

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ТЕПЛА В ПЯТИСЛОЙНОМ ЧУВСТВИТЕЛЬНОМ ЭЛЕМЕНТЕ
С FeSb₂ СЕНСОРОМ ПОСЛЕ ОДНОВРЕМЕННОГО
ПОГЛОЩЕНИЯ НЕСКОЛЬКИХ ФОТОНОВ**

А.А. КУЗАНЯН^{1,2}, А.С. КУЗАНЯН^{1,3*},
В.Р. НИКОГОСЯН¹, С.Р. АРУТЮНЯН^{1,3}

¹Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак, Армения

²Калифорнийский университет, Лос-Анджелес, Калифорния, США

³Российско–Армянский университет, Ереван, Армения

*e-mail: akuzanyan@yahoo.com

(Поступила в редакцию 19 июля 2022 г.)

Представлены результаты моделирования процессов распространения тепла в пятислойном чувствительном элементе однофотонного термоэлектрического детектора после поглощения нескольких фотонов. Рассмотрено поглощение фотонов в чувствительном элементе с площадью поверхности 10×10 мкм² и различной толщиной просветляющего слоя (SiO₂), поглотителя (W), термоэлектрического сенсора (FeSb₂), теплоотвода (W) и подложки (Al₂O₃). Для моделирования процессов передачи тепла использована методика, основанная на уравнении распространения тепла из ограниченного объема. Исследованы случаи одновременного поглощения нескольких фотонов на отрезке длиной 1 мкм на поверхности поглотителя. Показано, что можно определить число поглощенных фотонов вплоть до 8.

1. Введение

Возможность измерения с высокой точностью физических свойств материалов, экспериментального изучения квантовых процессов и объяснения их природы позволяет выбрать стратегию развития науки и высоких технологий. Этим объясняется растущий интерес ученых и инженеров к проблемам однофотонного детектирования. Однофотонные детекторы (SPD) востребованы в квантовой электронике, квантовой обработке информации, квантовой метрологии, физике высоких энергий, космической астрофизике, лазерной спектроскопии, медицинском приборостроении, телекоммуникационных системах и т. д. [1–3]. Среди различных типов детекторов многие рекордные характеристики принадлежат сверхпроводящим нанопроволочным детекторам (SNSPD). Они обладают высокой эффективностью детектирования и скоростью счета, низкими темновой скоростью счета и временным джиттером в широком диапазоне электромагнитного

спектра и при различных рабочих температурах [4–6]. Термоэлектрический однофотонный детектор (TSPD) имеет ряд преимуществ по сравнению с SNSPD, в частности, более простую конструкцию чувствительного элемента и менее жесткие требования к рабочей температуре [7,8]. Предложены две основные конструкции чувствительного элемента TSPD: однослойная, в которой поглотитель и теплоотвод расположены на диэлектрической подложке и соединены между собой термоэлектрическим сенсором; трехслойная, в которой теплоотвод, сенсор и поглотитель расположены друг над другом [9]. Трехслойная конструкция исключает прямой контакт поглотителя с подложкой. Четырехслойная структура, содержащая дополнительный антиотражающий слой, позволяет повысить эффективность детектирования [10]. Включение подложки в модель чувствительного элемента (пятислойная конструкция) позволяет максимально приблизиться к эксперименту.

В наших предыдущих работах исследованы процессы распространения тепла в различных конструкциях чувствительного элемента TSPD после поглощения фотонов в диапазоне от ИК до рентгеновского [11]. Определены свойства чувствительного элемента TSPD с сенсором CeB_6 , $(\text{La}, \text{Ce})\text{B}_6$ и FeSb_2 , поглотителем и теплоотводом W , LaB_6 , Nb , Pb и YBCO , просветляющим слоем SiO_2 [12]. Показано, что TSPD может иметь терагерцовую скорость счета, энергетическое разрешение не менее 1% и эффективность детектирования 95%. Экспериментально исследована возможность создания некоторых вариантов чувствительного элемента TSPD. Были получены тонкие пленки W , CeB_6 , LaB_6 и SiO_2 , однослойные, трехслойные $\text{W}/\text{CeB}_6/\text{W}$ и четырехслойные $\text{SiO}_2/\text{W}/\text{CeB}_6/\text{W}$ прототипы чувствительного элемента TSPD [13].

Во многих задачах однофотонного детектирования, помимо регистрации фотонов с высокой эффективностью, необходимо определять их количество [14–17]. Некоторые типы SDP могут это делать [18–24]. SNSPD способны подсчитывать количество поглощенных фотонов до четырех [24–26]. Результаты моделирования показали, что чувствительный элемент $\text{SiO}_2/\text{W}/\text{CeB}_6/\text{W}$ может различать случаи одновременного поглощения 2, 3 и 4 фотонов [27]. Чувствительный элемент TSPD с сенсором FeSb_2 имеет более высокие характеристики, чем с сенсором CeB_6 . Показано, что они способны детектировать одиночные фотоны и обеспечивать высокое отношение сигнал/шум [28]. Целью данной работы является моделирование процессов распространения тепла в пятислойном чувствительном элементе с сенсором FeSb_2 при поглощении нескольких фотонов.

2. Параметры моделирования

Методика моделирования процессов распространения тепла в чувствительном элементе TSPD после поглощения фотонов основана на уравнении распространения тепла из ограниченного объема

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

где ρ есть плотность проводящего тепло материала, c – его удельная теплоемкость, а q_x , q_y и q_z – проекции вектора плотности теплового потока:

$$q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \quad q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}, \quad q_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}. \quad (2)$$

Здесь λ – теплопроводность. Компьютерное моделирование проводилось с использованием трехмерного матричного метода. Весь объем чувствительного элемента был разбит на ячейки размером Δx , Δy и Δz . Начальная температура всех ячеек принималась равной рабочей температуре (T). В поглотителе выбиралась ячейка, в которой поглощается фотон, температура в ней определялась уравнениями

$$T_0 = T + \Delta T, \quad \Delta T = E/V\rho c, \quad (3)$$

где E – энергия поглощенного фотона, V – объем ячейки, ρ и c – плотность и удельная теплоемкость материала поглотителя. Температура каждой ячейки чувствительного элемента в момент времени t_{n+1} определялась по уравнению

$$T_{ijk}(t_{n+1}) = T_{ijk}(t_n) + \frac{\Delta t}{\rho c} \left[\frac{\lambda(T_{i+1}) + \lambda(T_i)}{2} \cdot \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta x^2} + \frac{\lambda(T_{j+1}) + \lambda(T_j)}{2} \cdot \frac{T_{j+1} - T_j}{\Delta y^2} + \frac{\lambda(T_{k+1}) + \lambda(T_k)}{2} \cdot \frac{T_{k+1} - T_k}{\Delta z^2} \right], \quad (4)$$

где i, j, k – координаты ячейки, Δt – интервал времени между моментами времени t_n и t_{n+1} , n – количество интервалов времени, прошедших с начала процесса.

В результате поглощения фотонов на границах термоэлектрического сенсора возникает напряжение, которое является сигналом чувствительного элемента. Это напряжение пропорционально разности температур на границах сенсора и коэффициенту Зеебека материала сенсора. Термоэлектрик FeSb₂ имеет максимальный коэффициент Зеебека при 9 К, и мы выбрали эту температуру в качестве рабочей температуры чувствительного элемента. Используемые в расчетах параметры материалов представлены в табл.1.

Табл.1. Параметры использованных материалов при 9К

| Параметры | 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 [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] | | |

Расчеты выполнены для разных геометрий чувствительного элемента и разных областей термализации фотонов. Определены временные зависимости температуры чувствительного элемента и рассчитаны следующие характеристики: ΔT_m – максимальный перепад температур на границах сенсора, t_m – время достижения этого максимума, V_m – возникающее на сенсоре максимальное напряжение, t_b – время снижения температуры до фонового уровня, отличающегося от рабочей температуры на 0.1 мК, и $R = 1/t_b$ – скорость счета.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Конструкция чувствительного элемента

Рассмотрено поглощение фотонов с энергией 0.95 эВ в пятислойном чувствительном элементе термоэлектрического однофотонного детектора с площадью поверхности $10 \times 10 \text{ мкм}^2$, состоящем из слоев со следующими толщинами: подложка (Al_2O_3 , 1 мкм), теплоотвод (W, 0.1 мкм), сенсор (FeSb_2 , 0.05 мкм), поглотитель (W, 0.2 мкм) и антиотражающий слой (SiO_2 , 0.1 мкм). На рис.1 схематично представлена конструкция чувствительного элемента, расстояния между областями термализации фотонов (a) и точки на границах поглотитель–датчик (A), датчик–теплоотвод (B) и теплоотвод–подложка (C), в которых регистрировалась температура.

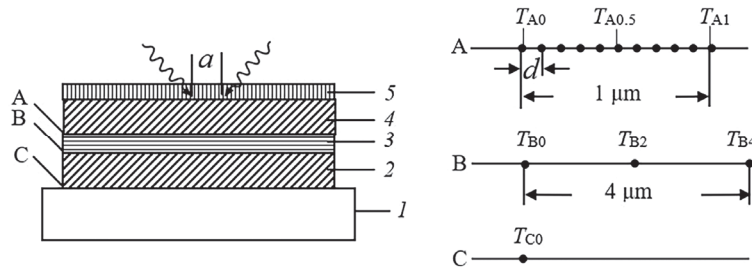


Рис.1. Чувствительный элемент TSPD: 1 – подложка (Al_2O_3), 2 – теплоотвод (W), 3 – сенсор (FeSb_2), 4 – поглотитель (W), 5 – антиотражающий слой (SiO_2); границы: поглотитель–датчик (A), датчик–теплоотвод (B), теплоотвод–подложка (C); a – расстояние от центра поверхности поглотителя, на котором происходит поглощение фотонов, d – расстояние от центра границы A, на котором рассчитывается временная зависимость температуры.

Рассмотрим одновременное поглощение одного и более фотонов, первый из которых поглощается в центре поверхности поглотителя на глубине 0.01 мкм. Второй и последующие фотоны поглощаются на отрезке длиной 1 мкм на той же глубине. Рассчитаны временные зависимости температуры на границах A, B и C, данные соответственно проиндексированы. Второй индекс рассматриваемых параметров показывает расстояние от центра границы, на которой регистрируется параметр. Индекс «0» соответствует параметрам, характеризующим центральную область слоев чувствительного элемента. Рассмотрены временные зависимости температуры непосредственно под зоной термализации фотонов на границах A (T_{A0}), B (T_{B0}) и C (T_{C0}). Также на границе A на отрезке 1 мкм от центра с шагом 0.1 мкм ($T_{A0.1}$, $T_{A0.2}$, ..., T_{A1}), и на границе B на расстоянии 2 мкм от центра (T_{B2}) и 4 мкм (T_{B4}).

3.2. Поглощение одного фотона

На рис.2 показана пространственно-временная зависимость температуры границы A после поглощения одного фотона в центре поверхности поглотителя. Оси трехмерного графика обозначают время от момента термализации фотона t , расстояние от центра d и температуру на расстоянии d – T_{Ad} .

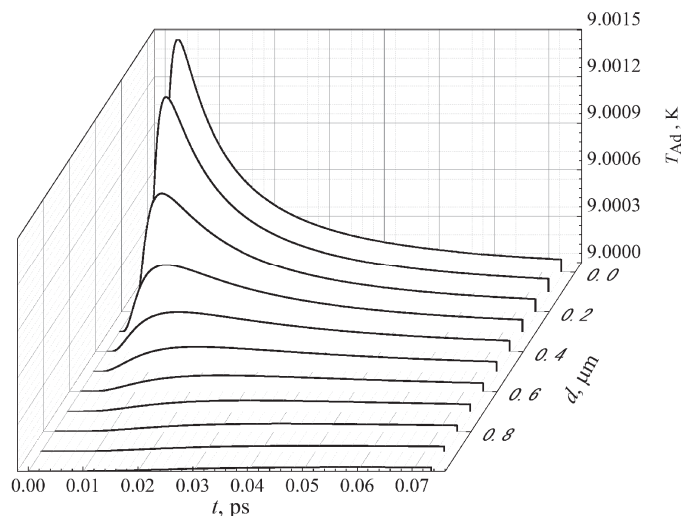


Рис.2. Пространственно-временная зависимость температуры на границе А после поглощения фотона с энергией 0.95 эВ.

Кривые $T_{Ad}(t)$ имеют одинаковую форму при всех значениях d . Температура достигает максимума T_{Adm} за время t_{Adm} , затем спадает до фонового значения за время t_{Adb} . Максимум температуры достигается за фемтосекунды. Параметр T_{A0m} имеет наибольшее значение, т.е. максимальное повышение температуры происходит непосредственно под зоной термализации фотонов. Чем больше расстояние d , тем меньше параметр T_{Adm} .

3.3. Одновременное поглощение нескольких фотонов

Моделирование процессов распространения тепла в объеме чувствительного элемента после поглощения двух фотонов показывает, что максимальная температура на границе А отличается от рассмотренного выше случая поглощения одного фотона. Временные зависимости температуры на границах В и С чувствительного элемента при поглощении двух фотонов на расстоянии 0.7 мкм представлены на рис.3. Как видно из графиков, температура выше фона регистрируется в центре границы В и С. Температура на границе В на расстоянии 2 мкм и 4 мкм от центра значительно ниже фонового значения в течение всего процесса понижения T_{Adm} до фона. На вставке к рис.3 показана временная зависимость параметров T_{A0} и T_{B0} . Максимальная температура на границе В достигается позже и ниже, чем на границе А. Значение максимальной разности температур на границах А и В (соответственно сигнал детектора) зависит от областей, в которых регистрируется напряжение. Предположим, что это можно сделать с участка на границе А, где температура максимальна, и с участка на границе В, где температура минимальна. В этом случае сигнал детектора будет пропорционален максимальному повышению температуры на границе А и коэффициенту Зеебека материала сенсора, так как на границе В находятся области, где температура после поглощения фотонов практически не повышается. Это рассуждение применимо во всех рассмотренных ниже случаях.

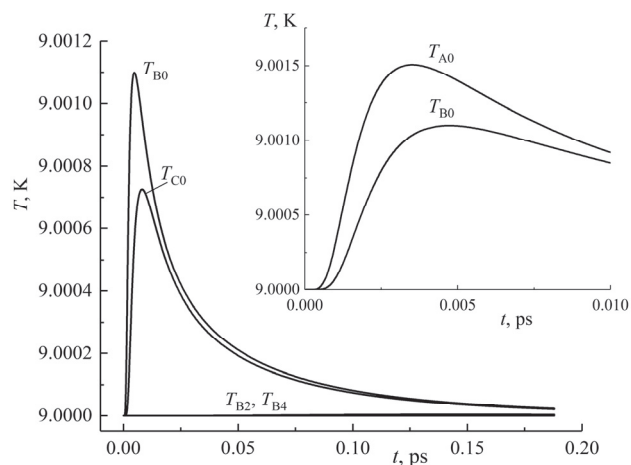


Рис.3. Временная зависимость температуры в чувствительном элементе для случая поглощения двух фотонов на расстоянии 0.7 мкм.

Численные данные анализа временной зависимости температуры на границе А после одновременного поглощения до 8 фотонов приведены в табл.2. Первые два столбца таблицы содержат количество фотонов N и расстояние a . Остальные столбцы показывают параметры временной зависимости температуры на границе А на расстоянии d от центра. В каждой ячейке таблицы приведены параметры T_{Adm} и t_{Adb} . В первой строке таблицы приведены результаты моделирования поглощения одного фотона в центре поглотителя. Следующие три расчета соответствуют поглощению двух фотонов, один из которых поглощается в центре поглотителя, второй на расстоянии 0.3, 0.5 и 0.7 мкм соответственно. Ниже

Табл.2. Параметры временной зависимости температуры на границе поглотитель–сенсор чувствительного элемента $\text{SiO}_2/\text{W}/\text{FeSb}_2/\text{W}/\text{Al}_2\text{O}_3$

| N | a , мкм | d , мкм | | | | | | |
|-----|---------------------|---|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | 0 | 0.1 | 0.3 | 0.5 | 0.7 | 0.9 | 1 |
| | | T_{Adm} , K/ t_{Adb} , ps | | | | | | |
| 1 | 0 | 9.0015 0.0663 | 9.0013 0.0660 | 9.0004 0.0612 | 9.0002 0.0486 | | | |
| 2 | 0, 0.3 | 9.0018 0.0989 | 9.0020 0.0998 | 9.0018 0.0989 | 9.0008 0.0938 | 9.0003 0.0836 | 9.0001 0.0635 | |
| 2 | 0, 0.5 | 9.0015 0.0950 | 9.0014 0.0968 | 9.0012 0.0980 | 9.0015 0.0950 | 9.0008 0.0881 | 9.0003 0.0755 | 9.0002 0.0653 |
| 2 | 0, 0.7 | 9.0015 0.0895 | 9.0013 0.0922 | 9.0007 0.0946 | 9.0008 0.0940 | 9.0015 0.0895 | 9.0008 0.0814 | 9.0004 0.0751 |
| 3 | 0, 0.5, 1 | 9.0015 0.1078 | 9.0014 0.1114 | 9.0012 0.1162 | 9.0016 0.1177 | 9.0012 0.1162 | 9.0014 0.1114 | 9.0015 0.1078 |
| 4 | 0, 0.3, 0.6, 0.9 | 9.0018 0.1312 | 9.0020 0.1342 | 9.0022 0.1381 | 9.0022 0.1387 | 9.0021 0.1366 | 9.0018 0.1312 | 9.0014 0.1270 |
| 6 | 0, 0.5, 1 | 9.0231 0.1099 | 9.0209 0.1135 | 9.0056 0.1182 | 9.0231 0.1197 | 9.0056 0.1182 | 9.0209 0.1135 | 9.0231 0.1099 |
| 8 | 0, 0.3, 0.6, 0.9 | 9.0036 0.1820 | 9.0041 0.1847 | 9.0043 0.1880 | 9.0043 0.1886 | 9.0042 0.1868 | 9.0036 0.1820 | 9.0027 0.1787 |

приведены результаты расчетов поглощения трех и четырех фотонов. Последние два расчета соответствуют поглощению шести и восьми фотонов (по два фотона на каждом отмеченном расстоянии a). Общим для всех расчетов является то, что максимальное значение T_{Adm} превышает фоновое значение в 15 и более раз и достигается за несколько фемтосекунд. Максимальное значение параметра t_{Adb} изменяется в более широком диапазоне от 0.0663 пс до 0.1886 пс.

Зависимости максимального электрического напряжения V_m и скорости счета R от расстояния между областями термализации двух фотонов представлены на рис.4. Видно, что уменьшение a от 0.7 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 скорость счета значительно выше.

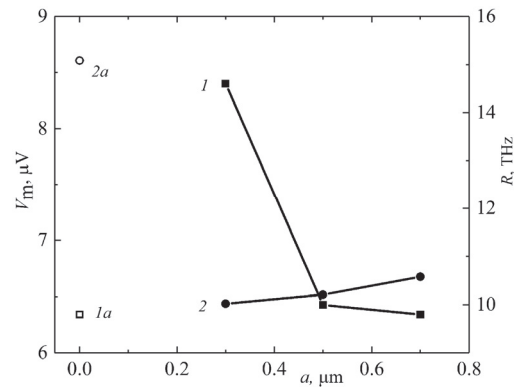


Рис.4. Электрическое напряжение (1) и скорость счета (2) в зависимости от расстояния между областями термализации двух фотонов (1а, 2а соответствуют поглощению одного фотона).

Пространственно-временное распределение температуры на границе А после поглощения трех фотонов показано на рис.5. В этом случае на графике $T_{\text{A0}}(t)$ видны три ярко выраженных температурных максимума, а при поглощении четырех фотонов выраженных максимумов нет.

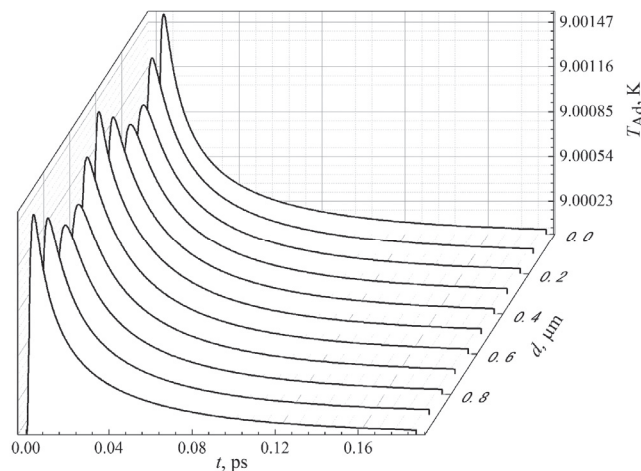


Рис.5. Пространственно-временное распределение температуры на границе поглотитель–сенсор после трехфотонного поглощения.

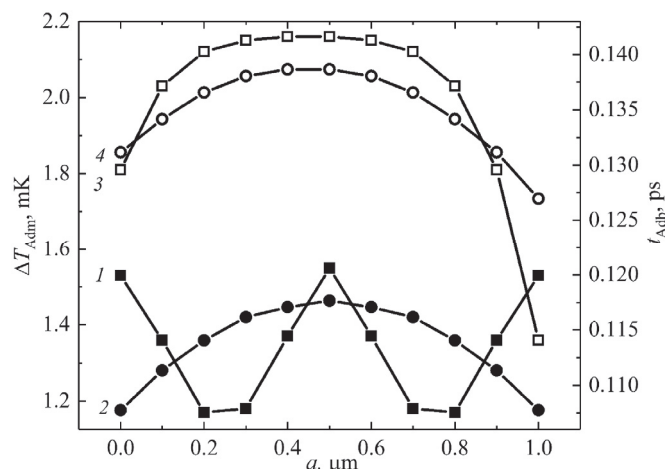


Рис.6. Значения параметров ΔT_{Adm} (1, 3) и t_{Adb} (2, 4) при поглощении трех (1, 2) и четырех фотонов (3, 4).

На рис.6 представлены зависимости максимального изменения температуры на границе А и времени спада температуры до фона от расстояния d для случаев поглощения 3 и 4 фотонов. Как и ожидалось, ΔT_{Adm} и t_{Adb} выше при поглощении 4 фотонов. При поглощении 3 фотонов максимумы параметров регистрируются при $d = 0.5$ мкм; при поглощении 4 фотонов максимумы этих параметров регистрируются в широкой области. Из табл.2 видно, что характер зависимостей параметров T_{Adm} и t_{Adb} от d идентичен для поглощения 3 и 6 фотонов, а также 4 и 8 фотонов.

Зависимости максимального напряжения и скорости счета от числа поглощенных фотонов (N) представлены на рис.7. С увеличением числа поглощенных фотонов V_m увеличивается, а R уменьшается. Зависимость V_m от числа фотонов не монотонна, а параметр R монотонно убывает; следовательно, его можно использовать для определения количества одновременно поглощенных фотонов.

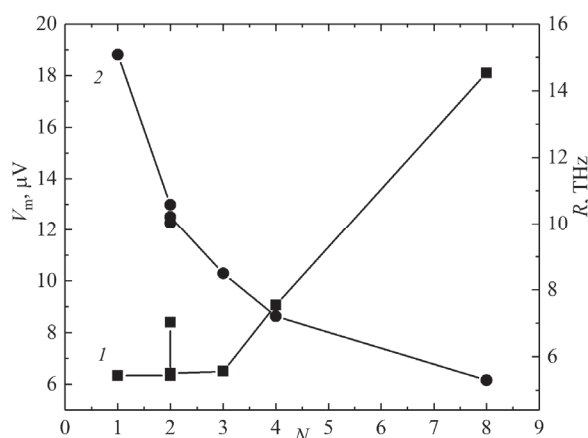


Рис.7. Зависимость параметров V_m (1) и R (2) от числа одновременно поглощенных фотонов.

4. Заключение

В статье предложена конструкция пятислойного чувствительного элемента термоэлектрического однофотонного детектора, состоящего из теплоотвода (W), сенсора (FeSb_2), поглотителя (W) и антиотражающего слоя (SiO_2), расположенных на подложке Al_2O_3 . Методом моделирования исследованы процессы распространения тепла в этом чувствительном элементе после поглощения нескольких фотонов с энергией 0.95 эВ. Показано, что количество одновременно поглощаемых фотонов до восьми можно определить путем измерения времени затухания сигнала.

Следует ожидать, что в эксперименте характеристики TSPD будут отличаться от полученных в работе, но они настолько впечатляют, что экспериментальные исследования кажутся необходимыми. Перспективы использования детекторов с характеристиками близкими к полученным в данной работе весьма обширны. Это множество приложений как в современных квантовых технологиях, так и в традиционных областях детектирования одиночных фотонов: астрофизике, космической астрономии, физике высоких энергий, безопасности, тестировании микросхем, медицинском приборостроении и других.

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. R.H. Hadfield. *Nat. Photon.*, **3**, 696 (2009).
2. M.D. Eisaman, J. Fan, A. Migdall, S.V. Polyakov. *Rev. Scient. Inst.*, **82**, 071101 (2011).
3. T. Polakovic, W. Armstrong, G. Karapetrov, Z.E. Meziani, V. Novosad. *Nanomaterials*, **10**, 1198 (2020).
4. I.E. Zadeh, J.W.N. Los, R.B.M. Gourgues, J. Chang, A.W. Elshaari, J.R. Zichi, Y.J. van Staaden, J.P.E. Swens, N. Kalhor, A. Guardiani, Y. Meng, K. Zou, S. Dobrovolskiy, A.W. Fognini, D.R. Schaart, D. Dalacu, P.J. Poole, M.E. Reimer, X. Hu, S.F. Pereira, V. Zwiller, S.N. Dorenbos. *ACS Photonics*, **7**, 1780 (2020).
5. L. Parlato, D. Salvoni, M. Ejrnaes, D. Massarotti, R. Caruso, R. Satariano, F. Tafuri, X. Y. Yang, L. You, Z. Wang, G. P. Pepe, R. Cristiano. *J Low Temp. Phys.*, **199**, 6 (2020).
6. L. You. *Nanophotonics*, **9**, 2673 (2020).
7. 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).
8. A. Gulian, K. Wood, D. Van Vechten, G. Fritz. *J. Mod. Opt.*, **51**, 1467 (2004).
9. A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan. *J. Contemp. Phys.*, **53**, 338 (2018).
10. A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan. *IEEE Sens., J.*, **20**, 3040 (2019).
11. A.A. Kuzanyan, A.S. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan. *J. Contemp. Phys.*, **53**, 242 (2018).
12. A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan. *J. Contemp. Phys.*, **53**, 73 (2018).
13. S.I. Petrosyan, A.A. Kuzanyan, G.R. Badalyan, A.S. Kuzanyan. *J. Contemp. Phys.*, **53**, 157 (2018).
14. Y-L. Tang, H.-L. Yin, S-J. Chen, et al., *Phys. Rev. Lett.*, **113**, 190501 (2014).
15. P. Kok, W.J. Munro, K. Nemoto, T. C. Ralph, J.P. Dowling, G.J. Milburn. *Rev. Mod.*

- Phys., **79**, 135 (2007).
16. **V. Giovannetti, S. Lloyd, L. Maccone.** Nat. Photonics, **5**, 222 (2011).
 17. **M.A. Broome, A. Fedrizzi, S. Rahimi-Keshari, J. Dove, S. Aaronson, T.C. Ralph, A.G. White.** Science, **339**, 794 (2013).
 18. **B.E. Kardynal, S.S. Hees, A.J. Shields.** Appl. Phys. Lett., **90**, 181114 (2007).
 19. **D. Rosenberg, A.E. Lita, A.J. Miller, S.W. Nam.** Phys. Rev. A, **71**, 061803(R) (2005).
 20. **G. Zambra, M. Bondani, S.A. Spinelli, A. Andreoni.** Rev. Sci. Instr., **75**, 2762 (2004).
 21. **E. Waks, E. Diamanti, B.C. Sanders, S.D. Bartlett, Y. Yamamoto.** Phys. Rev. Lett., **92**, 113602 (2004).
 22. **L.A. Jiang, E.A. Dauler, J.T. Chang.** Phys. Rev. A, **75**, 062325 (2007).
 23. **M.J. Fitch, B.C. Jacobs, T.B. Pittman, J.D. Franson.** Phys. Rev. A, **68**, 043814 (2003).
 24. **A. Divochiy, F. Marsili, D. Bitauld, A. Gaggero, R. Leoni, F. Mattioli, A. Korneev, V. Seleznev, N. Kaurova, O. Minaeva, G. Gol'tsman, K.G. Lagoudakis, M. Benkhaoul, F. Lévy, A. Fiore.** Nat. Photonics, **2**, 302 (2008).
 25. **B. Cahall, K.L. Nicolich, N.T. Islam, G.P. Lafyatis, A.J. Miller, D.J. Gauthier, J. Kim.** Optica, **4**, 1534 (2017).
 26. **K. Zou, Y. Meng, Z. Wang, X. Hu.** Photonics Res., **8**, 601 (2020).
 27. **A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan.** IEEE Sens. J., **20**, 12776 (2020).
 28. **A.A. Kuzanyan, A.S. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, S.R. Harutyunyan.** J. Contemp. Phys., **57**, 280 (2022).
 29. **G. Carini Jr., G. Carini, D. Cosio, G.D. Angelo, F. Rossi.** Philos. Mag., **96**, 761 (2016).
 30. <https://nanoheat.stanford.edu/sites/default/files/publications/A33.pdf>.
 31. **M.S. Figueira, J. Silva-Valencia, R. Franco.** Eur. Phys. J. B, **85**, 1 (2012).
 32. **A. Bienten, S. Johnsen, G.K.H. Madsen, B.B. Iversen, F. Steglich.** Europhys. Lett., **80**, 17008 (2007).
 33. **T. R. Waite, R. S. Craig, W. E. Wallace.** Phys. Rev. Lett., **104**, 1240 (1956).
 34. http://www.efunda.com/materials/elements/TC_Table.cfm?Element_ID=W.
 35. **G.T. Furukawa, T.B. Douglas, R.E. McCoskey, D.C. Ginnings.** J. Research National Bureau Stand., **57**, 67 (1956).
 36. http://www.phys.ufl.edu/ireu/IREU2013/pdf_reports/Allen_Scheie_FinalReport.pdf.

SIMULATION OF HEAT PROPAGATION PROCESSES IN THE FIVE-LAYER DETECTION PIXEL WITH FeSb₂ SENSOR AFTER SIMULTANEOUS ABSORPTION OF SEVERAL PHOTONS

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

The results of modelling of heat propagation processes in the five-layer detection pixel of a thermoelectric single-photon detector after absorption of more than one photon are presented. We have considered the absorption of photons in the detection pixel with a surface area of $10 \times 10 \text{ } \mu\text{m}^2$ and various thicknesses of the antireflection layer (SiO₂), absorber (W), thermoelectric sensor (FeSb₂), heat sink (W), and substrate (Al₂O₃). To simulate of heat transfer processes the technique based on the equation of heat propagation from a limited volume is used. The cases of simultaneous absorption of several photons at a length of 1 μm of the absorber surface are investigated. It is shown that the number of absorbed photons up to 8 can be determined.