоемкость γ , Дж/кг К ²	0.022	0.8
Теплопроводность λ , Вт/м К	9680	1.5
Коэффициент Зеебека S , мкВ/К	-	150

На рис.2 приведены обозначения областей поглотителя, в которых рассматривалась термализация фотона. С учетом симметрии квадрата рассмотрены все возможные области термализации фотона.

Ранее нами было показано, что фотоны с энергией 100 эВ (жесткий УФ диапазон) поглощаются с почти 100% вероятностью в вольфрамовом поглотителе с толщиной 0.5 мкм [21]. Для фотонов с энергией 1 кэВ (рентгеновский диапазон) толщина поглотителя составляет 1.5 мкм. Именно эти толщины поглотителя используются нами в расчетах.

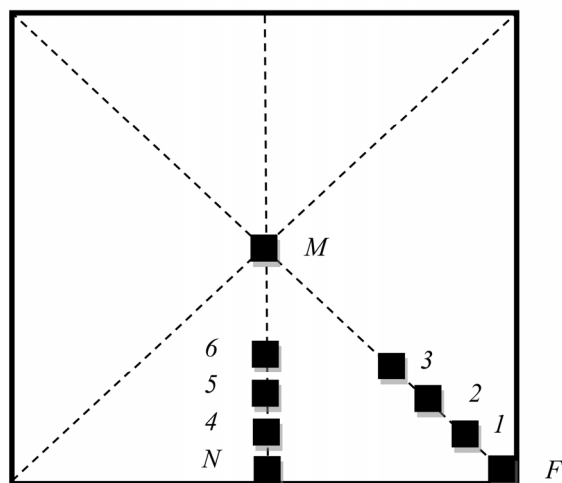


Рис.2. Области поглотителя, в которых рассматривалась термализация фотона: M – центр квадрата, F – угол квадрата и от угла к центру на расстоянии (1) 0.43 мкм, (2) 0.86 мкм, (3) 1.29 мкм; N – середина стороны квадрата и от нее к центру на расстоянии (4) 0.3 мкм, (5) 0.6 мкм, (6) 0.9 мкм.

4. Результаты и их обсуждение

4.1. Регистрация фотонов с энергией 100 эВ

Рассмотрим сначала поглощение фотона в геометрическом центре поверхности поглотителя. Исследуем временную зависимость возникающей на термоэлектрическом слое разности температур ΔT в пяти различных областях сенсора. На рис.3 приведены кривые этих зависимостей для расчета mC1M из табл.2.

Как и следовало ожидать, наибольшие значения разности температур достигаются в центре сенсора непосредственно под местом термализации фотона. С удалением от центра сигнал ослабевает и в максимально удаленной области 4 максимум ΔT на порядок меньше. Такая же картина наблюдается для остальных расчетов, и так как электрический сигнал от сенсора определяется максимальной разностью температур на термоэлектрике, то в дальнейшем мы будем сравнивать лишь временные зависимости ΔT для области M в различных расчетах. Для расчетов, когда фотон термализуется не в центре поверхности, будем регистрировать сигнал на сенсоре непосредственно под областью поглощения фотона.

Результаты расчетов для поглотителя фотонов и теплоотвода из W, термоэлектрика CeV_6 , фотонов с энергией ~ 100 эВ приведены в табл.2. В особо не оговариваемых случаях размеры поверхности сенсора составляли $x = y = 10$ мкм,

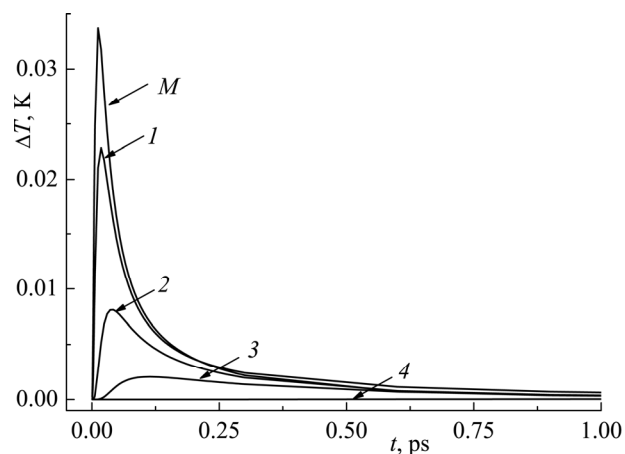


Рис.3. Временная зависимость разности температур в пяти различных областях сенсора. В центре – M и на расстоянии от центра (I) – 0.2 мкм, (2) – 0.5 мкм, (3) – 1 мкм, (4) – 5 мкм (расчет mC1M).

толщина вольфрамового абсорбера $z = 0.5$ мкм. В табл.2 приведены номер расчета, толщина слоя термоэлектрика z (CeB_6), толщина теплоотвода z (W_{hs}), энергия фотона E , максимальное значение разности температур ΔT_m , время

Табл.2. Характеристики многослойного сенсора при поглощении фотона с энергией 100 эВ

№ расчета	z (CeB_6), мкм	z (W_{hs}), мкм	E , эВ	ΔT_m , 10^{-4} К	t_m , пс	U_m , мкВ	t_p , пс	R , ГГц
mC1M	1	1	100	369.5	0.006	5.543	>1000	<1
mC2M	0.5	1	100	369.5	0.012	5.543	>1000	<1
mC3M	0.1	1	100	369.1	0.012	5.537	85.2	11.7
mC4M	0.01	1	100	337.1	0.012	5.057	3	333
mC5M	0.01	2	100	337.1	0.012	5.057	3	333
mC6M	0.01	5	100	337.1	0.012	5.057	3.3	303
mC7M	0.05	1	100	368	0.012	5.52	21.9	45.7
mC8M	0.05	1	110	404.8	0.012	6.072	25.5	39.2
mC9M	0.05	1	90	331.2	0.012	4.968	18	55.5
mC10M	0.01	1.5	100	337.1	0.012	5.057	2.4	417
mC11M	0.01	1	101	340.4	0.012	5.106	2.4	417
mC12F	0.01	1	100	345	0.018	5.175	4.2	238
mC13M ¹⁾	0.01	1	100	337.1	0.012	5.057	2.4	417
mC14M ²⁾	0.01	1	100	337.1	0.012	5.057	3.6	278
mC18F1	0.01	1	100	337.1	0.012	5.057	4.2	238
mC19F2	0.01	1	100	337.1	0.012	5.057	4.2	238
mC20F3	0.01	1	100	337.1	0.012	5.057	3.9	256
mC21N	0.01	1	100	340.7	0.012	5.111	3.3	303
mC22N4	0.01	1	100	337.1	0.012	5.057	3.3	303
mC23N5	0.01	1	100	337.1	0.012	5.057	3	333
mC24N6	0.01	1	100	337.1	0.012	5.057	3	333

¹⁾Поглотитель $x = y = 20$ мкм.

²⁾Поглотитель $x = y = 5$ мкм.

достижения максимальной разности температур t_m (отсчитанное с момента поглощения фотона), максимальная величина возникающей на сенсоре разности потенциала U_m , время спада сигнала до фонового ($\Delta T = 10^{-4}$ К) значения t_p и ее обратная величина (скорость счета) R . Последняя буква и цифра в обозначении номера расчета соответствует обозначению области термализации фотона на рис.2.

Величина U_m рассчитывалась с использованием среднего по литературным данным значения коэффициента Зеебека гексаборида CeB_6 при 9 К (табл.1). Также предполагалось, 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 измерителю потенциала.

На рис.4 приведены временные зависимости ΔT для представленных в табл.2 первых четырех расчетов. Сравнивались характеристики сенсоров с различной толщиной термоэлектрического слоя. Как по данным таблицы, так и из рис.4 видно, что временные зависимости ΔT для толщин термоэлектрического слоя 1 мкм, 0.5 мкм и 0.1 мкм отличаются слабо (кривые накладываются друг на друга). Максимум ΔT для расчета mC4M (толщина CeB_6 – 10 нм) несколько ниже, но это компенсируется быстрым спадом сигнала до фонового значения, что обеспечивает высокую скорость счета $R = 333$ ГГц. Резкое увеличение скорости счета (при уменьшении толщины термоэлектрического слоя менее 0.1 мкм) наглядно видно на рис.5.

Рассмотрим результаты расчетов mC4M, mC5M и mC6M, проведенных для вольфрамового теплоотвода с различной толщиной. Из табл.2 видно, что изменение толщины теплоотвода не оказывает влияния на величину максимального сигнала. Несколько отличается характер спада сигнала. Это отличие исчезает при больших временах, хотя и влияет на величину скорости счета.

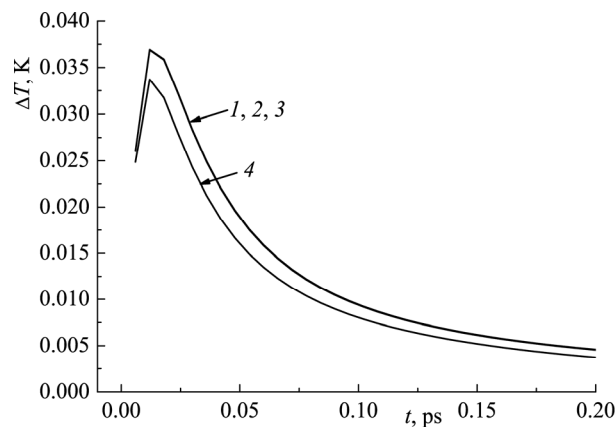


Рис.4. Временная зависимость разности температур ΔT для толщин термоэлектрического слоя: 1 – 1 мкм (mC1M), 2 – 0.5 мкм (mC2M), 3 – 0.1 мкм (mC3M) и 4 – 0.01 мкм (mC4M).

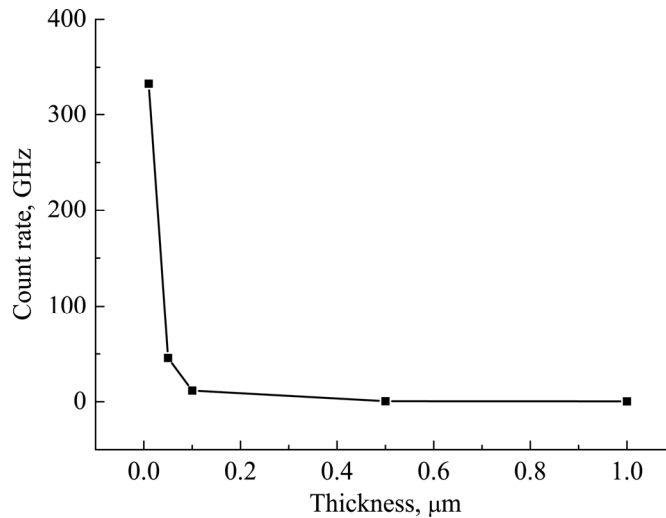


Рис.5. Зависимость скорости счета от толщины термоэлектрического слоя.

На рис.6 приведены временные зависимости ΔT для случаев поглощения фотонов с энергией 100 эВ, 110 эВ и 90 эВ. Из табл.2 следует, что разности потенциалов, соответствующие максимумам этих зависимостей, отличаются на 0.55 мкВ. Сравнивая U_m расчетов mC4M и mC11M, в которых рассмотрено поглощение фотонов с энергией 100 эВ и 101 эВ, видим, что они отличаются на 0.05 мкВ. Можно утверждать, что выбранная геометрия сенсора обеспечивает разрешение в 1 эВ для фотонов с энергией 100 эВ. Современная электроника способна без применения особых усилителей регистрировать значительно более слабые сигналы. Регистрация сигналов, отличающихся на нановольты, позволит говорить об энергетическом разрешении в 0.1 эВ.

Сравним расчеты mC4M, mC12M и mC13M. Уменьшение площади сенсора от $10 \times 10 \text{ мкм}^2$ (mC4M) до $5 \times 5 \text{ мкм}^2$ (mC13M) приводит к понижению скорости счета, тогда как увеличение площади до $20 \times 20 \text{ мкм}^2$ (mC12M) – увеличивает скорость счета. При этом изменение площади сенсора не влияет на величину регистрируемого сигнала, а значит и на энергетическое разрешение.

Рассмотрим как влияет на регистрируемый сигнал расположение области поверхности, в которой термализуется фотон. Все предыдущие расчеты проводились в предположении, что фотон термализуется в геометрическом центре поверхности сенсора в самом верхнем его слое. Расчеты mC12F, mC18F1, mC19F2 и mC20F3 проводились для случаев, когда фотон попадал на угол сенсора (mC12F) и далее по диагонали от угла на 0.43 мкм, 0.86 мкм и 1.29 мкм, соответственно.

Как видно из табл.2, от расчетов, когда фотон попадает в центр поверхности сенсора (например, mC4M), по значению максимума сигнала отличается

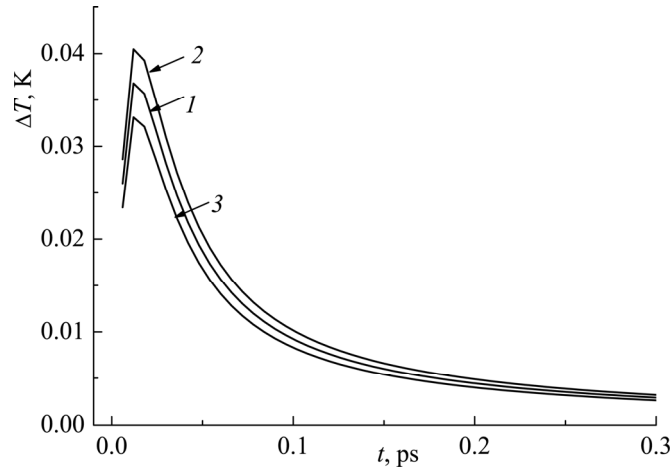


Рис.6. Временная зависимость ΔT для различных энергий поглощаемого фотона: 1 – 100 эВ (mC7M), 2 – 110 эВ (mC8M), 3 – 90 эВ (mC9M).

только расчет mC12F, когда фотон поглощается в самом углу сенсора. Такая же картина наблюдается в случае поглощения фотона вблизи края сенсора (расчеты mC21N, mC22N4, mC23N5, mC24N6). Отличается только расчет mC21N, когда фотон попадает на самый край. Если исключить возможность попадания фотона в эти области, а именно, по периметру поверхности сенсора небольшой ширины, что можно легко осуществить, используя экран несложной конструкции, то будем иметь сенсор, позволяющий однозначно определять энергию фотона по максимальному значению регистрируемого сигнала.

4.2. Регистрация фотонов с энергией 1 кэВ

Результаты компьютерного моделирования процессов распространения тепла в многослойном сенсоре TSPD приведены в табл.3. Были использованы следующие параметры сенсора: $x = y = 10$ мкм, толщина поглотителя 1.5 мкм, поглотитель и теплоотвод из W, термоэлектрик – CeB_6 . Фотон поглощается у поверхности поглотителя, т.е. центр зоны термализации расположен на глубине 0.1 мкм. При использовании других параметров расчетов они указываются в комментариях к табл.3, где приведены характеристики, аналогичные приведенным в табл.2.

Рассмотрим сначала поглощение фотона в геометрическом центре поверхности поглотителя. Как и для фотона с энергией 100 эВ, исследуем временную зависимость возникающей на термоэлектрическом слое разности температур ΔT в пяти различных областях сенсора. На рис.7 приведены кривые этой зависимости для расчета kC1M. Для рентгеновских фотонов также получаем картину, аналогичную рис.3. С удалением от зоны термализации фотона сигнал

Табл.3. Характеристики многослойного сенсора при поглощении фотона с энергией 1 кэВ

№ расчета	z (CeB ₆), мкм	z (W _{hs}), мкм	E , эВ	ΔT_m , 10 ⁻⁴ К	t_m , пс	U_m , мкВ	t_p , пс	R , ГГц
kC1M	1	1	1	67.8	0.162	1.017	>4000	<0.25
kC2M	0.5	1	1	67.8	0.162	1.017	>2500	<0.4
kC3M	0.1	1	1	67.5	0.156	1.013	420	2.4
kC4M	0.05	1	1	67.5	0.156	1.013	186.6	5.4
kC5M	0.01	1	1	56.4	0.156	0.846	4.8	208
kC6M	0.01	2	1	56.4	0.156	0.846	4.8	208
kC7M	0.01	5	1	56.4	0.156	0.846	4.8	208
kC8M	0.01	1	1.1	62	0.156	0.93	5.1	196
kC9M	0.01	1	0.9	50.7	0.156	0.761	4.5	222
kC10M	0.01	1	1.01	56.9	0.156	0.854	4.8	208
kC11F	0.01	1	1	152.4	0.246	2.286	6.3	159
kC12M ¹⁾	0.01	1	1	56.4	0.156	0.846	3.9	256
kC13M ²⁾	0.01	1	1	56.4	0.156	0.846	8.7	114
kC14M ³⁾	0.01	1	1	99.3	0.072	1.49	4.8	208
kC15M ⁴⁾	0.01	1	1	393.9	0.03	5.909	4.5	222
kC16M ⁵⁾	0.01	1	1	2835	0.006	42.525	4.5	222
kC17F1	0.01	1	1	93	0.24	1.4	6.3	159
kC18F2	0.01	1	1	66	0.21	1	6	159
kC19F3	0.01	1	1	57.5	0.18	0.86	6	159
kC20M	0.01	1	1	7.09	0.585	0.11	3.9	256
kC21M ^{3,6)}	0.01	1	1	7.96	0.495	0.12	3.9	256
kC22M ^{4,6)}	0.01	1	1	11	0.33	0.17	3.6	278
kC23M ^{5,6)}	0.01	1	1	19	0.3	0.29	3.6	278

¹⁾Размеры сенсора $x = y = 20$ мкм;

²⁾ $x = y = 5$ мкм;

³⁾фотон поглотился на расстоянии 0.5 мкм от поверхности поглотителя;

⁴⁾фотон поглотился на расстоянии 0.9 мкм от поверхности поглотителя;

⁵⁾фотон поглотился на расстоянии 1.4 мкм от поверхности поглотителя;

⁶⁾толщина поглотителя 3 мкм.

ослабевает. Это дает нам право в дальнейшем сосредоточить внимание на регистрации сигнала непосредственно под зоной термализации фотона.

Приведенные в табл.3 первые пять расчетов отличаются толщиной слоя термоэлектрика. Уменьшение этого параметра от 1 мкм до 10 нм приводит к значительному увеличению скорости счета, которая достигает 208 ГГц. При этом максимальное значение сигнала понижается мало. Расчеты kC5M–kC7M показывают, что увеличение толщины теплоотвода от 1 мкм до 5 мкм не влияет ни на максимальное значение сигнала, ни на скорость счета.

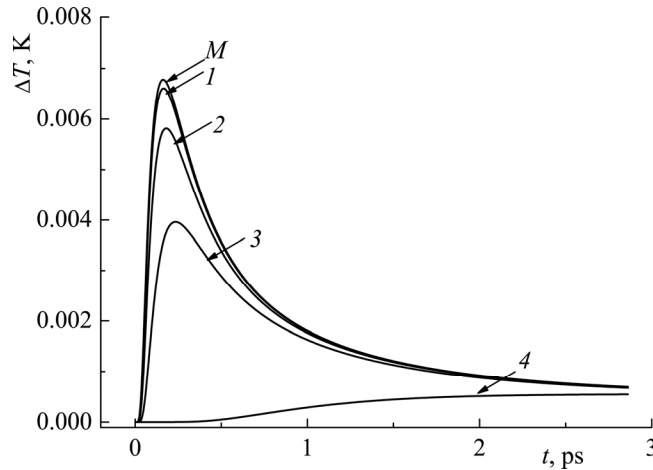


Рис.7. Временная зависимость разности температур в пяти различных областях сенсора. В центре – M и на расстоянии от центра (I) 0.2 мкм, (2) 0.5 мкм, (3) 1 мкм и (4) 5 мкм (расчет кС1М).

На рис.8 приведены временные зависимости ΔT при поглощении фотонов с энергиями 1 кэВ, 1.1 кэВ, 0.9 кэВ и 1.01 кэВ. Из табл.3 следует, что параметр U_m отличается на 0.085 мкВ, когда энергия фотонов отличается на 10% (расчеты кС5М, кС8М, кС9М). Сравнивая величину U_m расчетов кС5М и кС10М, в которых рассмотрено поглощение фотонов с энергиями 1 кэВ и 1.01 кэВ при прочих равных характеристиках сенсора, видим, что они отличаются на 7 нВ. Такой сигнал регистрируется без применения специальной электроники. Можно утверждать, что на уровне 1 кэВ многослойный сенсор имеет энергетическое разрешение не хуже 1%.

Результаты расчета кС11F выявляют, что мы получаем сигнал большей интенсивности, если область термализации фотона расположена в углу поглотителя. По сравнению с расчетом для фотона, поглощенного в центре поглотителя, сигнал спадает медленнее до фонового значения, в результате чего скорость счета имеет меньшее значение. Если зона термализации сдвигается ближе к центру поглотителя (расчеты кС17F1–кС17F3), различия со случаем поглощения фотона в центре поглотителя уменьшаются. Характеристики расчета кС17F3 (фотон поглощается на расстоянии 1.29 мкм от угла поглотителя) мало отличаются от характеристик расчета кС5М – фотон поглощается в центре абсорбера.

Исследуем влияние изменений геометрических размеров многослойного сенсора на его характеристики. Сравнение результатов расчетов кС5М, кС12М и кС13М показывает, что увеличение поверхности сенсора в четыре раза приводит к увеличению скорости счета от 208 ГГц до 256 ГГц, тогда как уменьшение поверхности сенсора в 4 раза понижает скорость счета до 114 ГГц. При этом изменений максимального значения сигнала не происходит.

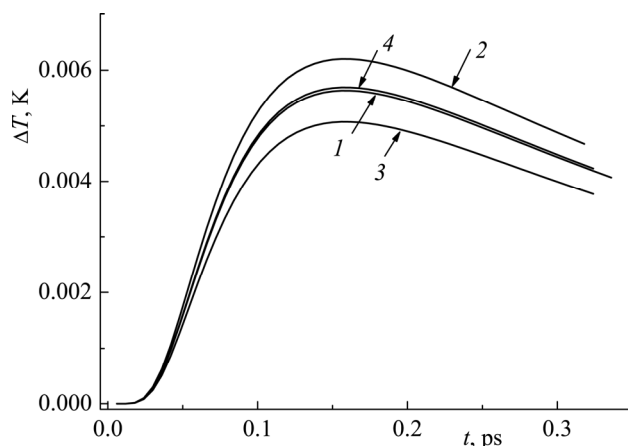


Рис.8. Временная зависимость ΔT для различных энергий поглощаемого фотона: (1) 1 кэВ (кС5М), (2) 1.1 кэВ (кС8М), (3) 0.9 кэВ (кС9М), (4) 1.01 кэВ (кС10М).

В завершение рассмотрим различия временных зависимостей ΔT при термализации фотона на разной глубине в центральной области поглотителя. Как отмечалось выше, фотоны с энергией 1 кэВ поглощаются с почти 100% вероятностью в поглотителе толщиной 1.5 мкм. Поэтому именно эта толщина поглотителя была выбрана нами для исследования особенностей поглощения одиночных фотонов с энергией 1 кэВ в многослойном сенсоре TSPD. Большинство расчетов, приведенных в табл.3 проведены в предположении, что фотон термализовался в верхнем слое поглотителя на глубине 0.1 мкм от поверхности. При поглощении фотона на большей глубине (расчеты кС14М, кС15М и кС16М) мы получаем сигнал с более высоким значением ΔT_m (сравнение с расчетом кС5М). Причем, чем ближе зона термализации фотона к термоэлектрическому слою, тем больше значение ΔT_m . Одновременно, сигнал несколько быстрее спадает до фонового значения, и мы имеем большую скорость счета.

Не вызывает сомнений, что эти закономерности будут наблюдаться и для расчетов с другими параметрами, если менять в них глубину залегания зоны термализации. Добиться уменьшения зависимости характеристик сигнала от глубины зоны термализации фотона возможно, увеличивая толщину поглотителя (расчеты кС20М–кС23М, толщина поглотителя 3 мкм). При увеличении толщины поглотителя значения параметра ΔT_m становятся меньше, но одновременно уменьшается разница значений этого параметра для случаев поглощения фотона на разной глубине.

5. Заключение

Проведенные исследования выявили ряд особенностей процессов распространения тепла в многослойном сенсоре термоэлектрического детектора после поглощения одиночных фотонов УФ и рентгеновского диапазонов. Основной из

них является то, что генерируемый сенсором сигнал не зависит от расположения области термализации фотона в поглотителе кроме краев сенсора. Если исключить попадание фотона на самый край сенсора, что легко осуществить с помощью экрана, то энергию фотона можно однозначно определять по максимуму генерируемого сигнала.

Второй по важности особенностью является независимость амплитуды генерируемого сигнала от площади сенсора, в то время как увеличение площади сенсора приводит к возрастанию скорости счета вплоть до 256 ГГц.

В многослойном сенсоре отсутствует граница поглотитель–подложка и нет опасности ухода части тепла, образовавшегося в результате термализации фотона, через границу Капицы в подложку. Вся энергия фотона, превратившись в тепло в поглотителе, непременно пройдет через слой термоэлектрика. В тех случаях, когда определить энергию фотона по максимуму временной зависимости ΔT невозможно, ее можно будет определить по интегралу этой зависимости.

Очевидно, что результаты компьютерного моделирования процессов распространения тепла в такой сложной системе, как сенсор однофотонного детектора, не могут претендовать на точность, обеспечиваемую экспериментальной проверкой параметров сенсора. Тем не менее, выявленные особенности показывают преимущества многослойного сенсора по сравнению с однослойным. В сочетании с высоким энергетическим разрешением, которое для обеих конструкций сенсора не хуже одного процента, наличие этих преимуществ позволяет сделать вывод о перспективности создания термоэлектрического однофотонного детектора с многослойным сенсором для использования в самых различных областях современной науки и высоких технологий.

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

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

ЛИТЕРАТУРА

1. **R.H. Hadfield.** Nature Photonics, **3**, 696 (2009).
2. **K.D. Irwin.** Scientific American, **295**, 86 (2006).
3. **T. Yamashita, S. Miki, H. Terai, Z. Wang.** Optics Express, **21**, 27177 (2013).
4. **G.N. Gol'tsman, O. Okunev, G. Chulkova et al.** Appl. Phys. Lett., **79**, 705 (2001).
5. **H.A. Atikian, A. Eftekharian, A.J. Salim et al.** Appl. Phys. Lett., **104**, 122602 (2014).
6. **D. Liu, S. Miki, T. Yamashita et al.** Optics Express, **22**, 21167 (2014).
7. **J.J. Renema, R. Gaudio, Q. Wang et al.** Phys. Rev. Lett., **112**, 117604 (2014).
8. **S.N. Song, S.R. Maglic, C.D. Thomas et al.** Appl. Phys. Lett., **69**, 1631 (1996).
9. **G.G. Fritz, K.S. Wood, D. van Vechten, A.L. Gyulamiryan, A.S. Kuzanyan et al.** Proc. SPIE, **4140**, 459 (2000).
10. **D. van Vechten, K. Wood, G. Fritz, J. Horwitz, A. Gyulamiryan, A. Kuzanyan et al.**

- Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., **444**, 42 (2000).
11. **K.Wood, D. van Vechten, G.Fritz et al.** Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., **A 520**, 56 (2004).
 12. **A. Gulian, K. Wood, D. van Vechten et al.** Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., **A 520**, 36 (2004).
 13. **A. Gulian, K. Wood, D. van Vechten, G. Fritzdet.** J. Mod. Opt., **51**, 1467 (2004).
 14. **В.А. Петросян.** Известия НАН Армении, Физика, **46**, 194 (2011).
 15. **A.A. Kuzanyan, V.A. Petrosyan, A.S. Kuzanyan.** J. Mod. Phys. Conf. Ser., **350**, 012028 (2012).
 16. **A.A. Kuzanyan.** Nano Studies, **9**, 93 (2014).
 17. **A. Kuzanyan, V. Nikoghosyan, A. Kuzanyan.** Proc. SPIE, **9504**, 950400 (2015).
 18. **A. Kuzanyan, V. Nikoghosyan, A. Kuzanyan.** Sensors & Transducers, **191** (8), 57 (2015).
 19. **A. Kuzanyan, A. Kuzanyan, V. Nikoghosyan.** Armenian Patent, no 2946. (2015).
 20. **K.S. Wood, G.G. Fritz, A.M. Gulian, D. van Vechten.** US Patent, no. 9710343. (2004).
 21. **A.A. Kuzanyan, A.S. Kuzanyan.** Proc. SPIE, **8773**, 87730L-1(2013).

ՋԵՐՄՈՒԹՅԱՆ ՏԱՐԱԾՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՅՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ
ՋԵՐՄԱԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՄԻԱՖՈՏՈՆ ԴԵՏԵԿՏՈՐԻ ԲԱԶՄԱՇԵՐՏ ՍԵՆՍՈՐՈՒՄ

Ա.Ա. ԿՈՒԶԱՆՅԱՆ, Ա.Ս. ԿՈՒԶԱՆՅԱՆ, Վ.Ռ. ՆԻԿՈԴՈՍՅԱՆ,
Վ.Ն. ԳՈՒՐԻՆ, Մ.Պ. ՎՈԼԿՈՎ

Ներկայացված են ջերմաէլեկտրական դետեկտորի բազմաշերտ սենսորում 1 կէՎ կամ 100 էՎ էներգիայով մեկ ֆոտոնի կլանման արդյունքում առաջացած ջերմության տարածման գործընթացների համակարգչային մոդելավորման արդյունքները: Դիտարկված են վոլֆրամե կլանիչով և ցերիումի հեքսաբորիդից ջերմաէլեկտրական շերտից կազմված տարբեր չափսերի սենսորի տարբերակներ: Մանրամասն ուսումնասիրված են կլանիչի տարբեր հատվածներում ֆոտոնի կլանման արդյունքում ջերմաէլեկտրական շերտի վրա առաջացած ազդանշանի ժամանակային կախվածության տարբերությունները: Գնահատված են սենսորի էներգետիկ լուծաչափը և հաշվարկի արագությունը: Եզրակացված է, որ միաշերտ սենսորի համեմատությամբ բազմաշերտ սենսորն ունի մի շարք առավելություններ, և որ դրանց կիրառումը հեռանկարային է գիտության և տեխնիկայի տարբեր բնագավառներում:

STUDY OF HEAT PROPAGATION PROCESSES IN MULTILAYER SENSOR OF THERMOELECTRIC SINGLE-PHOTON DETECTOR

A.A. KUZANYAN, A.S. KUZANYAN, V.R. NIKOGHOSYAN,
V.N. GURIN, M.P. VOLKOV

Results of computer simulation of processes of the heat propagation in the multilayer sensor of the thermoelectric detector after absorption of single photons with 1 keV and 100 eV energies are presented. Options for different geometries of the sensor consisting of the tungsten absorber and the thermoelectric layer of cerium hexaboride are considered. The differences of temporal dependence of signal arising on the thermoelectric layer when a photon is absorbed in various areas of absorber are studied in details. The energy resolution and count rate of the sensor are evaluated. It is shown that multilayer sensor has a number of advantages compared to single-layer sensor, and its using in various fields of science and technology is promising.