

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА В ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

А.А. КУЗАНЯН<sup>1,2</sup>, А.С. КУЗАНЯН<sup>1,3\*</sup>,  
В.Р. НИКОГОСЯН<sup>1</sup>, С.Р. АРУТЮНЯН<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак, Армения

<sup>2</sup>Калифорнийский университет, Лос-Анджелес, Калифорния, США

<sup>3</sup>Российско–Армянский университет, Ереван, Армения

\*e-mail: akuzanyan@yahoo.com

(Поступила в редакцию 8 февраля 2022 г.)

Методом компьютерного моделирования исследованы процессы распространения тепла в термоэлектрических чувствительных элементах, протекающие после поглощения одиночных УФ фотонов с энергией 3.1–7.1 эВ (400–175 нм). Рассмотрены конструкции чувствительного элемента с поверхностью  $10 \times 10$  мкм<sup>2</sup>, состоящие из последовательно расположенных на сапфировой подложке ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) слоев вольфрамового теплоотвода (W), термоэлектрического сенсора  $\text{FeSb}_2$ , вольфрамового поглотителя и антиотражающего слоя  $\text{SiO}_2$ . Компьютерное моделирование проводилось на основе уравнения распространения тепла из ограниченного объема с использованием трехмерного матричного метода для дифференциальных уравнений. Временная зависимость изменения температуры в различных областях чувствительного элемента рассчитана для толщин поглотителя 0.2–0.1 мкм и сенсора 0.1–0.05 мкм. Оценены фоновый и Джонсоновский шум чувствительного элемента  $\text{SiO}_2/\text{W}/\text{FeSb}_2/\text{W}/\text{Al}_2\text{O}_3$ . Показано, что такой чувствительный элемент при рабочей температуре 9 К способен регистрировать одиночные фотоны в УФ области спектра и обеспечивать высокое соотношение сигнал/шум.

### 1. Введение

Детекторы, способные регистрировать одиночный фотон, используются во многих областях современной науки и техники, а именно в спектроскопии, биофизике, физике высоких энергий, астрономии, фотонике, различных квантовых технологиях, телекоммуникационных системах, космической связи, безопасности, медицинских приборах и т.д. [1]. Существуют различные типы однофотонных детекторов (SPD) с различными характеристиками, преимуществами и недостатками, а именно, фотоумножители (PMT), однофотонные лавинные диоды (SPAD), сверхпроводящие датчики на границе перехода (TES), сверхпроводящие нанопроволочные детекторы (SNSPD) [2]. Каждый из них имеет

различные параметры и используется для решения разных задач. Основными характеристиками SPD являются эффективность обнаружения, скорость счета, скорость темнового счета, рабочая температура и спектральный диапазон [3]. SNSPD обладают самыми высокими характеристиками среди существующих детекторов [4], однако они достаточно дорогие, предъявляют жесткие требования к условиям эксплуатации и не все их характеристики могут обеспечить решение текущих задач. Возможности создания SPD УФ диапазона изучены мало [5–7]. Такие детекторы востребованы в различных областях современных технологий, в частности, в квантовой обработке информации, исследовании верхних слоев атмосферы, УФ-флуоресцентной микроскопии и астрономии. Таким образом, создание недорогого детектора УФ-фотонов с улучшенными характеристиками, простой конструкцией и с не слишком жесткими требованиями к условиям эксплуатации является актуальной задачей. Термоэлектрический однофотонный детектор (TSPD) может удовлетворить этим требованиям. Идею TSPD предложила совместная армяно-американская исследовательская группа [8]. Согласно теоретическим расчетам и результатам компьютерного моделирования термоэлектрический детектор позволяет регистрировать одиночный фотон, определять его энергию и имеет ряд преимуществ [9]. Среди важнейших преимуществ – простая конструкция чувствительного элемента и отсутствие жестких требований к условиям работы [10]. Имея высокие характеристики, термоэлектрические однофотонные детекторы могут быть альтернативой существующим детекторам [11,12].

Эффективность детектирования зависит от соотношения сигнал/шум [13]. Чувствительный элемент термоэлектрического детектора является болометром, который преобразует тепло поглощенного фотона в электрический сигнал. Шум болометра складывается из шумов различной природы [14]. Сигнал термоэлектрического сенсора пропорционален возникающей на сенсоре разности температур и коэффициенту Зеебека материала сенсора. В наших предыдущих работах в качестве материала низкотемпературного термоэлектрического сенсора мы преимущественно рассматривали гексабориды редких земель [15]. Однако полупроводник  $\text{FeSb}_2$  может обладать значительно более высокими значениями коэффициента Зеебека при низких температурах [16,17]. В данной работе мы методом компьютерного моделирования изучили процессы распространения тепла в пятислойном чувствительном элементе  $\text{SiO}_2/\text{W}/\text{FeSb}_2/\text{W}/\text{Al}_2\text{O}_3$  (SiWFeWAl) и определили основные параметры возникающего сигнала, а также оценили джонсоновский и фононный шумы, основываясь на уравнениях для полупроводниковых термоэлектрических устройств [18].

## 2. Методика расчетов

Моделирование процессов распространения тепла в чувствительном элементе SiWFeWAl с поверхностью  $10 \times 10 \text{ мкм}^2$  и толщинами  $Z_1/Z_2/Z_3/Z_4/\text{Al}_2\text{O}_3$  проводилось на основе уравнения распространения тепла из ограниченного объема с использованием трехмерного матричного метода для дифференциальных

уравнений. Антиотражающий слой  $\text{SiO}_2$  обеспечивает оптическую связь чувствительного элемента с регистрируемым излучением [19]. Он расположен на вольфрамовом поглотителе, который в свою очередь находится на  $\text{FeSb}_2$  термоэлектрическом сенсоре. Под сенсором находится вольфрамовый теплоотвод, расположенный на диэлектрической сапфировой подложке. Фотоны термализуются в центре поверхности абсорбера на глубине 0.005 мкм. Рассмотрены случаи поглощения УФ фотонов с энергией от 3.1 эВ (400 нм) до 7.1 эВ (175 нм). В данной области спектра коэффициент поглощения  $W$  изменяется в пределах  $1.3542 \times 10^6 - 1.8031 \times 10^6 \text{ см}^{-1}$  [20]. Пользуясь уравнением Бугера–Ламберта–Бера рассчитана вероятность достижения фотонами определенной глубины в  $W$ . Вероятность поглощения в  $W$  для всех рассмотренных УФ фотонов превышает 99% на глубине 0.035 мкм. Моделирование процессов распространения тепла проведено для толщин поглотителя ( $Z_2$ ) 0.1 и 0.2 мкм, которые обеспечивают надежное поглощение фотонов. Толщина сенсора ( $Z_3$ ) принималась равной 0.05, 0.1, 0.5 и 1 мкм. Во всех расчетах толщина антиотражающего слоя ( $Z_1$ ) и теплоотвода ( $Z_4$ ) составляла 0.1 мкм, а подложки – 1 мкм.

Низкая рабочая температура однофотонных детекторов необходима для достижения малых значений шумов. Расчеты проводились при рабочей температуре чувствительного элемента 9 К. При этой температуре термоэлектрик  $\text{FeSb}_2$  имеет очень высокий коэффициент Зеебека. Этим обеспечивается высокий уровень сигнала детектора в соответствии с формулой, определяющей величину возникающего на сенсоре электрического напряжения  $V = S\Delta T$  ( $V$  – возникающее на чувствительном элементе электрическое напряжение,  $S$  – коэффициент Зеебека термоэлектрика  $\text{FeSb}_2$ ,  $\Delta T$  – разность температур на границах сенсора после поглощения фотона). В табл.1 представлены используемые в расчетах физические параметры материалов чувствительного элемента  $\text{SiWFeWAl}$ .

Табл.1. Параметры использованных в конструкции чувствительного элемента  $\text{SiWFeWAl}$  материалов при 9К

Параметры	Материал			
	$\text{SiO}_2$	$\text{FeSb}_2$	W	$\text{Al}_2\text{O}_3$
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2650	8170	19250	4000
Удельная теплоемкость, Дж/(кг К)	1.4 [21]	0.0133 [23]	0.187 [25]	0.0588 [27]
Теплопроводность, Вт/(м К)	0.1 [22]	500 [23]	9680 [26]	300 [28]
Коэффициент Зеебека, мкВ/К		-4200 [24]		

Программа компьютерного моделирования подробно описана в работе [12] и позволяет получить временную зависимость температуры в любой области чувствительного элемента. Рассматриваются данные температуры в следующих областях: термализации фотона ( $T_{\text{hs}}$ ), на границе поглотитель–сенсор непосредственно под горячим пятном ( $T_0$ ) и 10 областей на расстоянии  $d$  от

центра с шагом 0.1 мкм ( $T_1$ ), ( $T_2$ ), ..., ( $T_{10}$ ), на границе сенсор–теплоотвод непосредственно под горячим пятном ( $T_{11}$ ) и с шагом 2 мкм от центра этой границы ( $T_{12}$ ) и ( $T_{13}$ ), на границе теплоотвод–подложка непосредственно под горячим пятном ( $T_{14}$ ). Определяются следующие параметры: максимальная температура  $T_m$ , максимальное изменение температуры  $\Delta T_m = T_m - 9\text{К}$ , время достижения максимума  $t_m$ , возникающее на сенсоре максимальное электрическое напряжение  $V_m$ , время спада сигнала до уровня фона  $t_b$ , отличающегося от рабочей температуры на 0.1 мК, обратная ей величина  $R = 1/t_b$  – скорость счета. В данной работе методом компьютерного моделирования исследованы процессы распространения тепла в чувствительных элементах SiWFeWAl с различной толщиной поглотителя и сенсора после поглощения одиночных УФ фотонов с энергией 3.1–7.1 эВ (400–175 нм).

### 3. Результаты и обсуждение

#### 3.1. Поглощение фотона с энергией 3.1 эВ в чувствительном элементе SiWFeWAl с толщинами поглотителя 0.1 мкм и сенсора 0.05 мкм

Рассмотрим подробно процессы распространения тепла в чувствительном элементе SiWFeWAl после поглощения фотона с энергией 3.1 эВ в центре поверхности вольфрамового поглотителя с толщиной  $Z_2 = 0.1$  мкм при толщине FeSb<sub>2</sub> сенсора  $Z_3 = 0.05$  мкм. Пространственно-временная зависимость температура в различных областях границы поглотитель-сенсор на расстоянии  $d$  от центра представлена на рис.1. Максимумы зависимости  $T(t)$  уменьшаются с удалением от центра границы. Тепло, выделенное при поглощении фотона, не распространяется на большие расстояния в чувствительном элементе с поверхностью  $10 \times 10$  мкм<sup>2</sup>. С удалением от центра границы параметры  $T_m$  и  $t_b$  уменьшаются, а  $t_m$  – увеличивается (рис.2). Максимальное увеличение температуры на границе поглотитель-сенсор составляет 16.9 мК, время возврата чувствительного

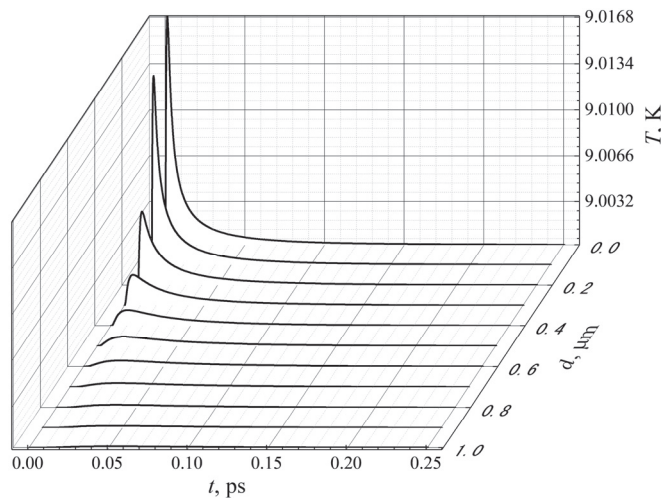


Рис.1. Пространственно-временная зависимость температуры в различных областях границы поглотитель–сенсор на расстоянии  $d$  от центра после поглощения фотона с энергией 3.1 эВ.

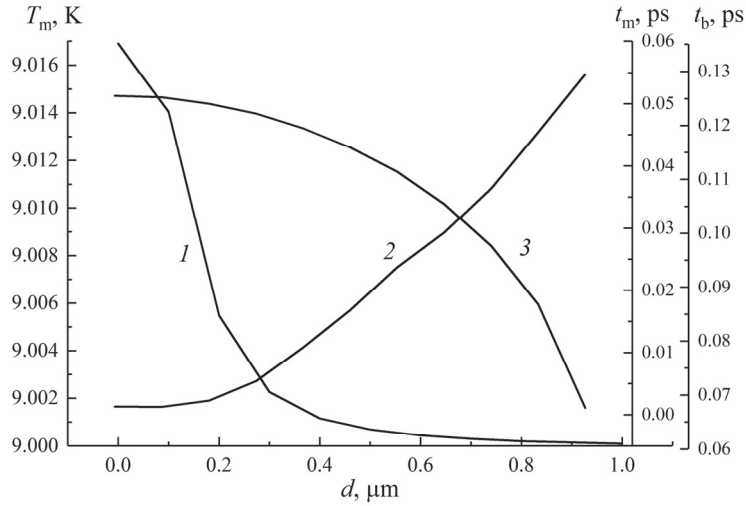


Рис.2. Зависимость параметров  $T_m$  (1),  $t_m$  (2) и  $t_b$  (3) от расстояния  $d$  на границе поглотитель–сенсор.

элемента в исходное состояние – 0.127 пс. На рис.3 приведены временные зависимости температуры на различных границах чувствительного элемента. Температура в центре границы поглотитель–сенсор ( $T_0$ ) быстрее достигает более высокого максимума по сравнению с температурой в центре границы сенсор–теплоотвод ( $T_{11}$ ). Временная зависимость разности температур в центре границ поглотитель–сенсор и сенсор–теплоотвод ( $T_0 - T_{11} + 9$  К) имеет очень узкий максимум с шириной на полувысоте 0.45 фс. Кривая этой зависимости достигает максимума 8.9 мК за время 0.78 фс и быстро спадает до фона за 9.18 фс. Как видно на вставке рис.3, изменение температуры в центре границы теплоотвод–подложка ( $T_{14}$ ) достигает максимума 5.75 мК за время 4.38 фс и становится

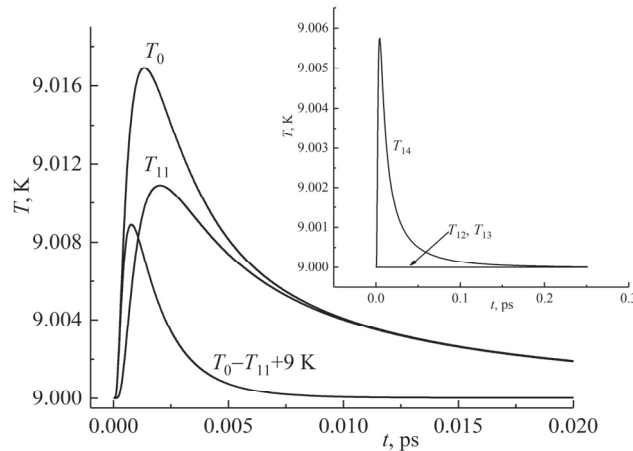


Рис.3. Временная зависимость температуры в центре границы поглотитель–сенсор ( $T_0$ ), сенсор–теплоотвод ( $T_{11}$ ) и их разность плюс рабочая температура ( $T_0 - T_{11} + 9$  К). На вставке приведена временная зависимость температуры на расстоянии 2 мкм ( $T_{12}$ ) и 4 мкм ( $T_{13}$ ) от центра границы сенсор–теплоотвод, а также в центре границы теплоотвод–подложка ( $T_{14}$ ).

меньше 0.1 мК за 118 фс. Температура на расстоянии 2 мкм ( $T_{12}$ ) и 4 мкм ( $T_{13}$ ) от центра границы сенсор–теплоотвод не превышает уровень фона.

3.2. Основные параметры процессов распространения тепла в чувствительном элементе SiWFeWAl с толщинами поглотителя 0.1 мкм и сенсора 0.05 мкм после поглощения фотонов с различной энергией

Рассмотрим процессы распространения тепла, выделенного при поглощении фотонов с энергией 3.1–7.1 эВ в чувствительном элементе с толщинами слоев  $Z_1 = Z_4 = 0.1$  мкм,  $Z_2 = 0.1$  мкм и  $Z_3 = 0.05$  мкм. Закономерности распространения тепла, описанные выше для фотонов с энергией 3.1 эВ, проявляются также при поглощении фотонов с большей энергией. Основные параметры временной зависимости температуры в центре поверхностей поглотитель–сенсор (максимальная температура  $T_{0m}$ , время спада сигнала  $t_{0b}$ ), сенсор–теплоотвод ( $T_{11m}$ ,  $t_{11b}$ ) и разности изменения температуры на этих границах ( $T_{0-11m}$ ,  $t_{0-11b}$ ) представлены в табл.2. Все приведенные в таблице параметры увеличиваются с ростом энергии поглощенного фотона. Причем, все три параметра  $T_{0m}$ ,  $T_{11m}$  и  $T_{0-11m}$  увеличиваются с ростом энергии линейно. Временные параметры  $t_{0m}$ ,  $t_{11m}$  и  $t_{0-11m}$  с ростом энергии монотонно увеличиваются, но наклон кривой с ростом энергии уменьшается. Зависят только от конструкции чувствительного элемента и не зависят от энергии поглощенного фотона времена достижения максимальной температуры  $t_{0m} = 1.32$  фс,  $t_{11m} = 2.01$  фс,  $t_{0-11m} = 0.78$  фс и ширина на полувывсоте временной зависимости разности температур на двух границах сенсора  $T_{0-11(FWHM)} = 1.78$  фс.

Табл.2. Основные параметры расчетов при поглощении фотонов с энергией 3.1–7.1 эВ

$E$ , эВ	$T_{0m}$ , К	$t_{0m}$ , фс	$t_{0b}$ , фс	$T_{11m}$ , К	$t_{11m}$ , фс	$t_{11b}$ , фс	$T_{0-11m}$ , мК	$t_{0-11b}$ , фс
3.1	9.0169	1.32	126.72	9.0109	1.98	122.2	8.9	9.18
3.6	9.01964	1.35	134.52					
4.1	9.02236	1.35	141.42	9.0144	2.01	136.6	11.77	9.93
4.6	9.02509	1.32	147.78					
5.1	9.02782	1.32	153.48	9.01793	2.01	148.4	14.63	10.68
5.6	9.03036	1.29	158.7					
6.1	9.03327	1.32	163.5	9.02145	2.01	158.4	17.5	11.19
6.6	9.036	1.32	168					
7.1	9.03873	1.35	172.2	9.02496	2.01	167.1	20.37	11.76

Линейная зависимость параметров  $T_{0m}$ ,  $T_{11m}$  и  $T_{0-11m}$  от энергии фотона позволяет рассчитать температуру на границе сенсор–теплоотвод и изменение температуры относительно рабочей на двух границах сенсора на расстоянии  $d$  от центра. Зная параметры  $\Delta T_{0dm}$  и  $\Delta T_{11dm}$ , можно определить для расстояния  $d$  их разность  $\Delta T_{0dm} - \Delta T_{11dm}$ . Зависимость этих трех параметров от расстояния  $d$  для случая поглощения фотона с энергией 4.1 эВ представлена на рис.4.

Параметр  $\Delta T_{0dm} - \Delta T_{11dm}$  в нашем рассмотрении имеет важное значение, т.к. им обусловлен сигнал детектора. Для случая поглощения фотона с энергией

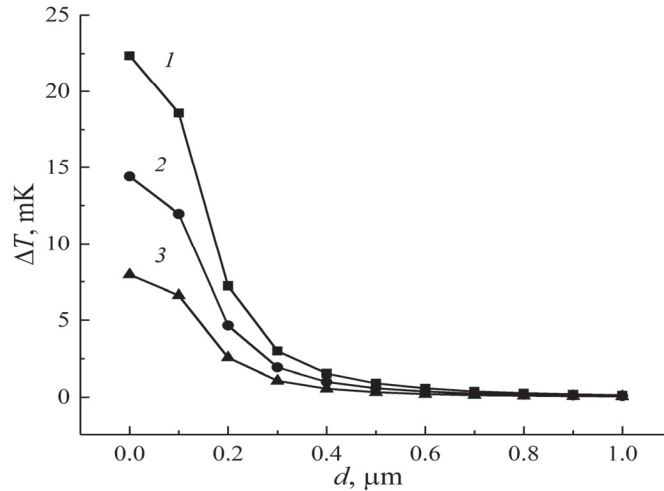


Рис.4. Зависимость от расстояния  $d$  параметров  $\Delta T_{0dm}$  (1),  $\Delta T_{11dm}$  (3) и  $\Delta T_{0dm} - \Delta T_{11dm}$  (2) при поглощении фотона с энергией 4.1 эВ.

4.1 эВ он выше фона при  $d \leq 0.7$  мкм и имеет на этом отрезке среднее значение 2.43 мК. Электрическое напряжение, соответствующее приблизительно этой разности температур на границах сенсора, будет возникать на чувствительном элементе диаметром 1.4 мкм. Это напряжение можно сравнить со значениями шумов. Очевидно, что при моделировании процессов распространения тепла в чувствительном элементе именно такого размера мы получим более высокие значения температуры на границах сенсора, т.к. будет исключено распространение тепла в области чувствительного элемента за границы цилиндра диаметром 1.4 мкм.

### 3.3. Параметры процессов распространения тепла в чувствительном элементе SiWFeWAl при разных толщинах поглотителя и сенсора

Перейдем к рассмотрению процессов распространения тепла, выделенного при поглощении фотонов с энергией 3.1, 4.1, 5.1, 6.1 и 7.1 эВ в чувствительных элементах с различными толщинами слоев  $Z_2$  и  $Z_3$ . Результаты расчетов представлены в табл.3. В первых трех группах из пяти расчетов толщина сенсора последовательно увеличивалась и принимала значения 0.1, 0.5 и 1 мкм. В этих расчетах толщина поглотителя принята равной 0.1 мкм. Четвертая группа расчетов проведена для значений толщин  $Z_2 = 0.2$  мкм и  $Z_3 = 0.5$  мкм.

Анализ представленных в табл.3 данных показывает, что как максимальные температуры ( $T_{0m}$ ,  $T_{11m}$ ,  $T_{0-11m}$ ), так и времена спада температуры до уровня фона ( $t_{0b}$ ,  $t_{11b}$ ,  $t_{0-11b}$ ) возрастают с увеличением энергии поглощенного фотона в каждой из четырех групп расчетов. Параметр  $T_{0m}$  практически одинаков для расчетов поглощения фотонов с одинаковой энергией в первых трех группах. Это и понятно, так как в этих расчетах использовано одно и то же значение толщины поглотителя ( $Z_2 = 0.2$  мкм). Тепло из горячего пятна, распространяясь во все стороны, проходит одинаковое расстояние через вольфрамовый поглотитель до границы поглотитель–сенсор, что и определяет зависимость температуры  $T_{0m}$  только от энергии  $E$ , но не от изменяющейся в этих группах расчетов толщины сенсора  $Z_3$ . В отличие от этого, параметр  $T_{11m}$ , для одинаковых значений  $E$ , уменьшается с

Табл.3. Основные параметры расчетов при поглощении УФ фотонов в чувствительном элементе с различными толщинами слоев поглотителя ( $Z_2$ ) и сенсора ( $Z_3$ )

$E$ , эВ	$Z_2$ , мкм	$Z_3$ , мкм	$T_{0m}$ , К	$t_{0b}$ , фс	$T_{11m}$ , К	$t_{11b}$ , фс	$T_{0-11m}$ , К	$t_{0-11b}$ , фс
3.1	0.1	0.1	9.01636	123.12	9.00643	120.42	0.01332	12.63
4.1			9.02163	139.62	9.00850	136.32	0.01762	13.83
5.1			9.02691	152.88	9.01058	149.58	0.02192	14.94
6.1			9.03219	164.04	9.01265	160.74	0.02622	16.14
7.1			9.03746	173.94	9.01473	170.34	0.03051	17.64
3.1	0.1	0.5	9.01630	102.24	9.00042	90.54	0.01630	35.94
4.1			9.02156	123.96	9.00056	110.76	0.02156	39.96
5.1			9.02682	143.16	9.00070	128.16	0.02682	43.56
6.1			9.03208	159.96	9.00083	144.06	0.03208	46.86
7.1			9.03734	175.32	9.00097	158.52	0.03734	49.92
3.1	0.1	1	9.01630	85.14	9.00007	-	0.01630	58.44
4.1			9.02156	103.44	9.00010	-	0.02156	65.34
5.1			9.02682	120.60	9.00012	80.70	0.02682	71.70
6.1			9.03208	137.40	9.00015	99.60	0.03208	77.10
7.1			9.03734	153.30	9.00017	115.80	0.03734	81.90
3.1	0.2	0.5	9.00459	106.14	9.00027	88.44	0.00459	44.64
4.1			9.00607	128.64	9.00036	109.14	0.00606	49.74
5.1			9.00754	148.62	9.00045	127.32	0.00754	54.12
6.1			9.00902	166.62	9.00053	143.82	0.00902	58.62
7.1			9.01050	183.12	9.00062	159.12	0.01050	62.52

увеличением  $Z_3$ . Причем, для толщин  $Z_2 = 0.1$  мкм и  $Z_3 = 1$  мкм, при  $E$  равной 3.1 и 4.1 эВ параметр  $T_{11m}$  становится меньше значения фона. Параметр  $T_{0-11m}$ , увеличивается как с увеличением энергии  $E$ , так и толщины  $Z_3$  от 0.1 до 0.5 мкм. Однако, для случаев поглощения фотонов с одинаковой энергией, параметр  $T_{0-11m}$  одинаков при толщине  $Z_3$  равной 0.5 и 1 мкм. Сравнение данных второй и четвертой групп расчетов показывает, что увеличение толщины  $Z_2$  в два раза приводит к значительному уменьшению параметров  $T_{0m}$ ,  $T_{11m}$  и  $T_{0-11m}$ .

Параметры  $t_{0b}$ ,  $t_{11b}$  и  $t_{0-11b}$  увеличиваются с увеличением энергии фотона в каждой группе расчетов и уменьшаются с увеличением толщины  $Z_3$  в первых трех группах расчетов.

#### 3.4. Основные параметры расчетов поглощения фотонов с одной и той же энергией

Сравним значения основных параметров моделирования поглощения фотонов с одной и той же энергией. В качестве примера выберем расчеты для энергии 4.1 эВ. В табл.4 представлены следующие данные этих расчетов: толщины поглотителя и сенсора ( $Z_2$  и  $Z_3$ ), максимальное изменение температуры и время достижения максимума на границе поглотитель-сенсор ( $\Delta T_{0m}$ ,  $t_{0m}$ ) и сенсор-теплопровод ( $\Delta T_{11m}$ ,  $t_{11m}$ ), максимальная разность температур на границах сенсора



Табл.4. Основные параметры расчетов для фотонов с энергией 4.1 эВ,  $Z_1 = Z_4 = 0.1$  мкм

$Z_2$ , мкм	$Z_3$ , мкм	$\Delta T_{0m}$ , мК	$t_{0m}$ , фс	$\Delta T_{11m}$ , мК	$t_{11m}$ , фс	$T_{0-11m}$ , мК	$t_{0-11m}$ , фс	$V_m$ , мкВ	$t_b$ , фс	$R$ , ТГц
0.1	0.05	22.36	1.35	14.4	2.01	11.77	0.78	49.43	141.42	7.07
0.1	0.1	21.63	1.26	8.5	2.76	17.62	0.96	74.00	139.62	7.16
0.1	0.5	21.56	1.26	0.56	16.56	21.56	1.26	90.55	123.96	8.07
0.1	1	21.56	1.26	0.098	47.64	21.56	1.26	90.55	103.44	9.67
0.2	0.5	6.07	3.27	0.36	23.64	6.06	7.27	25.45	128.64	8.14

и время достижения этого максимума ( $T_{0-11m}$ ,  $t_{0-11m}$ ), максимальное электрическое напряжение на сенсоре ( $V_m$ ), время спада сигнала до фонового значения ( $t_b$ ) и обратная ей величина – скорость счета ( $R$ ). Максимальное напряжение на сенсоре рассчитывается по формуле  $V_m = S(\text{FeSb}_2) \times T_{0-11m}$ .

Первые 4 строки таблицы соответствуют расчетам для чувствительных элементов, в которых изменяется толщина сенсора. Можно увидеть, что с увеличением  $Z_3$  параметр  $t_{0m}$  не изменяется, незначительно уменьшается параметр  $\Delta T_{0m}$ , причем он уже одинаков для  $Z_3$  равном 0.5 мкм и 1 мкм. Очевидно, происходящие на границе поглотитель–сенсор изменения температуры обусловлены в первую очередь материалом и толщиной поглотителя, которые в этих расчетах не меняются. Изменения происходят на границе сенсор–теплоотвод. С увеличением  $Z_3$  параметр  $t_{11m}$  увеличивается, а параметр  $\Delta T_{11m}$  уменьшается, становясь меньше фона при  $Z_3 = 1$  мкм. При  $Z_3 = 0.5$  мкм параметр  $\Delta T_{11m}$  настолько мал и настолько поздно достигается, что не оказывает влияние на значение параметра  $T_{0-11m}$ . Можно утверждать, что возникающее на чувствительном элементе электрическое напряжение определяется в основном изменением температуры на границе поглотитель–сенсор. Также можно констатировать, что с увеличением  $Z_3$  значения  $V_m$  и  $t_b$  уменьшаются, а скорость счета и параметры  $T_{0-11m}$  и  $t_{0-11m}$  увеличиваются. Увеличение толщины поглотителя вдвое уменьшает в несколько раз амплитуду сигнала, а скорость счета практически не меняется.

Рассмотрим более подробно данные расчета для толщин  $Z_2 = 0.1$  мкм и  $Z_3 = 1$  мкм. До границы сенсор–теплоотвод доходит незначительное количество выделенного в поглотителе тепла, что позволяет нам сосредоточиться на процессах, происходящих на границе поглотитель–сенсор. Максимальный сигнал  $V_m$  соответствует изменению температуры  $\Delta T_{0m}$ . На рис.5 приведены временные зависимости  $\Delta T_0$  и усредненных значений изменения температуры на отрезках, начало которых расположено в центре поверхности поглотитель–сенсор, а конец находится на этой границе на расстоянии 0.2 мкм, 0.5 мкм, 0.7 мкм и 1 мкм от центра. Примечательно, что все приведенные на рис.5 зависимости  $\Delta T_0(t)$ , ...,  $\Delta T_{0-1}(t)$  достигают своих максимальных значений 21.57 мК, 13.34 мК, 6.86 мК, 5.14 мК и 3.74 мК за одинаковое время 1.26 фс. Важно также, что среднее значение изменения температуры на отрезке длиной 1 мкм превосходит фоновое значение в 37 раз. Следовательно, чувствительный элемент диаметром 2 мкм может эффективно регистрировать фотоны с энергией 4.1 эВ. Такие же расчеты могут быть осуществлены для остальных значений энергий.

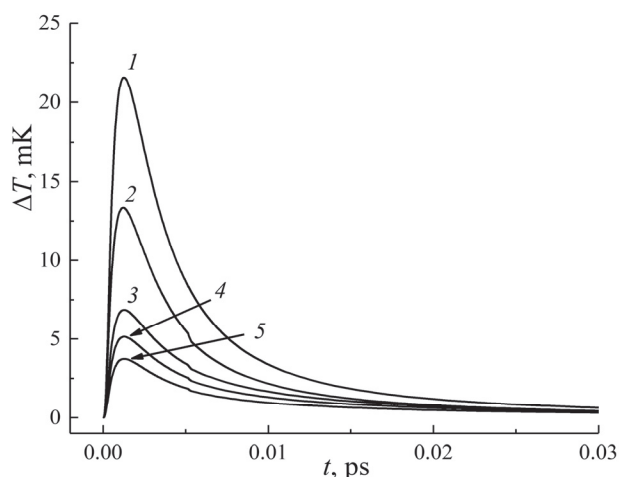


Рис.5. Временные зависимости  $\Delta T_0$  (1) и усредненных значений изменения температуры  $\Delta T_{0-0.2}$  (2),  $\Delta T_{0-0.5}$  (3),  $\Delta T_{0-0.7}$  (4),  $\Delta T_{0-1}$  (5).

### 3.5. Сравнение данных расчетов и уровня шумов

Наличие в конструкции чувствительного элемента SiWFeWAl антиотражающего слоя SiO<sub>2</sub> и выбранные толщины вольфрамового поглотителя обеспечивают эффективное поглощение УФ фотонов. Эффективная регистрация уже поглощенных фотонов зависит от отношения сигнал/шум. Как было отмечено выше, термоэлектрический детектор представляет из себя болометр, который преобразует выделенное в чувствительном элементе тепло в электрический сигнал. Шум болометра является суммой следующих шумов: джонсоновского, фононного, фотонного, нагрузки, усилителя, мерцающего и контактов [14]. Три последних типа шумов обусловлены электрической схемой считывания сигнала, которую мы не рассматриваем. Термоэлектрический детектор не нуждается в дополнительной нагрузке, т.е. в приложенном напряжении или токе. Следовательно, шум нагрузки исключается. Фотонный шум для однофотонного детектора, защищенного от фонового излучения окружающей среды, также исключается. Подробно рассмотрим только Джонсоновский и фононный шумы.

**Джонсоновский шум** возникает в проводниках электрического тока с активным сопротивлением. Он обусловлен хаотичным движением подвижных носителей заряда, приводящем к флуктуациям концентрации носителей заряда в разных областях проводника и появлению электрического напряжения. Средний квадрат напряжения джонсоновского шума зависит от сопротивления  $R$ , абсолютной температуры  $T$  проводника и полосы частот  $\Delta f$ , в которой проводится измерение. В соответствии с формулой Найквиста средний квадрат напряжения джонсоновского шума равен  $\langle \varepsilon_t^2 \rangle = 4kTR\Delta f$ , где  $k$  – постоянная Больцмана [29]. Удельное сопротивление  $W$  при температуре 9К равно  $3 \times 10^{-4}$  Ом м [30]. Такое же удельное сопротивление у FeSb<sub>2</sub> с определенной плотностью дефектов [18]. Несложно посчитать, что сопротивление чипа болометра с поверхностью

100 мкм<sup>2</sup>, состоящего из вольфрамового поглотителя толщиной 0.1 мкм и термоэлектрического сенсора FeSb<sub>2</sub> толщиной 1 мкм, будет равно 3.3 Ом. Сопротивление чипа болометра при меньших толщинах сенсора будет меньше. Напряжение джонсоновского шума проводника с сопротивлением 3.3 Ом составит  $4.05 \times 10^{-11} \times (\Delta f)^{1/2}$  Гц<sup>-1/2</sup> В. Детекторы различного предназначения будут иметь различную полосу частот измерений. При  $\Delta f = 100$  Гц получим  $V_i = 4.05 \times 10^{-10}$  В  $\approx 0.405$  нВ, что намного меньше представленных в табл.4 значений  $V_m$ . Даже при наименьшей (0.05 мкм) толщине сенсора  $V_m = 49.43$  мкВ.

**Фононный шум** обусловлен теплообменом чипа болометра с термостатом и оценивается среднеквадратичной флуктуации температуры в абсорбере, которая определяется термодинамической формулой  $\langle \delta T^2 \rangle = kT^2/C$ , где  $C$  – теплоемкость абсорбера. Теплоемкость вольфрамового абсорбера с размерами 10 мкм  $\times$  10 мкм  $\times$  0.1 мкм при 9 К, в соответствии с приведенными в табл. 1 значениями плотности и удельной теплоемкости, равна  $3.6 \times 10^{-14}$  Дж/К.

Следовательно, флуктуации температуры в абсорбере не будут превышать  $\delta T = 1.76 \times 10^{-4}$  К, что мало отличается от принятого нами в расчетах уровня фона. Отметим, что изменения температуры на границе поглотитель–сенсор (см. табл.4) превосходят фонный шум в десятки и сотни раз.

Суммируя приведенные в этом параграфе данные, можно утверждать, что чувствительный элемент SiWFeWAl способен обеспечить высокую эффективность детектирования в УФ области электромагнитного спектра одиночных фотонов с энергиями 3.1–7.1 эВ.

#### 4. Заключение

Подробно исследованы закономерности распространения тепла в пятислойном чувствительном элементе SiWFeWAl термоэлектрического детектора после поглощения УФ фотонов. Определены основные характеристики чувствительных элементов с разными толщинами W поглотителя и FeSb<sub>2</sub> сенсора. Показано, что при поглощении фотонов с энергией 4.1 эВ могут быть достигнуты следующие значения параметров: изменение температуры на границе поглотитель–сенсор 22.36 мК, разность температур на границах сенсора 21.56 мК, возникающее на сенсоре электрическое напряжение 90.55 мкВ, время спада сигнала до уровня фона 103.44 фс и скорость счета 9.67 ТГц. Рассчитаны джонсоновский и фонный шумы. Выявлено, что соотношение сигнал/шум этого чувствительного элемента может быть достаточно высоким. Следовательно, термоэлектрический однофотонный детектор с SiWFeWAl чувствительным элементом будет обладать высоким энергетическим разрешением, скоростью счета и эффективностью детектирования в УФ области электромагнитного спектра.

Авторы благодарны А.М. Гуляну за интерес к работе и полезные дискуссии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по науке РА в рамках научного проекта №21Т-1С088 «Разработка сенсора термоэлектрического детектора ультрафиолетового излучения с учетом тепловых шумов».

## ЛИТЕРАТУРА

1. **C.J. Chunnillall, I.P. Degiovanni, S. Kück, I. Müller, A.G. Sinclair.** *Opt. Eng.*, **53**, 081910 (2014).
2. **R.H. Hadfield.** *Nat. Photon.*, **3**, 696 (2009).
3. **E.A. Dauler, M.E. Grein, A.J. Kerman, F. Marsili, S. Miki, S.W. Nam, M.D. Shaw, H. Terai, V.B. Verma, T. Yamashita.** *Opt. Eng.*, **53**, 081907 (2014).
4. **I.E. Zadeh, J. Chang, J.W.N. Los, S. Gyger, A.W. Elshaari, S. Steinhauer, S.N. Dorenbos, V. Zwiller.** *Appl. Phys. Lett.*, **118**, 190502 (2021).
5. **E. E. Wollman, V. B. Verma, A. D. Beyer, R.M. Briggs, B. Korzh, J.P. Allmaras, F. Marsili, A.E. Lita, R.P. Mirin, S.W. Nam, M.D. Shaw.** *Opt. Express*, **25**, 26792 (2017).
6. **A. Hans, P. Schmidt, C. Ozga, G. Hartmann, X. Holzapfer, A. Ehresmann, A. Knie.** *Materials (Basel)*, **11**, 869 (2018).
7. **D.A. Orlov, R. Glazenberg, R. Ortega, E. Kernen.** *CEAS Space Journal*, **11**, 405 (2019).
8. **D. van Vechten, K. Wood, G. Fritz, J. Horwitz, A. Gyulamiryan, A. Kuzanyan, V. Vartanyan, A. Gulian.** *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **444**, 42 (2000).
9. **A.A. Kuzanyan, A.S. Kuzanyan,** *Proc. SPIE 8773*, 87730L (2013).
10. **A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan.** *J. Contemp. Phys.*, **53**, 73 (2018).
11. **A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan.** *IEEE Sens., J.*, **20**, 3040 (2019).
12. **A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan.** *IEEE Sens., J.*, **20**, 12776 (2020).
13. **D.G. Johnson.** *Thermal Sensors*, Editor: S. Liang, *Comprehensive Remote Sensing*, Elsevier, 376 (2018).
14. **J.C. Mather.** *Appl. Optics*, **21**, 1125 (1982).
15. **U. Birkholz, R. Fettig, J. Rosenzweig.** *Sensors and Actuators*, **12**, 179 (1987).
16. **A.A. Kuzanyan, A.S. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan.** *J. Contemp. Phys.*, **53**, 242 (2018).
17. **T.B.E. Gronbech, K. Tolborg, H. Svendsen, J. Overgaard, Y-S. Chen, B.B. Iversen.** *Chem. Eur. J.*, **26**(39), 8651 (2020).
18. **Q. Du, L. Wu, H. Cao, C-J. Kang, C. Nelson, G.L. Pascut, T. Besara, T. Siegrist, K. Haule, G. Kotliar, I. Zaliznyak, Y. Zhu, C. Petrocich.** *Quantum Materials* **6**, 1 (2021).
19. **M. Li, H. Shen, L. Zhuang, D. Chen, X. Liang.** *Int. J. Photoenergy.*, **2014**, 670438 (2014).
20. **W.S.M. Werner, K. Glantschnig, C. Ambrosch-Draxl.** *J. Phys Chem Ref. Data*, **38**, 1013 (2009).
21. **G. Carini Jr., G. Carini, D. Cosio, G. D'Angelo, F. Rossi.** *Philosophical Magazine*, **96**, 761 (2016).
22. <https://nanoheat.stanford.edu/sites/default/files/publications/A33.pdf>
23. **M.S. Figueira, J. Silva-Valencia, R. Franco.** *Eur. Phys. J. B*, **85**, 1 (2012).
24. **A. Bentien, S. Johnsen, G.K.H. Madsen, B.B. Iversen, F. Steglich.** *Europhys. Lett.*, **80**, 17008 (2007).
25. **T.R. Waite, R.S. Craig, W.E. Wallace.** *Phys. Rev. Lett.*, **104**, 1240 (1956).
26. [http://www.efunda.com/materials/elements/TC\\_Table.cfm?Element\\_ID=W](http://www.efunda.com/materials/elements/TC_Table.cfm?Element_ID=W)
27. **G.T. Furukawa, T.B. Douglas, R.E. McCoskey, D.C. Ginnings.** *J. Research National Bureau Stand.*, **57**, 67 (1956).
28. [http://www.phys.ufl.edu/ireu/IREU2013/pdf\\_reports/Allen\\_Scheie\\_FinalReport.pdf](http://www.phys.ufl.edu/ireu/IREU2013/pdf_reports/Allen_Scheie_FinalReport.pdf)
29. **P.L. Richards.** *J. Appl. Phys.*, **76**, 1 (1994).
30. **P.D. Desal, T.K. Chu, H.M. James, C.Y. Ho.** *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **13**, 1069 (1984).

ՋԵՐՄՈՒԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ԶԳԱՅՈՒՆ ՏԱՐԲԵՐՈՒՄ ԶԵՐՄՈՒԹՅԱՆ  
ՏԱՐԱԾՄԱՆ ՊՐՈՑԵՍՆԵՐԻ ՍՈՂԵԼԱՎՈՐՈՒՄ

Ա.Ա. ԿՈՒԶԱՆՅԱՆ, Ա.Ս. ԿՈՒԶԱՆՅԱՆ,  
Վ.Ռ. ՆԻԿՈՂՈՍՅԱՆ, Ս.Ռ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ

Համակարգչային մոդելավորման միջոցով ուսումնասիրվել են ջերմաէլեկտրական զգայուն տարրերում ջերմության տարածման պրոցեսները 3.1–7.1 էՎ (400–175 նմ) էներգիայով միակի ուլտրամանուշակագույն ֆոտոնների կլանումից հետո: Դիտարկվել են  $10 \times 10$  մկմ<sup>2</sup> մակերեսով զգայուն տարրի կառուցվածքներ բաղկացած շափյուղե ( $Al_2O_3$ ) տակդիրի վրա հաջորդաբար տեղադրված վոլֆրամի (W) ջերմատարից, FeSb<sub>2</sub> ջերմաէլեկտրական տվիչից, W կլանիչից և SiO<sub>2</sub>-ի հակաանդրադարձող շերտից: Համակարգչային մոդելավորումն իրականացվել է սահմանափակ ծավալից ջերմության տարածման հավասարման հիման վրա՝ օգտագործելով դիֆերենցիալ հավասարումների եռաչափ մատրիցային մեթոդը: Զգայուն տարրի տարրեր հատվածներում ջերմաստիճանի փոփոխության ժամանակային կախվածությունը հաշվարկվում է կլանիչի 0.2–0.1 մկմ և տվիչի 0.1–0.05 մկմ հաստությունների համար: Գնահատված են SiO<sub>2</sub>/W/FeSb<sub>2</sub>/W/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> զգայուն տարրի ֆոնոնային և Ջոնսոնի աղմուկները: Ցույց է տրվել, որ նման զգայուն տարրը 9 Կ աշխատանքային ջերմաստիճանում ունակ է գրանցել միակի ֆոտոններ սպեկտրի ուլտրամանուշակագույն տիրույթում և սպահովել ազդանշան-աղմուկ բարձր հարաբերություն:

SIMULATION OF HEAT PROPAGATION PROCESSES  
IN THERMOELECTRIC DETECTION PIXELS

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

Processes of heat propagation in thermoelectric detection pixels after absorption of UV single photons with the energy of 3.1–7.1 eV (400–175 nm) were studied by computer simulation. Designs of detection pixels with a surface of  $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ , consisting of layers of the tungsten heat sink (W), the FeSb<sub>2</sub> thermoelectric sensor, the W absorber, and the antireflective layer of SiO<sub>2</sub>, arranged in series on the sapphire substrate ( $Al_2O_3$ ) are considered. Computer simulation was carried out based on the equation of heat propagation from a limited volume using a three-dimensional matrix method for differential equations. The temporal dependence of the temperature change in different areas of detection pixels is calculated for absorber and sensor thicknesses of 0.2–0.1  $\mu\text{m}$  and 0.1–0.05  $\mu\text{m}$ . The phonon and Johnson noise of the detection pixel SiO<sub>2</sub>/W/FeSb<sub>2</sub>/W/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> are estimated. It is shown that such detection pixels at the operating temperature of 9 K are capable detect single photons in the UV region of the spectrum and provide a high signal-to-noise ratio.