

НАНОРАЗМЕРНЫЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ОДНОФОТОННЫЙ ДЕТЕКТОР

А.А. КУЗАНЯН, А.С. КУЗАНЯН*, В.Р. НИКОГОСЯН, Л.Г. МГЕРЯН,
В.Т. ТАТОЯН, В.С. КУЗАНЯН, Г.Р. БАДАЛЯН

Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак, Армения

*e-mail: akuzanyan@yahoo.com

(Поступила в редакцию 17 января 2025 г.)

Рассмотрены особенности распространения тепла, выделенного одиночным фотоном в термоэлектрическом датчике с площадью поверхности 0.25 мкм^2 состоящем из последовательно расположенных друг на друге диэлектрической подложки (Al_2O_3), теплоотвода (Mo), термоэлектрического слоя ($\text{La}_{0.99}\text{Ce}_{0.01}\text{B}_6$), и поглотителя (W). Представлены результаты моделирования процессов распространения тепла в датчике с рабочей температурой 0.5, 0.8, 1, 1.2 и 1.5 К при поглощении фотонов с энергией 0.8 и 1.65 эВ. Рассчитана эквивалентная мощность джонсоновского и фононного шума. Определены мощность возникающего на датчике сигнала и отношение сигнал/шум. Проведено сравнение с характеристиками датчика такой же конструкции с площадью поверхности 1 мкм^2 . Расчеты проводились трехмерным матричным методом, основанным на уравнении распространения тепла из ограниченного объема. Показано, что уменьшение площади поверхности датчика приводит к увеличению отношения сигнал/шум и, следовательно, к увеличению эффективности регистрации уже поглощенного фотона. Этот результат особенно важен для однофотонного детектирования в ближней инфракрасной области.

1. Введение

Данная работа продолжает наши исследования по разработке термоэлектрического однофотонного детектора (TSPD) для использования в таких областях, как квантовая электроника, спектроскопия, астрономия, квантовые вычисления, телекоммуникация, биология, безопасность, медицина, метрология и визуализация [1–3]. В дополнение к этим приложениям, бесконтактное измерение изменений температуры является существенной проблемой для широкого спектра современных приложений со слабым тепловым излучением. Например, прямое наблюдение за локальным рассеянием энергии в интегральных схемах [4–6] и квантовых устройствах [7]. Кроме того, дистанционный мониторинг изменений температуры океана имеет решающее значение для улучшения климатических моделей [8, 9].

Оптическое волокно связывает компоненты в оптической системе как проводящие кабели в электрической системе [10–12]. Оптические волокна используются для передачи информации между устройствами со сверхнизкими потерями [13]. Последние достижения показывают, что оптические волокна

также могут использоваться в качестве материала подложки для прямой интеграции с различными нанооптическими устройствами, в частности с однофотонными детекторами [14, 15]. Это используется в таких областях, как зондирование, визуализация, квантовые информационные технологии [16–19].

Для большинства перечисленных применений однофотонных детекторов, помимо их высоких характеристик, положительным фактором являются их малые геометрические размеры. В предыдущих исследованиях нами рассматривались различные конструкции термоэлектрических датчиков с различной геометрией и с использованием различных материалов [20–24]. Наши недавние исследования показали, что отношение сигнал/шум (SNR) термоэлектрического датчика может быть существенно больше единицы для фотонов в ультрафиолетовой и ближней инфракрасной областях электромагнитного спектра [25, 26]. Целью настоящей работы является исследование характеристик термоэлектрического датчика с площадью поверхности 0.25 мкм^2 при изменении рабочей температуры в диапазоне $0.5\text{--}1.5 \text{ К}$.

2. Методы исследований

Исследуется многослойный термоэлектрический датчик, состоящий из вольфрамового поглотителя с толщиной 15 нм , термоэлектрика $\text{La}_{0.99}\text{Ce}_{0.01}\text{B}_6$ (10 нм) и молибденового теплоотвода (10 нм). Датчик имеет квадратную поверхность с площадью $A = 0.25 \text{ мкм}^2$ и располагается на сапфировой подложке толщиной 100 нм . Компьютерное моделирование процессов распространения тепла в термоэлектрическом сенсоре проводилось на основе уравнения теплопередачи из ограниченного объема с использованием подробно описанной в работе [26] методики. Изучены временные зависимости температуры в зоне термализации, в центре границ всех слоев, в 10 точках на каждой границе с шагом 50 нм от центра. Процессы распространения тепла рассматриваются после поглощения одиночных фотонов с энергией (E), равной 0.8 и 1.65 эВ в центре поверхности поглотителя при рабочей температуре (T_o), принимающей значения $0.5, 0.8, 1, 1.2$ и 1.5 К . Численные значения использованных в расчетах параметров приведены в табл. 1.

Используя полученные временные зависимости температуры выбранных областей датчика, определялись время выравнивания температуры на всей поверхности слоя t_e , температура, при которой произошло выравнивание T_e и разность температур $\Delta T_e = T_e - T_o$, а также параметры временной зависимости разности усредненной температуры на границах термоэлектрического слоя: максимальная температура T_m , время достижения максимума t_m , разность температур $\Delta T_m = T_m - T_o$, время (t_b) спада температуры до уровня фона (δ). Параметр $1/t_b$ является полосо-й частот измерений (Δf) и может рассматриваться также как скорость счета детектора.

3. Результаты

3.1. Эквивалентная мощность шума

Эквивалентная мощность шума датчика WLCM определялась по ранее полученным [26] формулам для Джонсоновского шума

$$NEP_f^2 = 4k_B T (\rho_1 d_1 + \rho_2 d_2) (4A \varepsilon \sigma_{SB} T^3 + k_1 d_1 + k_2 d_2)^2 / A |S|^2,$$

Табл.1. Физические параметры материалов

Параметры	Материалы			
	(La, Ce)B ₆	W	Mo	Al ₂ O ₃
Плотность, кг/м ³	4720	19300	10280	4000
0.5 K				
Теплоемкость, Дж/(кг K)	0.196 [27]	0.0028 [29]	1.1×10^{-2} [32]	1×10^{-3} [33]
Теплопроводность, Вт/(м K)	0.35 [27]	720 [30]	25 [32]	0.7 [34]
Коэффициент Зеебека, мкВ/К	90 [27]			
Удельное сопротивление, Ом м	3×10^{-8} [28]	1.54×10^{-13} [31]	7×10^{-12} [31]	
0.8 K				
Теплоемкость, Дж/(кг K)	0.16 [27]	0.0045 [29]	1.5×10^{-2} [32]	1.6×10^{-3} [33]
Теплопроводность, Вт/(м K)	0.7 [27]	1150 [30]	40 [32]	2.6 [34]
Коэффициент Зеебека, мкВ/К	100.5 [27]			
Удельное сопротивление, Ом м	2.6×10^{-8} [28]	1.56×10^{-13} [31]	7×10^{-12} [31]	
1 K				
Теплоемкость, Дж/(кг K)	0.13 [27]	0.0057 [29]	1.9×10^{-2} [32]	2×10^{-3} [33]
Теплопроводность, Вт/(м K)	1.1 [27]	1440 [30]	50 [32]	4.9 [34]
Коэффициент Зеебека, мкВ/К	103 [27]			
Удельное сопротивление, Ом м	2×10^{-8} [28]	1.57×10^{-13} [31]	7×10^{-12} [31]	
1.2 K				
Теплоемкость, Дж/(кг K)	0.11 [27]	0.0068 [29]	2.4×10^{-2} [32]	2.4×10^{-3} [33]
Теплопроводность, Вт/(м K)	1.5 [27]	1730 [30]	60 [32]	8.3 [34]
Коэффициент Зеебека, мкВ/К	104 [27]			
Удельное сопротивление, Ом м	1.9×10^{-8} [28]	1.58×10^{-13} [31]	7×10^{-12} [31]	
1.5 K				
Теплоемкость, Дж/(кг K)	0.11 [27]	0.0085 [29]	2.8×10^{-2} [32]	3×10^{-3} [33]
Теплопроводность, Вт/(м K)	2.3 [27]	2160 [30]	75 [32]	15.5 [34]
Коэффициент Зеебека, мкВ/К	103 [27]			
Удельное сопротивление, Ом м	1.8×10^{-8} [28]	1.6×10^{-13} [31]	7×10^{-12} [31]	

фононного шума

$$NEP_p^2 = 4k_B T^2 (4A\varepsilon\sigma_{SB}T^3 + k_3 d_3),$$

и суммарного шума

$$NEP^2 = NEP_p^2 + NEP_j^2.$$

В этих уравнениях k_B – постоянная Больцмана, T – рабочая температура, A – площадь поверхности датчика, ε — поглощательная способность поглотителя (мы приняли ее равной 1), σ_{SB} – постоянная Стефана–Больцмана, S – коэффициент Зеебека термоэлектрического слоя, ρ_1 , d_1 , k_1 обозначают удельное сопротивление, толщина и теплопроводность поглотителя, ρ_2 , d_2 , k_2 и d_3 , k_3 те же параметры для термоэлектрического слоя и теплоотвода. Данные эквивалентной мощности шума датчика WLCM с площадью поверхности A , равной 1 и 0.25 мкм² при различных рабочих температурах приведены в табл. 2.

Табл.2. Эквивалентная мощность шума датчика с поверхностью 1 и 0.25 мкм²

T_0, K	NEP _p	NEP _j	NEP	NEP _p	NEP _j	NEP
	$\Phi_{BT}/T_c^{1/2}$					
	1 мкм ²			0.25 мкм ²		
0.5	1.857	10.92	11.07	1.857	21.84	21.92
0.8	3.757	18.39	18.77	3.757	36.79	36.99
1	5.253	22.04	22.66	5.253	44.09	44.4
1.2	6.906	28.17	29.0	6.906	56.34	56.76
1.5	9.643	38.43	39.62	9.643	76.86	77.46

Можно видеть, что фоновый шум одинаков для двух значений площади поверхности датчика, Джонсоновский шум в 2 раза больше у сенсора с поверхностью 0.25 мкм², намного больше фонового, и он определяет суммарный шум, который вместе с обеими составляющими, возрастает с увеличением рабочей температуры.

3.2. Моделирование процессов распространения тепла в датчике WLCM после поглощения фотонов с энергией 1.65 и 0.8 эВ

Основные закономерности распространения тепла в термоэлектрическом датчике WLCM с площадью 0.25 мкм² после поглощения одиночного фотона аналогичны установленным ранее для многослойных датчиков других конструкций, одинаковы для поверхностей всех слоев датчика, для различных энергий фотонов и рабочих температур. В качестве примера на рис.1 приведены графики временной зависимости температуры в центре поверхности термоэлектрического слоя и в 5 точках от центра с шагом 50 нм после поглощения фотона с энергией 0.8 эВ в центре поверхности поглотителя при рабочей температуре датчика 1 К.

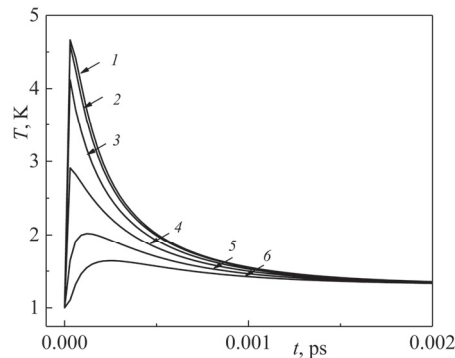


Рис.1. Временная зависимость температуры на поверхности термоэлектрического слоя La_{0.99}Se_{0.01}B₆ после поглощения фотонов с энергией 0.8 эВ при рабочей температуре 1 К в датчике с поверхностью 0.25 мкм² (на расстоянии от центра слоя: 1 – 0, 2 – 50, 3 – 100, 4 – 150, 5 – 200 и 6 – 250 нм).

Можно видеть, что максимум зависимости $T(t)$ в различных точках поверхности достигается очень быстро, а после максимума температура медленно спадает до рабочей температуры. Наиболее высокая температура достигается в центре. При удалении от центра значения максимума уменьшаются, а время достижения максимума увеличивается. Отметим также, что чем дальше расположена

поверхность от поглотителя, тем меньшая температура на нем достигается.

Как видно из рис.1, спустя некоторое время после начала процесса распространения тепла в термоэлектрическом датчике температура выравнивается по всей поверхности слоев. Три параметра характеризуют этот процесс: время (t_e), когда отличие температур на разных участках поверхности слоя становится меньше определенного значения (ξ), абсолютная температура (T_e), при которой это происходит и разность температур $\Delta T_e = T_e - T_0$. Очевидно, что значения этих параметров зависят от величины ξ . Чем меньшее ξ , тем позже и при более низкой температуре достигается выравнивание. Рассмотрим подробно параметры t_e и ΔT_e для значения $\xi = 0.1$ мК. Зависимость параметра t_e от рабочей температуры показана на рис.2.

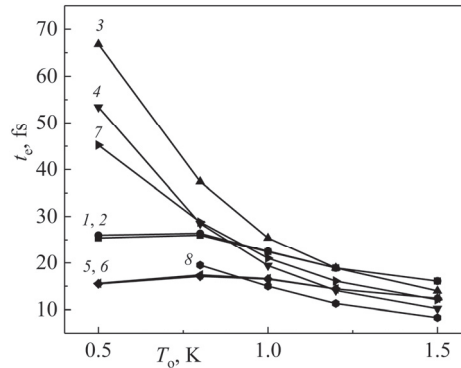


Рис.2. Зависимость параметра t_e от рабочей температуры при поглощении фотонов с энергией 1.65 эВ (1–4) и 0.8 эВ (5–8) в датчике с поверхностью 0.25 мкм² (поверхность слоев: 1, 5 – поглотитель, 2, 6 – термоэлектрик, 3, 7 – теплоотвод и 4, 8 – подложка).

Можно видеть, что параметр t_e уменьшается с увеличением рабочей температуры датчика почти во всех рассмотренных случаях. Исключением являются значения t_e поверхности поглотителя и термоэлектрического слоя для фотонов с энергией 0.8 эВ, которые с увеличением T_0 сначала слегка возрастают, и начинают убывать при $T_0 > 0.8$ К. При низких рабочих температурах выравнивание температуры на поверхности поглотителя и термоэлектрического слоя происходит быстрее, чем на поверхности теплоотвода и подложки. При $T_0 > 1$ К картина обратная. Для всех рассмотренных случаев, поглощению фотона с меньшей энергией соответствует меньшее значение параметра t_e . Отметим, что при $T_0 < 1$ К значительно отличаются численные значения параметра t_e поверхности поглотителя и термоэлектрического слоя для датчиков с разной площадью поверхности. При $A = 0.25$ мкм² параметр t_e значительно меньше, чем при $A = 1$ мкм². Из-за большой теплопроводности вольфрама температура на обеих границах поглотителя выравнивается до очень близкой температуры за практически одинаковое время. Эта закономерность выполняется для всех рассмотренных случаев.

Зависимость параметра ΔT_e от рабочей температуры приведена на рис.3. Можно видеть, что ΔT_e уменьшается с увеличением рабочей температуры и при одной и той же рабочей температуре больше в случае поглощения фотона с большей энергией в датчике с меньшей площадью поверхности.

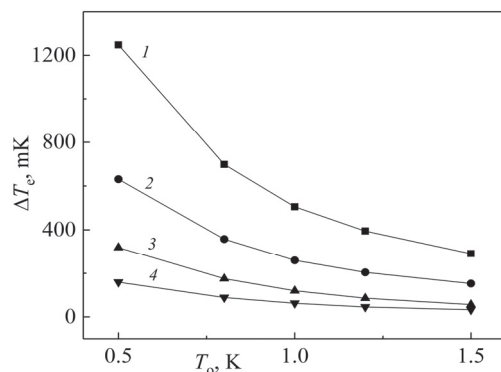


Рис.3. Зависимость параметра ΔT_e поверхности термоэлектрического слоя от рабочей температуры датчика (1, 2 – $A = 0.25$ и 3, 4 – $A = 1 \text{ мкм}^2$; 1, 3 – $E = 1.65$ и 2, 4 – $E = 0.8$ эВ).

Для расчета параметров датчика нужно рассматривать усредненную температуру поверхности слоев сенсора, градиента усредненной температуры на термоэлектрическом слое. В табл.3 приведены максимальная разность усредненной температуры на границах термоэлектрического слоя датчика WLCM (ΔT_m), время достижения максимума зависимости $\Delta T(t)$, время (t_b) спада до уровня фона $T_o + \delta$ (ниже, если специально не оговаривается, $\delta = 0.1$ мК) и значения полосы частот Δf , в которой рассматривается сигнал сенсора.

Можно видеть, что параметр ΔT_m уменьшается с увеличением рабочей температуры и больше для энергии фотона 1.65 эВ и площади поверхности датчика 0.25 мкм^2 . Отметим, что значение параметра ΔT_m , обусловленное поглощением фотонов с энергией 0.8 эВ в датчике с площадью 0.25 мкм^2 , при всех рабочих

Табл.3. Параметры временной зависимости градиента усредненной температуры на границах термоэлектрического слоя датчика WLCM с площадью поверхности 1 и 0.25 мкм^2 при поглощении фотонов с энергией 1.65 и 0.8 эВ

T_o , K	$E = 1.65 \text{ эВ}$				$E = 0.8 \text{ эВ}$				FWHM, ϕ_c
	ΔT_m , K	t_m , ϕ_c	t_b , пс	Δf , ТГц	ΔT_m , K	t_m , ϕ_c	t_b , пс	Δf , ТГц	
	$A = 0.25 \text{ мкм}^2$								
0.5	1.428	0.0246	4.88	0.21	0.692	0.0246	4.46	0.22	296
0.8	0.888	0.0228	1.95	0.51	0.431	0.0228	1.79	0.56	121
1	0.701	0.0219	0.99	1.01	0.340	0.0219	0.91	1.10	62
1.2	0.587	0.0206	0.60	1.66	0.285	0.0206	0.55	1.81	38
1.5	0.469	0.0192	0.39	2.59	0.228	0.0192	0.35	2.84	25
	$A = 1 \text{ мкм}^2$								
0.5	0.375	0.0345	4.68	0.21	0.182	0.0345	4.27	0.24	354
0.8	0.233	0.0318	1.80	0.56	0.113	0.0318	1.63	0.61	145
1	0.184	0.0300	0.91	1.10	0.089	0.0300	0.82	1.22	74
1.2	0.154	0.0282	0.55	1.81	0.075	0.0282	0.50	2.01	46
1.5	0.123	0.0267	0.35	2.85	0.060	0.0267	0.32	3.18	30

температурах больше значений этого параметра при поглощении фотонов с энергией 1.65 эВ в датчике с поверхностью 1 мкм². Наибольшему (0.7 К) и наименьшему (0.09К) значению градиента ΔT_m , которые мы наблюдаем при рабочей температуре 1 К (коэффициент Зеебека термоэлектрического слоя 103 мкВ/К, соответствует напряжение 72.1 и 9.3 мкВ. Сигналы такого уровня могут регистрироваться без дополнительного усиления.

Из таблицы видно, что максимум зависимости $\Delta T(t)$ достигается очень быстро. Параметр t_m не зависит от энергии фотона, уменьшается с увеличением рабочей температуры и при той же рабочей температуре больше для датчика с большей площадью поверхности. Общим для всех рассмотренных случаев моделирования является то, что с увеличением рабочей температуры параметр t_b убывает, а Δf возрастает. Можно видеть, что при одной и той же рабочей температуре меньшим энергиям фотона при одинаковой площади поверхности датчика и большей площади датчика при одинаковой энергии фотона соответствуют меньшие значения параметра t_b и более высокие значения Δf . Важным временным параметром является ширина на полувысоте (FWHM) зависимости $\Delta T(t)$. Результаты моделирования показывают, что этот параметр изменяется с изменением рабочей температуры и не зависит от энергии поглощенного фотона, несмотря на значительную разницу в значениях ΔT_m . Значения FWHM приведены в последнем столбце табл.3. Параметр FWHM уменьшается с увеличением рабочей температуры и больше для датчика с большей поверхностью при всех рабочих температурах.

3.3. Расчет мощности сигнала, эквивалентного шума и отношения сигнал/шум

Рассмотрим параметры датчика WLCM для случая поглощения фотонов с энергией 1.65 и 0.8 эВ. Возможность регистрации электрического сигнала определяется отношением сигнала к шуму и задается уравнением $SNR = P_s/P_N$, где P_s и P_N – мощности сигнала и шума, которые измерены в одной и той же полосе частот регистрирующей системы. Мощность шума определяется уравнением $P_N = NEP \times \Delta f^{1/2}$. Мгновенная мощность электрического сигнала системы составляет $P(t) = V^2/R$, где V – электрическое напряжение, возникающее в системе с сопротивлением R . Средняя за период τ активная мощность $P = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau P(t) dt$. Мгновенное напряжение на сенсоре равно произведению коэффициента Зеебека термоэлектрического слоя на разность усредненной температуры на его границах. Разделив интеграл мгновенной мощности на время интегрирования сигнала, которое в нашем случае является временем спада сигнала до фоновое значения, получим мощность сигнала P_s .

На рис.4–6 приведены данные зависимости от рабочей температуры параметров P_N , P_s и SNR для уровня фона $\delta = 0.1$ мК. Можно видеть, что с увеличением T_o мощность шума возрастает, мощность сигнала убывает, следовательно, убывает и отношение сигнала к шуму. При фиксированном значении T_o мощность шума больше у датчика с меньшей площадью поверхности и при поглощении фотона с меньшей энергией, однако зависимость P_N от энергии фотона слабая.

При фиксированной рабочей температуре мощность сигнала больше у датчика с меньшей площадью поверхности и при поглощении фотона с большей энергией. Данная закономерность выполняется и для отношения сигнал/шум. Значения SNR больше двух, что можно считать критерием эффективной

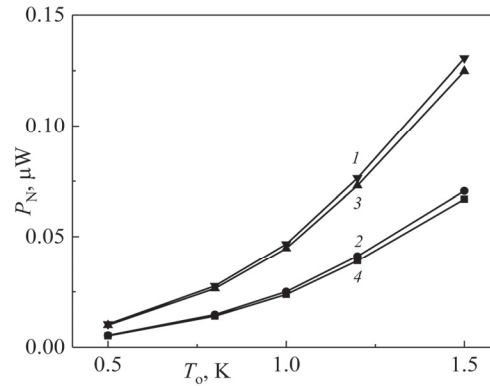


Рис.4. Зависимость мощности шума от рабочей температуры: 1, 2 – $A = 1$ и 3, 4 – $A = 0.25$ $\mu\text{м}^2$; 1, 3 – $E = 1.65$ и 2, 4 – $E = 0.8$ эВ.

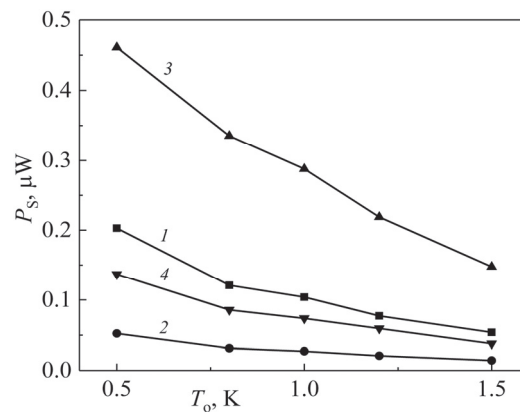


Рис.5. Зависимость мощности сигнала от рабочей температуры: 1, 2 – $A = 1$ и 3, 4 – $A = 0.25$ $\mu\text{м}^2$; 1, 3 – $E = 1.65$ и 2, 4 – $E = 0.8$ эВ.

регистрации уже поглощенного фотона, реализуются при $T_0 < 1$. Максимальные значения SNR достигаются при $T_0 = 0.5$ К. Даже для низкоэнергетичных фотонов ближнего ИК диапазона $\text{SNR} > 10$ для сенсора с поверхностью 0.25 $\mu\text{м}^2$.

Полученные при $\delta = 0.1$ мК закономерности для параметров P_N , P_S и SNR сохраняются при спаде сигнала до уровня $\delta = 1$ мК и при рассмотрении сигнала с продолжительностью, определяемой параметром FWHM. Численные значения отношения сигнал/шум для датчика с поверхностью 0.25 $\mu\text{м}^2$ представлены в табл.4. Можно видеть, что с увеличением δ значения параметра SNR термоэлектрического датчика увеличиваются. При рассмотрении сигнала за промежуток времени, который соответствует ширине сигнала на полувысоте, получены значения $\text{SNR} > 1$ при всех рассмотренных рабочих температурах в случае поглощения фотона в ближней ИК области в сенсоре WLCM с поверхностью 0.25 $\mu\text{м}^2$.

4. Заключение

В работе рассмотрены особенности распространения тепла, выделенного одиночным фотоном в термоэлектрическом датчике с квадратной поверхностью 0.25 $\mu\text{м}^2$, состоящем из последовательно расположенных друг на друге диэлектрической подложки (Al_2O_3), теплоотвода (Mo), термоэлектрического слоя

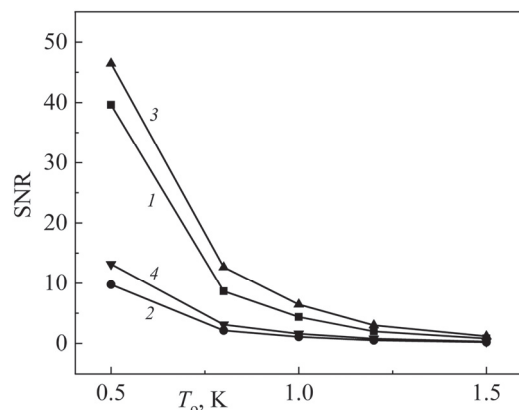


Рис.6. Зависимость отношения сигнал/шум от рабочей температуры: 1, 2 – $A = 1$ и 3, 4 – $A = 0.25$ $\mu\text{м}^2$; 1, 3 – $E = 1.65$ и 2, 4 – $E = 0.8$ эВ.

Табл.4. Значения параметра SNR датчика WLCM с площадью поверхности $0.25 \mu\text{м}^2$

T_0 , K	$E = 1.65 \text{ эВ}$			$E = 0.8 \text{ эВ}$		
	SNR					
	$\delta = 0.1 \text{ мК}$	$\delta = 1 \text{ мК}$	FWHM	$\delta = 0.1 \text{ мК}$	$\delta = 1 \text{ мК}$	FWHM
0.5	46.46	60.6	163	13.17	17.2	38.2
0.8	12.67	14.7	34.3	3.11	3.66	10.8
1	6.44	7.51	17.3	1.58	1.87	5.8
1.2	3.00	3.58	8.2	0.78	0.93	2.9
1.5	1.18	1.39	3.1	0.29	0.35	1.1

($\text{La}_{0.99}\text{Ce}_{0.01}\text{B}_6$), и поглотителя (W).

Получены результаты моделирования процессов распространения тепла в датчике с рабочей температурой 0.5, 0.8, 1, 1.2, и 1.5 К при поглощении фотонов с энергией 0.8 и 1.65 эВ. Рассчитана эквивалентная мощность джонсоновского и фононного шума. Определена мощность возникающего на датчике сигнала и отношения сигнал/шум. Проведено сравнение с характеристиками датчика с площадью поверхности $1 \mu\text{м}^2$.

Основным полученным результатом является то, что уменьшение площади поверхности датчика приводит к увеличению отношения сигнал/шум, следовательно, увеличению эффективности регистрации уже поглощенного фотона. Этот результат особенно важен для однофотонного детектирования в ближней ИК области.

Для многих применений однофотонных детекторов важным параметром является системная эффективность определяемая отношением числа достигших датчик фотонов к числу зарегистрированных. И здесь, кроме эффективности регистрации поглощенных фотонов, эффективности поглощения фотонов, необходимо учитывать эффективность оптической связи фотонов с датчиком. Коэффициент отражения вольфрама в ближней ИК области высокий. Следовательно, только с антиотражающим покрытием датчик WLCM может обеспечить

высокую системную эффективность.

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

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по высшему образованию и науке РА в рамках научного проекта №24WS-1C016 «Разработка наноразмерного термоэлектрического однофотонного детектора с высокими характеристиками и широким спектральным диапазоном».

ЛИТЕРАТУРА

1. H. Hao, QY. Zhao, YH. Huang, J. Deng, F. Yang, SY. Ru, Z. Liu, C. Wan, H. Liu, ZJ. Li, HB. Wang, XC. Tu, LB. Zhang, XQ. Jia, XL. Wu, J. Chen, L. Kang, PH. Wu. *Light Sci Appl*, **13**, 25 (2024).
2. R. Hadfield. *Nat. Photon.*, **3**, 696 (2009).
3. D. Cornwell. *Opt. Photonics N.*, **27**, 24 (2016).
4. G. Tessier, M. Bardoux, C. Filloy, C. Boue, D. Fournier. *Sensor Review*, **27**, 291 (2007).
5. M. Mecklenburg, W.A. Hubbard, E.R. White, R. Dhall, S.B. Cronin, S. Aloni, B.C. Regan. *Science*, **347**, 629 (2015).
6. H. Xue, R. Qian, W. Lu, X. Gong, L. Qin, Z. Zhong, Z. An, L. Chen, W. Lu. *Nat Commun*, **14**, 3731 (2023).
7. D. Halbertal, J. Cuppens, M. Ben Shalom, L. Embon, N. Shadmi, Y. Anahory, H.R. Naren, J. Sarkar, A. Uri, Y. Ronen, Y. Myasoedov, L.S. Levitov, E. Joselevich, A.K. Geim, E. Zeldov. *Nature*, **539**, 407 (2016).
8. L. Caesar, S. Rahmstorf, A. Robinson, G. Feulner, V. Saba. *Nature*, **556**, 191 (2018).
9. S.C. Riser, H.J. Freeland, D. Roemmich, S. Wijffels, A. Troisi, M. Belbéoch, D. Gilbert, J. Xu, S. Pouliquen, A. Thresher, P-Y. Le Traon, G. Maze, B. Klein, M. Ravichandran, F. Grant, P-M. Poulain, T. Suga, B. Lim, A. Sterl, P. Sutton, K.-A. Mork, P.J. Véléz-Belchí, I. Ansorge, B. King, J. Turton, M. Baringer, S.R. Jayne. *Nat Clim Change*, **6**, 145 (2016).
10. J. Arrazola, B. Brädler, K. Ville, T. Bromley, M. Collins, I. Dhand, A. Fumagalli, T. Gerrits, A. Goussev, L. Helt, J. Hundal, T. Isacsson, R. Israel, J. Izaac, S. Jahangiri, R. Janik, N. Killoran, S. Kumar, J. Lavoie, Y. Zhang. *Nature*, **591**(7848), 54 (2021).
11. M.K. Bhaskar, R. Riedinger, B. Machielse, D.S. Levonian, C.T. Nguyen, E.N. Knall, H. Park, D. Englund, M. Lončar, D.D. Sukachev, M.D. Lukin. *Nature*, **580** (7801), 60 (2020).
12. A.W. Elshaari, W. Pernice, K. Srinivasan, O. Benson, V. Zwiller. *Nat Photonics.*, **14**, 285 (2020).
13. D. Cozzolino, D. Bacco, B. Da Lio, K. Ingerslev, Y. Ding, K. Dalgaard, P. Kristensen, M. Galili, K. Rottwitt, S. Ramachandran, L.K. Oxenløwe. *Phys Rev Appl.*, **11**, 064058 (2019).
14. F. Galeotti, M. Pisco, A. Cusano. *Nanoscale*, **10**, 22673 (2018).
15. P. Vaiano, B. Carotenuto, M. Pisco, A. Ricciardi, G. Quero, M. Consales, A. Crescitelli, E. Esposito, A. Cusano. *Laser Photonics Rev.*, **10**, 922 (2016).
16. M. Consales, G. Quero, S. Spaziani, M. Principe, A. Micco, V. Galdi, A. Cutolo, A. Cusano. *Laser Photonics Rev.*, **14**, 2000180 (2020).
17. M. Plidschun, H. Ren, J. Kim, R. Forster, S.A. Maier, M.A. Schmidt. *Light Sci Appl.*, **10**, 57 (2021).
18. L. Zhang, H. Zhang, N. Tang, X. Chen, F. Liu, X. Sun, H. Yu, X. Sun, Q. Jia, B.

- Chen, B. Cluzel, P. Grelu, A. Coillet, F. Qiu, L. Ying, W. E. I. Sha, X. Liu, J. Qiu, D. Zhao, W. Yan, D. Wu, X. Shen, J. Wang, M. Qiu. *Light. Adv. Manuf.*, **3**, 45 (2022).
19. Y. Dai, K. Jia, G. Zhu, H. Li, Y. Fei, Y. Gu, H. Yuan, H. Wang, X. Jia, Q. Zha, L. Kang, J. Chen, S-n. Zhu, P. Wu, Z. Xie, L. Zhang. *PhotonIX*, **4**, 7 (2023).
 20. A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan. *IEEE Sens. J.*, **20**, 3040 (2020).
 21. A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan. *IEEE Sens. J.*, **20**, 12776 (2020).
 22. A.A. Kuzanyan, A.S. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, S.R. Harutyunyan. *J. Contemp. Phys.*, **57**, 580 (2022).
 23. A.A. Kuzanyan, A.S. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, V.T. Tatoyan, V.S. Kuzanyan, S.R. Harutyunyan, G.Ts. Kharatyan, G.R. Badalyan. *J. Contemp. Phys.*, **58**, 155 (2023).
 24. A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan.
 25. A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan. *Opt. Eng.*, **63**, 067102 (2024). *Opt. Eng.*, **63**, 017105 (2024).
 26. A. Kuzanyan, V. Nikoghosyan, A. Davoyan, A.S. Kuzanyan. *Applied Optics*, **64**, 1 (2025).
 27. A. Gulian, A.M. Gulian. *Mod. Phys. Lett. B*, **34**, 2050403 (2020).
 28. K. Samwer, K. Winzer. *Z. Physik B*, **25**, 269 (1976).
 29. G.K. White, S.J. Collocott. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **13**, 1251 (1984).
 30. C.Y. Ho, R.W. Powell, P.E. Liley. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **3**, 689 (1974).
 31. P.D. Desai, T.K. Chu, H.M. James, C.Y. Ho. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **13**, 1069 (1984).
 32. W. Duffy, S. Dalal, M. Quiazon. *J Appl. Phys.*, **81**, 6675 (1997).
 33. G.T. Furukawa, T.B. Douglas, R.E. McCoskey, D.C. Ginnings. *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, **57**, 67 (1956).
 34. M.W. Wolfmeyer, J.R. Dillinger. *Phys. Lett.*, **34A**, 247 (1971).

NANO-SCALE THERMOELECTRIC SINGLE-PHOTON DETECTOR

A.A. KUZANYAN, A.S. KUZANYAN, V.R. NIKOGHOSYAN, L.G. MHERYAN,
V.T. TATOYAN, V.S. KUZANYAN, G.R. BADALYAN

The article considers the features of heat propagation released by a single photon in a thermoelectric sensor with a surface area of $0.25 \mu\text{m}^2$ consisting of a dielectric substrate (Al_2O_3), a heat sink (Mo), a thermoelectric layer ($\text{La}_{0.99}\text{Ce}_{0.01}\text{B}_6$), and an absorber (W) sequentially located on each other. The results of heat propagation simulation in the sensor with an operating temperature of 0.5, 0.8, 1, 1.2, and 1.5 K upon absorption of photons with energies of 0.8 and 1.65 eV are presented. The equivalent power of Johnson and phonon noise is calculated. The power of the signal arising on the sensor and the signal-to-noise ratio are determined. A comparison is made with the characteristics of a sensor of the same design with a surface area of $1 \mu\text{m}^2$. The calculations were performed using the three-dimensional matrix method based on the equation of heat propagation from a limited volume. It is shown that decreasing the surface area of the sensor leads to an increase in the signal/noise ratio, and therefore to an increase in the efficiency of recording the already absorbed photon. This result is especially important for single-photon detection in the near infrared region.