

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ФОТОНОВ, ПОГЛОЩЕННЫХ
В $\text{SiO}_2/\text{W}/\text{FeSb}_2/\text{W}$ ЧУВСТВИТЕЛЬНОМ ЭЛЕМЕНТЕ
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОДНОФОТОННОГО ДЕТЕКТОРА**

А.А. КУЗАНЯН*

Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак, Армения

*e-mail: astghik.kuzanyan@gmail.com

(Поступила в редакцию 11 декабря 2020 г.)

Представлены результаты моделирования процессов распространения тепла в четырехслойном чувствительном элементе $\text{SiO}_2/\text{W}/\text{FeSb}_2/\text{W}$ термоэлектрического однофотонного детектора после поглощения более одного ИК фотона. Расчеты проведены трехмерным матричным методом для дифференциальных уравнений в частных производных. Исследованы случаи как одновременного поглощения нескольких фотонов на отрезке длиной 1 мкм поверхности поглотителя, так и поглощения фотонов, следующих с определенной временной задержкой. Показано, что время спада сигнала детектора до фонового значения существенно зависит от числа одновременно поглощенных фотонов. Используя данный параметр можно определить число поглощенных фотонов вплоть до восьми. Чувствительный элемент $\text{SiO}_2/\text{W}/\text{FeSb}_2/\text{W}$ может также регистрировать фотоны, следующие с временной задержкой 5 фс, что соответствует скорости счета 2×10^{14} Гц. Детектор с такими характеристиками востребован во многих областях современных технологий.

1. Введение

Однофотонные детекторы (ОД), устройства способные регистрировать один фотон и определять его энергию, находят применения в квантовой электронике, физике высоких энергий, астрофизике, квантовой обработке информации, лазерной спектроскопии, квантовой метрологии, медицинском приборостроении, телекоммуникационных системах и так далее [1]. Важнейшими характеристиками ОД являются эффективность детектирования, энергетическое разрешение, скорость счета, скорость темнового счета, спектральный диапазон детектирования и рабочая температура [2,3]. На сегодняшний день рекордными характеристиками обладают сверхпроводящие нанопроволочные детекторы [4,5]. Конкуренцию сверхпроводящим детекторам может составить термоэлектрический однофотонный детектор (ТОД) [6–8]. По сравнению со сверхпроводящими детекторами ТОД имеет несколько преимуществ, основными из которых являются простая конструкция чувствительного элемента и менее жесткие

требования по поддержанию рабочей температуры.

Чувствительный элемент ТОД состоит из расположенных на диэлектрической подложке теплоотвода, термоэлектрического сенсора и поглотителя. Поглотитель и теплоотвод являются одновременно электрическими контактами с помощью которых регистрируется возникшее на сенсоре электрическое напряжение. Предложены две основные конструкции чувствительного элемента ТОД. В однослойной конструкции поглотитель и теплоотвод расположены на диэлектрической подложке и связаны между собой термоэлектрическим сенсором [9]. В трехслойной – подложка, теплоотвод, сенсор и поглотитель располагаются последовательно друг на друге [10]. Такая конструкция исключает непосредственный контакт поглотителя с подложкой и возможность диссипации энергии фотона в подложку минуя термоэлектрический сенсор. Усовершенствованным вариантом трехслойного чувствительного элемента ТОД является четырехслойная конструкция, которая содержит дополнительный антиотражающий слой [11,12].

Потенциал возможностей ТОД исследован методом численного моделирования. Изучены процессы распространения тепла в чувствительном элементе различной конструкции после поглощения фотонов с энергией 0.5 эВ–1.1 кэВ [9–14]. Определены характеристики чувствительного элемента с термоэлектрическим сенсором из CeB₆, (La,Ce)B₆, FeSb₂, поглотителем и теплоотводом из W, LaB₆, Nb, Pb, YBCO, антиотражающим слоем SiO₂ [15–17]. Показано, что ТОД в широкой области электромагнитного спектра от ближнего ИК до рентгена может обладать терагерцовой скоростью счета, энергетическим разрешением не хуже 1% и эффективностью детектирования на уровне 95% [12–17]. Наряду с изучением потенциальных возможностей ТОД, предложены также решения по изготовлению чувствительного элемента. Методом электронно-лучевого напыления получены тонкие пленки W, CeB₆, LaB₆ и SiO₂, однослойные и трехслойные прототипы чувствительного элемента W/CeB₆/W [18–21]. Изготовление многоэлементных матриц чувствительного элемента ТОД возможно методами импульсного лазерного напыления для получения однородных по толщине и составу большеразмерных пленок и многослойных структур [22,23].

Многие применения однофотонных детекторов в квантовых технологиях, фотонике и телекоммуникационных системах предполагают определение числа поглощенных фотонов [24–27]. Существуют различные типы детекторов, позволяющие определять число поглощенных фотонов [28–33], однако, они не лишены недостатков [34]. Сверхпроводящие однофотонные детекторы могут считать количество поглощенных фотонов вплоть до четырех [34–36]. Возникает вопрос – может ли ТОД считать большее количество фотонов? В работах [37,38] рассмотрено одновременное поглощение более одного фотона в SiO₂/W/CeB₆/W чувствительном элементе ТОД. Результаты численного моделирования показали, что данный чувствительный элемент способен различать случаи одновременного

поглощения 2, 3 и 4 фотонов. Четырехслойный чувствительный элемент ТОД с FeSb₂ сенсором [39] имеет более высокие характеристики по сравнению с чувствительным элементом с CeB₆ сенсором [12]. Целью данной работы является изучение процессов распространения тепла в SiO₂/W/FeSb₂/W четырехслойном чувствительном элементе ТОД при поглощении более одного фотона с заданной энергией и выявление потенциальных возможностей такого детектора.

2. Методика расчетов

Использованная нами методика моделирования процессов распространения тепла в чувствительном элементе ТОД основана на уравнении распространения тепла из ограниченного объема. Мы не рассматриваем изученный различными авторами процесс конверсии энергии фотона в тепло [40]. Нами рассматриваются процессы в чувствительном элементе ТОД после термализации фотона в поглотителе. Этот момент является началом рассматриваемых процессов. В расчетах используется трехмерный матричный метод для дифференциальных уравнений в частных производных. Подробности методики расчетов представлены в работе [38]. В результате моделирования процессов распространения тепла поглощенного

Табл.1. Физические параметры использованных материалов при 9 К [41–48]

Параметр	Материал			
	SiO ₂	FeSb ₂	W	Al ₂ O ₃
Плотность, кг/м ³	2650	8170	19250	4000
Удельная теплоемкость, Дж/(кг К)	1.4	0.0133	0.187	0.088
Теплопроводность, Вт/(м К)	0.1	500	9680	1100
Коэффициент Зеебека, мкВ/К		-4200		

фотона определяется временная зависимость температуры различных областей чувствительного элемента ТОД и рассчитываются следующие характеристики: максимальная разница температур на границах поглотитель-сенсор и сенсор-теплоотвод (ΔT_m), время достижения максимума (t_m), возникающее на сенсоре максимальное электрическое напряжение ($V_m = S\Delta T_m$, где S – коэффициент Зеебека материала сенсора), время (t_b) спада температуры до фонового значения 0.1 мК и скорость счета ($R = 1/t_b$).

Факт поглощения фотона в ТОД регистрируется измерением электрического напряжения на сенсоре. Поскольку V_m пропорционально коэффициенту Зеебека материала сенсора, то это необходимо учитывать при выборе материала сенсора и рабочей температуры детектора. Термоэлектрик FeSb₂ имеет максимальный коэффициент Зеебека при 9 К. Именно эта температура выбрана нами в

качестве рабочей температуры чувствительного элемента $\text{SiO}_2/\text{W}/\text{FeSb}_2/\text{W}/\text{Al}_2\text{O}_3$. Используемые в расчетах физические параметры материалов чувствительного элемента приведены в табл.1.

3. Результаты и обсуждения

3.1. Одновременное поглощение нескольких фотонов

Исследованы процессы поглощении фотонов с энергией 0.95 эВ ($\lambda = 1305$ нм) в чувствительном элементе с SiO_2 антиотражающим слоем, W поглотителем, FeSb_2 термоэлектрическим сенсором и W теплоотводом. Эта многослойная конструкция располагается на Al_2O_3 диэлектрической подложке и имеет площадь поверхности 10×10 мкм². Толщина антиотражающего слоя и теплоотвода составляла 0.1 мкм, поглотителя – 0.2 мкм, термоэлектрического сенсора – 0.05 мкм. Рассмотрим сначала одновременное поглощение в $\text{SiO}_2/\text{W}/\text{FeSb}_2/\text{W}/\text{Al}_2\text{O}_3$ чувствительном элементе ТОД двух или более фотонов, первый из которых поглощается в центре поверхности поглотителя на глубине 0.01 мкм. Второй и следующие фотонны поглощаются на отрезке длиной 1 мкм от центра на той же глубине на расстоянии d друг от друга. В результате проведенных расчетов получены временные зависимости температуры на границах поглотитель-сенсор (A), сенсор-теплоотвод (B) и теплоотвод-подложка (C), данным с которых присвоены соответствующие индексы. Второй индекс рассмотренных параметров показывает на каком расстоянии от центра границы они регистрируются.

Для выявления характеристик детектора нами рассматривались временные зависимости температуры непосредственно под зоной термализации фотона на

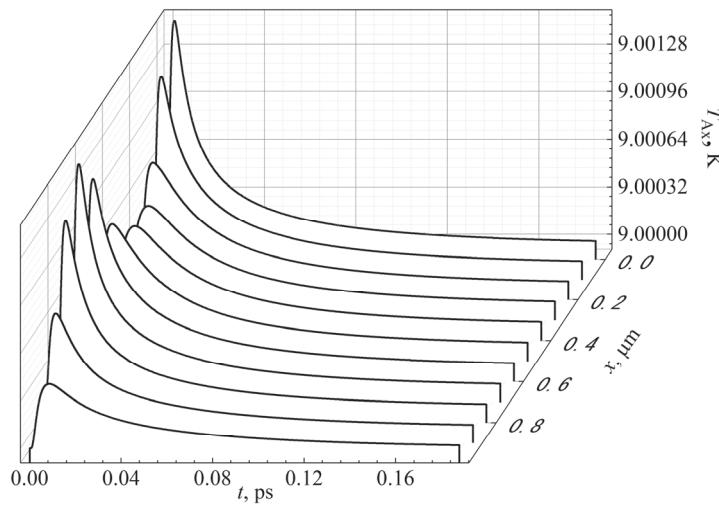


Рис.1. Пространственно-временное распределение температуры на границе поглотитель-сенсор после поглощения двух фотонов с энергией 0.95 эВ на расстоянии $d = 0.7$ мкм друг от друга.

границах А, В и С, на отрезке 1 мкм от центра с шагом 0.1 мкм на границе А и на расстоянии от центра 2 мкм и 4 мкм на границе В. На рис.1 приведена пространственно-временная зависимость температуры на границе А после поглощения двух фотонов на расстоянии 0.7 мкм друг от друга. Оси трехмерного графика обозначают прошедшее с момента термализации фотона время – t , расстояние от центра – x и температуру – T_{Ax} .

Ход кривых $T_{Ax}(t)$ имеет одинаковый вид при всех значениях x . Температура достигает максимального значения T_{Axm} за время t_{Axm} , затем спадает до фонового значения за время t_{Axb} . При одновременном поглощении двух фотонов на расстоянии 0.7 мкм достигаются два наибольшие значения параметра T_{Axm} при x равном 0 мкм и 0.7 мкм, т.е. непосредственно под зонами термализации фотонов. Чем дальше от этих двух точек фиксируется температура, тем меньшие значения параметр T_{Axm} достигаются. По расчетам, на границе В на расстоянии 2 мкм и 4 мкм от центра и в центре границы С температура намного ниже фона в течении всего процесса спада температуры на границе А до фонового значения. Максимум температуры на границе В достигается несколько позже, и он меньше, чем на границе А. В дальнейших рассмотрениях допустим, что в эксперименте возможно регистрировать разность потенциалов с участка на границе А где температура максимальна и с участка на границе В где температура минимальна. Тогда сигнал детектора будет пропорционален произведению максимальной температуры на границе А и коэффициента Зеебека сенсора. Численные данные анализа временной

Табл.2. Параметры временной зависимости температуры на границе А

№	d , мкм	x, мкм									
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
T_{Axm} , К/ t_{Axm} , фс/ t_{Axb} , фс											
1	–	9.0015	9.0013	9.0008	9.0004	9.0003	9.0002	0.0001			
	3.5	3.8	5.3	8.5	13.1	18.8	25.5				
	66.3	66.0	64.2	61.2	56.1	48.6	25.5				
2	0.3	9.0018	9.0020	9.0020	9.0018	9.0014	9.0008	9.0005	9.0003	9.0002	9.0001
	4.1	4.3	4.3	4.1	4.3	6.2	10.4	16.3	23.3	31.4	
	98.9	99.8	99.8	98.9	96.8	93.8	89.6	83.6	75.5	63.5	
3	0.5	9.0015	9.0014	9.0012	9.0012	9.0014	9.0015	9.0013	9.0008	9.0004	9.0003
	3.6	4.3	6.4	6.4	4.3	3.6	3.8	5.4	8.8	14.0	20.9
	95.0	96.8	98.0	98.0	96.8	95.0	92.3	88.1	82.7	75.5	65.3
4	0.7	9.0015	9.0013	9.0008	9.0007	9.0007	9.0008	9.0013	9.0015	9.0013	9.0008
	3.5	3.8	6.2	10.1	10.1	6.2	3.8	3.5	3.8	5.3	8.5
	89.5	92.2	94.0	94.6	94.6	94.0	92.2	89.5	85.9	81.4	75.1
5	0.5	9.0015	9.0014	9.0012	9.0012	9.0014	9.0016	9.0013	9.0012	9.0012	9.0015
	1	3.6	4.2	6.4	6.5	4.4	3.7	4.4	6.5	6.4	4.3
	107.8	111.4	114.1	116.2	117.1	117.7	117.1	116.2	114.1	111.4	107.8
6	0.3	9.0018	9.0020	9.0021	9.0022	9.0022	9.0022	9.0021	9.0020	9.0018	9.0014
	0.6	4.2	4.5	4.7	4.9	4.9	4.9	4.7	4.5	4.2	4.3
	0.9	131.2	134.2	136.6	138.1	138.7	138.7	138.1	136.6	134.2	131.2
7	0.3	9.0036	9.0041	9.0042	9.0043	9.0043	9.0043	9.0042	9.0041	9.0036	9.0027
	0.6	4.2	4.5	4.7	4.9	4.9	4.9	4.7	4.5	4.2	4.3
	0.9	182.0	184.7	186.8	188.0	188.6	188.6	188.0	186.8	184.7	182.0
											178.7

зависимости температуры на границе А после одновременного поглощения до 8 фотонов приведены в табл.2. Первые два столбца таблицы содержат номер расчета и расстояние d . В остальных столбцах приведены параметры временной зависимости температуры на границе А на расстоянии x от центра. В каждой ячейке таблицы сверху вниз расположены параметры T_{Axm} , t_{Axm} и t_{Axb} .

3.1.1. Одновременное поглощение двух фотонов

В первой строке таблицы приведены результаты моделирования процесса поглощения одного фотона в центре поглотителя. Расчеты №2–4 соответствуют поглощению двух фотонов, один из которых поглощается в центре поглотителя, второй – на расстоянии 0.3, 0.5 и 0.7 мкм соответственно. Расчеты №5 и №6 соответствуют поглощению трех и четырех фотонов, №7 – восьми фотонов с энергией 0.95 эВ (по два фотона в центре и при d равном 0.3, 0.6 и 0.9 мкм). Максимальные значения параметров T_{Axm} и t_{Axb} каждого расчета отмечены в таблице жирным шрифтом. Общий для всех расчетов является то, что максимальное значение параметра T_{Axm} в 15 и более раз превосходит значение фона и достигается за несколько фемтосекунд. Максимальное значение параметра t_{Axb} меняется в более широких пределах от 66.3 фс до 188.6 фс. Из данных таблицы можно видеть, что значение параметра T_{Axm} расчетов №3 и №4, поглощение двух фотонов на расстоянии 0.7 и 0.5 мкм, такое же как в случае поглощения одного фотона ($T_{Axm} = 9.0015$ К) и достигается непосредственно под зоной термализации фотонов. Время спада температуры до фонового значения максимально при значениях x , соответствующих середине отрезка d . Параметр T_{Axm} расчета №2, поглощение двух фотонов на расстоянии 0.3 мкм, выше ($T_{Axm} = 9.0020$ К) и достигается в середине между областями термализации фотонов. Зависимости максимального электрического напряжения V_m и скорости счета R от расстояния между зонами термолизами двух фотонов приведены на рис.2. Видно, что уменьшение d от

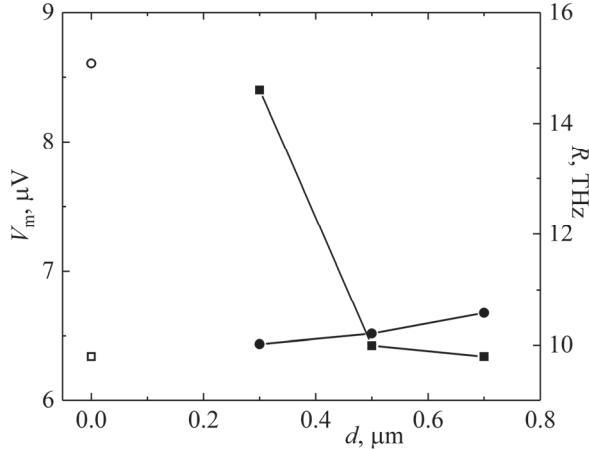


Рис.2. Зависимость напряжения V_m (квадраты) и скорости счета R (круги) от расстояния между зонами термализации двух фотонов. Поглощению одного фотона соответствуют открытые символы.

0.7 мкм до 0.3 мкм приводит к увеличению V_m и незначительному уменьшению R . При поглощении одного фотона V_m такое же как при поглощении двух фотонов на расстоянии 0.7 мкм, но при этом скорость счета намного выше.

3.1.2. Одновременное поглощение более двух фотонов

На рис.3 приведены зависимости максимального изменения температуры на границе поглотитель-сенсор и времени спада температуры до фонового значения от расстояния x для случаев поглощения трех и четырех фотонов. Как и следовало ожидать, ΔT_{Axm} и t_{Axb} выше при поглощении четырех фотонов. Если при поглощении трех фотонов максимумы параметров ΔT_{Axm} и t_{Axb} регистрируются при $x = 0.5$ мкм, то при поглощении четырех и восьми фотонов (расчеты №6 и №7) максимумы этих параметров достигаются в более широкой области значений x .

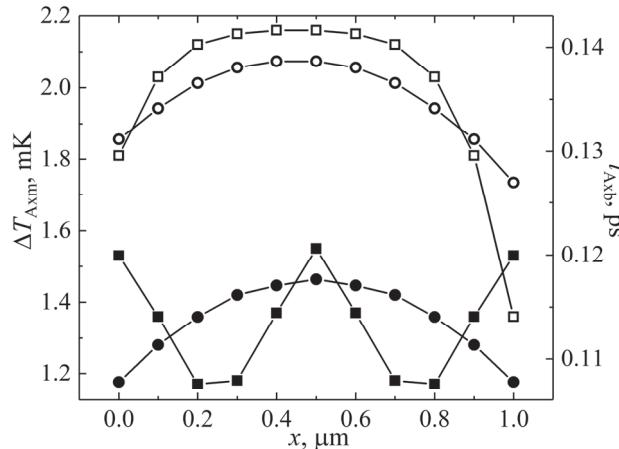


Рис.3. Значения параметров ΔT_{Axm} (квадраты) и t_{Axb} (круги) в случае поглощения трех фотонов (сплошные символы) и четырех фотонов (открытые символы).

Зависимости максимального электрического напряжения и скорости счета от числа поглощенных фотонов (N) приведены на рис.4. С увеличением числа поглощенных фотонов V_m растет, а R уменьшается. Однако, если зависимость параметра V_m от числа фотонов не монотонна, то параметр R с увеличением N монотонно уменьшается, следовательно, может быть использован для однозначного определения числа фотонов.

3.2. Регистрация фотонов, достигающих детектор с определенной временной задержкой

Перейдем к регистрации фотонов с энергией 0.95 эВ, поглощаемых в чувствительном элементе $\text{SiO}_2/\text{W}/\text{FeSb}_2/\text{W}/\text{Al}_2\text{O}_3$ с определенной временной задержкой (τ). Рассмотрим работу однофотонного детектора в режиме счета фотонов при меньших чем t_{Axb} значениях τ . Исследованы процессы распространения тепла

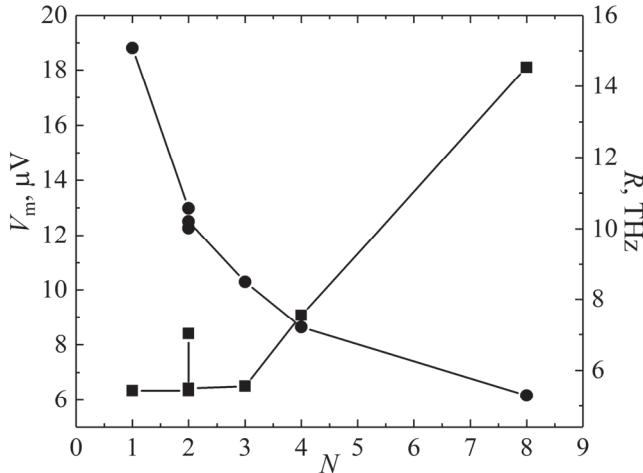


Рис.4. Зависимость параметров V_m и R от числа одновременно поглощенных фотонов.

в чувствительном элементе с толщиной антиотражающего слоя и теплоотвода 0.1 мкм, сенсора – 1 мкм и поглотителя – 0.05 мкм. Фотоны поглощаются в центре поверхности поглотителя на глубине 0.01 мкм. На рис.5 приведена пространственно-временная зависимость температуры на границе А, после поглощения фотонов, следующих с временной задержкой $\tau = 30$ фс. И в данном случае максимальная температура на границе А после поглощения каждого фотона достигается непосредственно под зоной термализации фотонов.

Нами проведены расчеты также для значений $\tau = 20, 10$ и 5 фс. Значения максимального ($\Delta T_{A\max}$) и минимального ($\Delta T_{A\min}$) изменения температуры (по

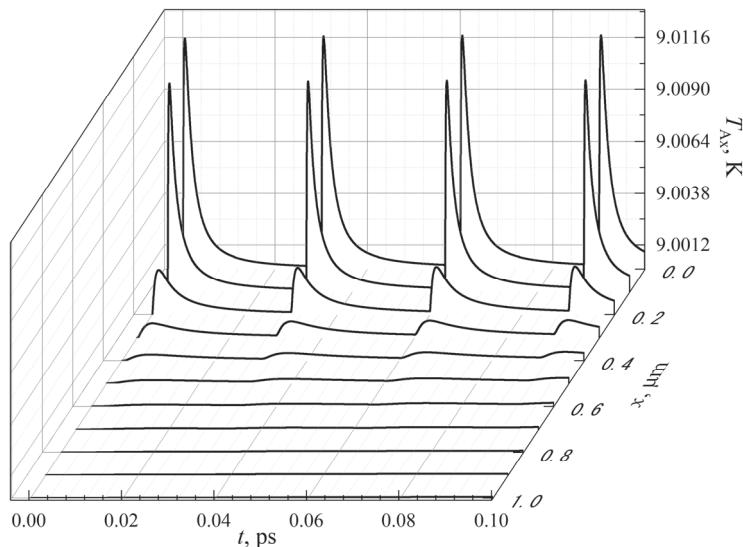


Рис.5. Пространственно-временное распределение температуры на границе А после поглощения фотонов с временной задержкой 0.03 пс.

Табл.3. Максимальное и минимальное изменения температуры на границе поглотитель-сенсор $\text{SiO}_2/\text{W}/\text{FeSb}_2/\text{W}$ чувствительного элемента после поглощения 0.95 эВ фотонов с временной задержкой τ

№	τ , фс	Номер фотона									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		$\Delta T_{Amax}, \text{ мК} / \Delta T_{Amin}, \text{ мК}$									
8	30	11.57 0.13	11.67 0.18	11.71 0.21	11.73 0.23						
9	20	11.57 0.25	11.75 0.34	11.82 0.38	11.86 0.41	11.88 0.44	11.90 0.46				
10	10	11.57 0.71	12.08 0.96	12.26 1.09	12.36 1.17	12.42 1.23	12.46 1.27	12.50 1.31	12.52 1.34	12.55 1.36	12.57 1.38
11	5	11.57 1.97	12.87 2.61	13.34 2.97	13.60 3.17	13.75 3.32	13.87 2.46	13.97 3.53	14.03 3.60	14.08 3.68	14.14 3.72

сравнению с рабочей температурой 9 К) на границе А после поглощения каждого фотона приведены в табл.3. Можно видеть, что ΔT_{Amax} первого фотона одинаков для всех четырех расчетов, а ΔT_{Amin} увеличивается с уменьшением τ . Это и понятно. За меньшее время до момента поглощения следующего фотона амплитуда сигнала предыдущего фотона спадает на меньшую величину.

Если смотреть данные каждой строки таблицы, то можно заметить, что значения ΔT_{Amax} и ΔT_{Amin} увеличиваются с каждым следующим фотоном. Однако изменение значений обоих параметров с каждым следующим фотоном происходит на меньшую величину.

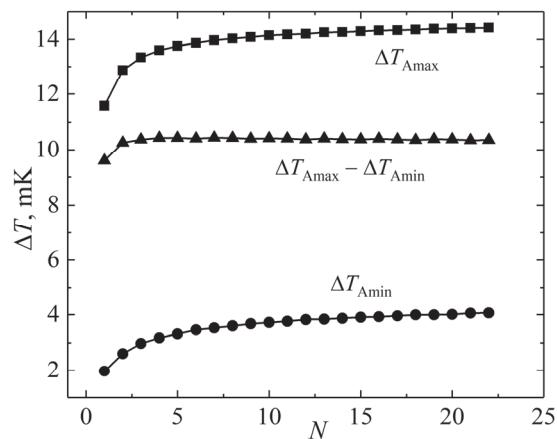


Рис.6. Зависимость параметров ΔT_{Amax} , ΔT_{Amin} и $\Delta T_{Amax} - \Delta T_{Amin}$ расчета №11 от номера поглощенного фотона.

На рис.6 приведены графики зависимости параметров $\Delta T_{A\max}$ и $\Delta T_{A\min}$ и их разности для расчета №11 вплоть до 22-го фотона. Все три кривые выходят на насыщение. Кривая разности максимального и минимального изменения температуры на границе А выходит на насыщение очень быстро. Практически после четвертого фотона разность $\Delta T_{A\max} - \Delta T_{A\min}$ стабилизируется на уровне 10.43 мК. Это более чем в 10 раз превышает уровень фона. С учетом коэффициента Зеебека термоэлектрика FeSb₂, такая разность температур будет соответствовать возникновению на сенсоре сигнала с амплитудой 43.8 мкВ. Следовательно, факт поглощения каждого фотона может быть надежно зафиксирован. В расчете №11 временная задержка фотонов составляет 5 фс, что соответствует скорости счета детектора 2×10^{14} Гц.

4. Заключение

Методом численного моделирования впервые исследованы процессы распространения тепла в чувствительном элементе SiO₂/W/FeSb₂/W термоэлектрического детектора после поглощения фотонов с энергией 0.95 эВ. Показано, что при одновременном поглощении до восьми фотонов на отрезке поверхности поглотителя длиной 1 мкм число фотонов может быть однозначно определено по времени спада сигнала до фонового значения. Исследованы также случаи поглощения фотонов с временной задержкой 30–5 фс. Показано, что с поглощением каждого следующего фотона увеличиваются максимальные и минимальные изменения температуры на границе поглотитель-сенсор. Однако, их разница с увеличением числа фотонов быстро выходит на насыщение. При этом обеспечивается сигнал с амплитудой более 40 мкВ, что превосходит сигнал от рассмотренного ранее чувствительного элемента ТОД с CeB₆ сенсором [38]. Одновременно может быть обеспечена скорость счета детектора 2×10^{14} Гц.

Конечно, в эксперименте характеристики ТОД будут отличаться от полученных в данной работе, но они настолько впечатляющие, что переход к экспериментальным исследованиям кажется необходимым. Перспективы использования детекторов с характеристиками близкими к полученным в данной работе весьма обширны. Это и многообразие применений в современных квантовых технологиях, и в традиционных областях однофотонного детектирования: астрофизика, космическая астрономия, физика высоких энергий, безопасность, тестирование чипов, медицинское приборостроение и других.

Автор выражает благодарность А.М. Гуляну, А.С. Кузаняну и В.Р. Никогсяну, за интерес к работе и полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. C.J. Chunnillall, I.P. Degiovanni, S. Kuck, I. Muller, A.G. Sinclair. Opt. Eng., **53**, 081910 (2014).
2. M.D. Eisaman, J. Fan, A. Migdall, S.V. Polyakov. Rev. Sci. Instrum., **82**, 071101 (2011).
3. R.H. Hadfield. Nat. Photonics, **3**, 696 (2009).

4. **G.N. Gol'tsman, O. Okuney, G. Chulkova, et al.** Appl. Phys. Lett., **79**(6), 705 (2001).
5. **L. Parlato, D. Salvoni, M. Ejrnaes, et al.** J Low Temp Phys., **199**, 6 (2020).
6. **D. Van Vechten, K. Wood, G. Fritz, J. Horwitz, A. Gyulamiryan, A. Kuzanyan, V. Vartanyan, A. Gulian.** Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, **444**, 42 (2000).
7. **A.A. Kuzanyan, A.S. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, V.N. Gurin, M.P. Volkov.** J. Contemp. Phys., **51**, 181 (2016).
8. **A.A. Kuzanyan, V.A. Petrosyan, A.S. Kuzanyan.** J. Phys. Conf. Ser., **350**, 012028 (2012).
9. **A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan.** Pros. SPIE, **9504**, 95040O-1 (2015).
10. **A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan.** J. Contemp. Phys., **53**, 338 (2018).
11. **A.A. Kuzanyan, A.S. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan.** J. Contemp. Phys., **54**, 175 (2019).
12. **A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan.** IEEE Sens. J., **20**(6), 3040 (2020).
13. **A.A. Kuzanyan.** J. Contemp. Phys., **51**, 360 (2016).
14. **A.A. Kuzanyan, A.S. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan.** J. Contemp. Phys., **53**, 242 (2018).
15. **A.S. Kuzanyan, A.A. Kuzanyan, V.N. Gurin, M.P. Volkov, V.R. Nikoghosyan.** Semiconductors J., **53** (5), 682 (2019).
16. **A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan.** J. Contemp. Phys., **52**, 249 (2017).
17. **A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan.** J. Contemp. Phys., **53**, 73 (2018).
18. **A.A. Kuzanyan, A.S. Kuzanyan, G.R. Badalyan, et al.** Semiconductors J., **51** (8), 999 (2017).
19. **A.A. Kuzanyan, A.S. Kuzanyan, S.I. Petrosyan, et al.** J. Contemp. Phys., **55**, 164 (2020).
20. **A.A. Kuzanyan, S.I. Petrosyan, A.S. Kuzanyan, G.R. Badalyan.** J. Contemp. Phys., **55**, 364 (2020).
21. **S.I. Petrosyan, A.A. Kuzanyan, G.R. Badalyan, A.S. Kuzanyan.** J. Contemp. Phys., **53**, 157 (2018).
22. **A.S. Kuzanyan, V.A. Petrosyan, S.Kh. Pilosyan, V.M. Nesterov.** Quantum Electron., **41** (3), 253 (2011).
23. **A.S. Kuzanyan, A.A. Kuzanyan.** Pulsed Laser Deposition of Large-Area Thin Films and Coatings, chapter in the book “Applications of Laser Ablation – Thin Film Deposition, Nanomaterial Synthesis and Surface Modification”, edited by Dongfang Yang, INTECH, 2016, p. 149-173.
24. **Y.-L. Tang, H.-L. Yin, S.-J. Chen, Y. Liu, et al.** Phys. Rev. Lett., **113**, 190501 (2014).
25. **P. Kok, W.J. Munro, K. Nemoto, T.C. Ralph, J.P. Dowling, G.J. Milburn.** Rev. Mod. Phys., **79**, 135 (2007).
26. **V. Giovannetti, S. Lloyd, L. Maccone.** Nat. Photonics, **5**, 222 (2011).
27. **M.A. Broome, A. Fedrizzi, S. Rahimi-Keshari, et al.** Science, **339**, 794 (2013).
28. **B.E. Kardynal, S.S. Hees, A.J. Shields, C. Nicoll, I. Farrer, D.A. Ritchie.** Appl. Phys. Lett., **90**, 181114 (2007).
29. **D. Rosenberg, A.E. Lita, A.J. Miller, S.W. Nam.** Phys. Rev. A, **71**, 1 (2005).
30. **G. Zambra, M. Bondani, S.A. Spinelli, F. Paleari, A. Andreoni.** Rev. Sci. Instrum., **75**, 2762 (2004).
31. **E. Waks, E. Diamanti, C.B. Sanders, D.S. Bartlett, Y. Yamamoto.** Phys. Rev. Lett., **92**, 113602 (2004).

32. **L.A. Jiang, E.A. Dauler, J.T. Chang.** Phys. Rev. A, **75**, 62325 (2007).
33. **M.J. Fitch, B.C. Jacobs, T.B. Pittman, J.D. Franson.** Phys. Rev. A, **68**, 043814 (2003).
34. **A. Divochiy, F. Marsili, D. Bitauld et al.** Nat. Photonics, **2**, 302 (2008).
35. **C. Cahall, K.L. Nicolich, N.T. Islam, G.P. Lafyatis, et al.** Optica, **4**(12), 1534 (2017).
36. **K. Zou, Y. Meng, Z. Wang, X. Hu.** Photonics Res., **8**(4), 601 (2020).
37. **A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan.** Pros. SPIE, **11027**, 110270K-1 (2019).
38. **A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan.** IEEE Sens. J., **20**(21), 12776 (2020).
39. **A.A. Kuzanyan.** Semiconductors J., In press.
40. **A.G. Kozorezov, C. Lambert, F. Marsili, M.J. Stevens, et al.** Phys. Rev. B, **96**, 054507 (2017).
41. **G.Jr. Carini, G. Carini, D. Cosio, G. D'Angelo, F. Rossi.** Philos. Mag., **96**, 761 (2016).
42. <https://nanoheat.stanford.edu/sites/default/files/publications/A33.pdf>
43. **M.S. Figueira, J. Silva-Valencia, R. Franco.** Eur. Phys. J. B, **85**(6), 203 (2012).
44. **A. Bentien, S. Johnsen, G.K.H. Madsen, B.B. Iversen, F. Steglich.** Europhys. Lett., **80**(1), 17008 (2007).
45. **T.R. Waite, R.S. Craig, W.E. Wallace.** Phys. Rev., **104**(5), 1240 (1956).
46. http://www.efunda.com/materials/elements/TC_Table.cfm?Element_ID=W
47. **G.T. Furukawa, T.B. Douglas, R.E. McCoskey, D.C. Ginnings.** J. Res. Natl. Bur. Stand., **57**(2), 67 (1956).
48. http://www.phys.ufl.edu/ireu/IREU2013/pdf_reports/Allen_Scheie_FinalReport.pdf

DETERMINATION OF PHOTONS NUMBER ABSORBED IN THE
 SiO₂/W/FeSb₂/W DETECTION PIXEL OF THERMOELECTRIC
 SINGLE-PHOTON DETECTOR

A.A. KUZANYAN

We present the results of the modeling of heat propagation processes in SiO₂/W/FeSb₂/W four-layer detection pixel of a thermoelectric single-photon detector after the absorption of more than one IR photons. The three-dimensional matrix method for partial differential equations is used for calculations. The cases of simultaneous absorption of several photons on a length of 1 μm of the absorber surface as well as the absorption of photons following with some optical delay are investigated. It is shown that the decay time of the detector signal to the background substantially depends on the number of simultaneously absorbed photons. The number of absorbed photons up to eight can be determined. SiO₂/W/FeSb₂/W sensitive element can also detect photons with an optical delay of 5 fs, which corresponds to the count rate of 2×10^{14} Hz. A detector with such characteristics is highly demanded in many areas of modern technology.