

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК С ВОЛЬФРАМОВЫМ ПОГЛОТИТЕЛЕМ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНА

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

Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак, Армения

*e-mail: akuzanyan@yahoo.com

(Поступила в редакцию 20 июня 2025 г.)

Представлены результаты компьютерного моделирования процессов распространения тепла в многослойном термоэлектрическом сенсоре после поглощения одиночных фотонов экстремального ультрафиолетового диапазона длин волн. Сенсор состоит из поглотителя (W), термоэлектрического слоя ($\text{La}_{0.99}\text{Ce}_{0.01}\text{B}_6$), теплоотвода (Mo) и диэлектрической подложки (Al_2O_3). Исследованы оптические спектры вольфрама и установлено, что сенсор с поглотителем W может обеспечить эффективную оптическую связь с фотонами экстремального ультрафиолетового диапазона. Определена оптимальная толщина поглотителя, которая обеспечит эффективное поглощение фотонов в этой области. Компьютерное моделирование проводилось с использованием метода трехмерных матриц на основе уравнения распространения тепла из ограниченного объема. Изучены временные зависимости температуры разных областей сенсора после поглощения одиночных фотонов с длинами волн 55.1, 32.627 и 27.71 нм (22.5, 38 и 44.7 эВ). Полученные результаты позволяют рассчитать отношение сигнал/шум сенсора и определить эффективность регистрации уже поглощенного фотона. Доказано, что системная эффективность термоэлектрического сенсора с вольфрамовым поглотителем может превышать 90% при регистрации одиночных фотонов экстремального ультрафиолетового диапазона.

1. Введение

В самых различных областях науки и техники проводятся исследования, включающие однофотонное детектирование [1–3]. Однофотонные детекторы широко используются как в ИК [4–6], так и в УФ диапазоне [7–9], однако мало исследовано однофотонное детектирование в области экстремального ультрафиолета (ЭУФ), хотя перспективы использования обширны. В частности, использование излучения ЭУФ диапазона для микроскопии обеспечивает наномасштабное разрешение, высокий контраст и возможность проникать на несколько микрометров в твердые образцы [10]. Одним из препятствий развития исследований по использованию ЭУФ было отсутствие удобных источников излучения. Сейчас лазеры ЭУФ диапазона на основе генерации высоких гармоник обеспечивают поток фотонов, сопоставимый с крупномасштабными синхротронами [11]. В результате стали широко исследоваться возможности как ЭУФ-визуализации [12, 13], так и спектроскопических приложений [14, 15].

Экспериментально показано, что сверхпроводящие нанопроволочные однофотонные детекторы могут быть использованы для подсчета ЭУФ фотонов [16].

Нами изучается возможность создания термоэлектрического однофотонного детектора, который по теоретическим оценкам [17] и данным компьютерного моделирования [18, 19] обладает рядом преимуществ по сравнению со сверхпроводящими детекторами. Наши исследования показали, что отношение сигнал/шум (SNR) термоэлектрического сенсора однофотонного детектора с вольфрамовым поглотителем может быть значительно больше единицы для фотонов ультрафиолетовой области электромагнитного спектра [20–22]. Это означает, что такой сенсор может обеспечить регистрацию уже поглощенного фотона с высокой эффективностью. Цель настоящей работы доказать, что термоэлектрический сенсор такой же конструкции может обладать высокой системной эффективностью в ЭУФ области спектра.

2. Методы исследований

Мы исследуем многослойный термоэлектрический сенсор WLM, состоящий из поглотителя (W), термоэлектрического слоя ($\text{La}_{0.99}\text{Ce}_{0.01}\text{B}_6$), теплоотвода (Mo) и диэлектрической подложки (Al_2O_3). Сенсор с рабочей температурой (T_0), принимающей значения 0.5, 1 и 1.5 K имеет квадратную поверхность с площадью (A), равной 1 и 100 мкм^2 . Толщина слоев сенсора, поглотителя, термоэлектрического слоя, теплоотвода и подложки не менялась и составляла 40, 10, 10 и 100 нм, соответственно.

Компьютерное моделирование процессов распространения тепла в термоэлектрическом сенсоре проводилось на основе уравнения теплопередачи из ограниченного объема, а именно, из зоны термализации фотона. Используемая методика подробно описана в работе [20]. Изучены временные зависимости температуры в зоне термализации, в центре границ всех слоев, в 10 точках на каждой границе с одинаковым шагом от центра и усредненной температуры поверхности слоев. В табл.1 приведены физические параметры материалов, которые использованы в расчетах.

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 [23]	0.0028 [25]	1.1×10^{-2} [28]	1×10^{-3} [29]
Теплопроводность, Вт/(м×K)	0.35 [23]	720 [26]	25 [28]	0.7 [30]
Коэффициент Зеебека, мкВ/K	90 [23]			
Удельное сопротивление, Ом×м	3×10^{-8} [24]	1.54×10^{-13} [27]	0	
1 K				
Теплоемкость, Дж/(кг×K)	0.13 [23]	0.0057 [25]	1.9×10^{-2} [28]	2×10^{-3} [29]
Теплопроводность, Вт/(м×K)	1.1 [23]	1440 [26]	50 [28]	4.9 [30]
Коэффициент Зеебека, мкВ/K	103 [23]			
Удельное сопротивление, Ом×м	2×10^{-8} [24]	1.57×10^{-13} [27]	7×10^{-12} [27]	
1.5 K				
Теплоемкость, Дж/(кг×K)	0.11 [23]	0.0085 [25]	2.8×10^{-2} [28]	3×10^{-3} [29]
Теплопроводность, Вт/(м×K)	2.3 [23]	2160 [26]	75 [28]	15.5 [30]
Коэффициент Зеебека, мкВ/K	103 [23]			
Удельное сопротивление, Ом×м	1.8×10^{-8} [24]	1.6×10^{-13} [27]	7×10^{-12} [27]	

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Системная эффективность WLM сенсора

Системная эффективность (η) однофотонных детекторов определяется отношением числа достигших детектирующий элемент и зарегистрированных фотонов [31]. Она обусловлена тремя факторами: эффективностью оптической связи регистрируемого фотона и детектирующего элемента (η_1), эффективностью поглощения фотона (η_2) и эффективностью регистрации уже поглощенного фотона (η_3), и задается уравнением $\eta = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3$. Значения η_1 и η_2 определяются оптическими характеристиками детектирующего элемента. При трехслойной конструкции детектирующего элемента, состоящей из поглотителя термоэлектрического сенсора и теплоотвода, величина η_1 зависит от отражения (reflectance – R) а η_2 от пропускания (transmittance – T) поглотителя. Значение R излучения определенной длины волны (λ) зависит от поляризации и угла падения излучения. Значение T зависит от толщины образца и не является монотонной функцией от длины волны излучения. По определению: $\eta_1 = 1 - R$, $\eta_2 = 1 - T$. Рассмотрим эти параметры для вольфрамового поглотителя. В табл.2 приведены значения $\eta_1 \times \eta_2$ для вольфрамового поглотителя толщиной d при поглощении фотонов с энергией E и длиной волны λ , рассчитанные по приведенным в [32] данным T и R .

Табл.2. Оптические характеристики вольфрамового поглотителя

E , эВ	λ , нм	d , нм	T	R	$\eta_1 \times \eta_2$
0.8	1550	15	0.174	0.947	0.044
		40	0.009	0.947	0.051
3.1	400	15	0.101	0.8	0.180
		40	0.002	0.8	0.199
22.5	55.1	15	0.15125	0.22	0.662
		40	0.0065	0.22	0.767
38	32.627	15	0.088	0.041	0.875
		40	0.0015	0.041	0.948
44.7	27.72	15	0.198	0.016	0.789
		40	0.013	0.016	0.971

Для фотонов ближней инфракрасной и ультрафиолетовой области спектра значения η_1 и η_2 малы. Для фотонов с энергией больше 22.5 эВ (ЭУФ) они большие, и могут обеспечить высокую системную эффективность сенсора с вольфрамовым поглотителем. Значение η_3 определяется отношением сигнал/шум детектирующего элемента и зависит как от геометрии детектирующего элемента, так и физических параметров используемых материалов: плотность, теплоемкость, теплопроводность, удельное сопротивление и коэффициент Зеебека. Если $SNR > 1$, то такой сигнал можно уверенно регистрировать, следовательно, значения $\eta_3 \sim 1$.

3.2. Эквивалентная мощность шума

Эквивалентная мощность шума тепловых детекторов (NEP) обусловлена главным образом фоновым (NEP_P) и Джонсоновским (NEP_J) шумом [33], которые для термоэлектрического сенсора определяются уравнениями [34]

$$\text{NEP} = (\text{NEP}_p^2 + \text{NEP}_j^2)^{1/2}, \quad (1)$$

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

$$\text{NEP}_j^2 = \frac{4k_B T (\rho_1 d_1 + \rho_2 d_2) (4A\varepsilon\sigma_{\text{SB}} T^3 + k_1 d_1 + k_2 d_2)^2}{A|S|^2}. \quad (3)$$

Здесь k_B – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, A – площадь поверхности сенсора, ε – поглощающая способность поглотителя, σ_{SB} – постоянная Стефана–Больцмана, k_3 – теплопроводность материала теплоотвода, d_3 – толщина теплоотвода, S – коэффициент Зеебека материала термоэлектрического слоя, ρ_1 , d_1 , k_1 обозначают соответственно удельное сопротивление, толщину и теплопроводность поглотителя, а ρ_2 , d_2 , k_2 относятся к тем же параметрам термоэлектрического слоя. Эквивалентная мощность шума сенсора WLM с площадью поверхности 100 и 1 мкм² приведена в табл.3.

Табл.3. Эквивалентная мощность шума сенсора WLM

T_o , К	NEP _p	NEP _j	NEP	NEP _p	NEP _j	NEP
	$\text{фВт/Гц}^{1/2}$					
	$A = 100 \text{ мкм}^2$			$A = 1 \text{ мкм}^2$		
0.5	1.86	2.91	3.45	1.86	29.12	29.18
1	5.25	5.88	7.88	5.25	58.77	59.00
1.5	10.24	10.24	14.07	10.24	102.44	102.89

Фононный шум не изменяется с изменением площади поверхности сенсора. При одинаковой рабочей температуре Джонсоновский шум сенсора с площадью 1 мкм² на порядок больше, чем у сенсора с площадью 100 мкм², намного больше фонов шума и определяет суммарный шум, который так же как NEP_p и NEP_j, возрастает с увеличением рабочей температуры для обоих значений площади поверхности сенсора.

3.3. Моделирование процесса распространения тепла в WLM сенсоре после поглощения фотонов с энергией 22.5, 38 и 44.7 эВ

Основные закономерности распространения тепла в термоэлектрическом сенсоре WLM после поглощения одиночных ЭУФ фотонов аналогичны установленным ранее для многослойных сенсоров других конструкций, одинаковы для поверхностей всех слоев сенсора, для различных энергий фотонов и рабочих температур [19, 34]. Наиболее важные из них следующие закономерности. Максимальная температура достигается в центре поверхности слоя, при удалении от центра значения максимума уменьшаются, а время достижения максимума увеличивается; чем дальше расположен слой от поглотителя, тем меньшие температуры на нем достигаются. Целью представленных в этом параграфе исследований является определение возникающего на сенсоре сигнала, а именно, электрического напряжения. Методом компьютерного моделирования исследуется временная зависимость градиента температуры, усредненной по границам термоэлектрического слоя с поглотителем и теплоотводом, которые являются также электрическими контактами для регистрации сигнала. Фиксируются следующие параметры временной зависимости этого градиента: максимум – ΔT_m , время спада до уровня фона – t_b , который выше рабочей температуры T_o на 0.1 мК, и полоса частот

измерений системы $\Delta f = 1/t_b$. Эти параметры для сенсора с площадью поверхности 100 мкм^2 приведены в табл.4.

Табл.4. Параметры временной зависимости градиента усредненной температуры на границах термоэлектрического слоя сенсора WLM с площадью поверхности 100 мкм^2

T_0 , К	$E = 22.5 \text{ эВ}$			$E = 38 \text{ эВ}$			$E = 44.7 \text{ эВ}$		
	ΔT_m , мК	t_b , пс	Δf , ТГц	ΔT_m , мК	t_b , пс	Δf , ТГц	ΔT_m , мК	t_b , пс	Δf , ТГц
0.5	24.23	6.945	0.144	40.92	7.676	0.13	48.14	7.937	0.126
1	11.89	1.256	0.797	20.08	1.40	0.714	23.62	1.45	0.692
1.5	7.96	0.467	2.143	13.44	0.525	1.91	15.81	0.54	1.84

Параметры ΔT_m и t_b увеличиваются с понижением рабочей температуры и повышением энергии фотона. Полоса частот измерений, которую можно рассматривать, так же как скорость счета детектора, изменяется в пределах 0.13–2.14 ТГц, так что сенсор WLM с поверхностью 100 мкм^2 очень быстрый. Другие временные параметры сенсора, время достижения максимума зависимости $\Delta T(t)$ и ширина на полувысоте FWHM от энергии фотона и площади поверхности сенсора не зависят. Время достижения максимума не зависит и от рабочей температуры и имеет значение порядка 0.15 фс. Параметр FWHM уменьшается с увеличением рабочей температуры, и для T_0 , равной 0.5, 1 и 1.5 К, имеет значения 0.807, 0.107 и 0.069 пс. У сенсоров с разной площадью поверхности отличаются параметры ΔT_m и t_b , которые значительно больше у сенсора с площадью 1 мкм^2 .

Сигнал термоэлектрического сенсора и возникающее на нем электрическое напряжение, являющееся результатом поглощения фотона и возникновения градиента температуры на термоэлектрическом слое, задаются уравнением $V(t) = S \times \Delta T(t)$, где S – коэффициент Зеебека материала термоэлектрического слоя, а $\Delta T(t)$ – градиент усредненной температуры на нем. Значения возникающего на сенсоре с поверхностью 100 мкм^2 максимального электрического напряжения при различных энергиях фотона и рабочих температурах показаны на рис.1. Максимальное

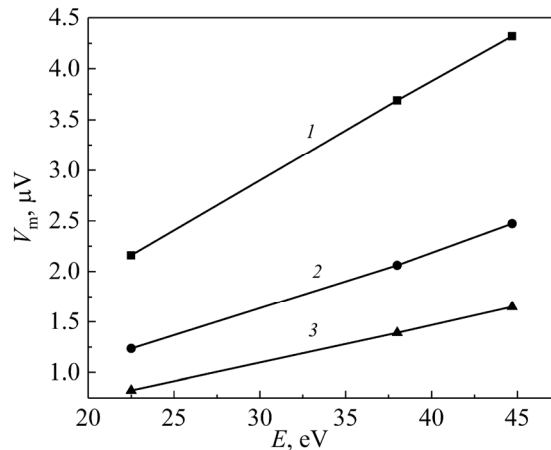


Рис.1. Зависимость возникающего на сенсоре с поверхностью 100 мкм^2 максимального электрического напряжения от энергии фотона при рабочих температурах: 1 – 0.5, 2 – 1 и 3 – 1.5 К.

напряжение V_m , имеющее значение на уровне микровольт, линейно увеличивается с ростом энергии фотона и больше при более низких рабочих температурах. Так как параметр ΔT_m сенсора с $A = 1 \text{ мкм}^2$ значительно больше, чем для сенсора с $A = 100 \text{ мкм}^2$, то и возникающий на нем сигнал будет значительно больше.

3.4. Расчет мощности сигнала, мощности шума и SNR

SNR является важнейшим параметром однофотонных детекторов. Для вычисления SNR необходимо мощности сигнала и шума определить в одной и той же полосе измерений системы Δf . Мгновенная мощность электрического сигнала устройства с сопротивлением R , на котором возникает напряжение V , равна $P(t) =$

$V^2(t)/R$. Усредненная за период τ мощность сигнала равна $P_S = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau P(t) dt$. Мощ-

ность шума в единицах ватт определяется уравнением $P_N = NEP \times \Delta f^{1/2}$. Значения SNR термоэлектрического сенсора WLM при поглощении фотонов с энергией 0.8–7.1 эВ представлены в [35]. Значения параметров P_N , P_S и SNR сенсора WLM с различной площадью поверхности при различных рабочих температурах для случаев поглощения ЭУФ фотонов приведены в табл.5. При расчетах использовались данные моделирования при спаде зависимости $\Delta T(t)$ до уровня фона ($T_0 + 0.1 \text{ мК}$). Жирным шрифтом выделены результаты, полученные с использованием значений параметра FWHM для определения полосы измерений Δf .

Можно видеть, что с увеличением T_0 параметр P_N возрастает, P_S убывает, следовательно, убывает и SNR. При фиксированном значении T_0 мощность шума больше у сенсора с меньшей площадью поверхности и при поглощении фотона с меньшей энергией. Параметр P_N от энергии фотона зависит слабо, и совсем не меняется с изменением E в расчетах с использованием FWHM. При фиксированной рабочей температуре параметры P_S и SNR больше у сенсора с меньшей площадью поверхности и при поглощении фотона с большей энергией. Значения $SNR > 1$, что можно считать критерием эффективной регистрации уже поглощенного фотона ($\eta_3 \sim 1$), реализуются при всех рассмотренных случаях. В ряде случаев получены большие значения SNR. Они особенно большие при расчетах с использованием FWHM.

Табл.5. Значения параметров P_N , P_S и SNR термоэлектрического сенсора WLM

E , эВ	T_0 , К	P_N , нВт	P_S , нВт	SNR	P_N , нВт	P_S , нВт	SNR
		$A = 100 \text{ мкм}^2$			$A = 1 \text{ мкм}^2$		
22.5	0.5	1.31	132.0	100.7	32.2	71600	2220
	1	7.04	72.4	10.30	37.7	3240	85.9
	1.5	20.6	23.2	1.13	104.8	1640	15.6
38	0.5	1.25	3400	272	32.2	205000	6350
	1	6.66	185	27.8	36.7	8750	238
	1.5	19.4	98.3	5.06	101.8	4410	43.3
44.7	0.5	1.23	455	371	32.2	227000	7050
	1	6.56	248	37.80	36.4	11900	327
	1.5	19.1	131	6.88	101	2750	27.2

4. Заключение

Представлены результат компьютерного моделирования процессов распространения тепла в термоэлектрическом WLM сенсоре, состоящем из W поглотителя, $\text{La}_{0.99}\text{Ce}_{0.01}\text{B}_6$ термоэлектрического слоя, Mo теплоотвода и Al_2O_3 подложки, с толщами 40, 10, 10 и 100 нм соответственно. Изучено поглощение ЭУФ фотонов в сенсоре с площадью поверхности 1 и 100 μm^2 . Показано, что при рабочих температурах WLM сенсора 0.5–1.5 К системная эффективность регистрации одиночных фотонов с энергией 22.5, 38 и 44.7 эВ может достигать соответственно 95, 94 и 97 %. Высокие значения SNR, полученные в рассмотренном интервале рабочих температур позволяют надеяться, что высокая системная эффективность WLM сенсора может быть достигнута и при более высоких температурах.

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

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по высшему образованию и науке РА (проект № 1-6/ИФИ).

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. L.A. Coldren, S.W. Corzine, M.L. Mašanović. *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits*. John Wiley & Sons, Inc., 2012.
5. A.W. Elshaari, W. Pernice, K. Srinivasan, O. Benson, V.Zwiller. *Nat. Photonics*, **14**, 285 (2020).
6. F. Gardes, A. Shooa, G. De Paoli, I. Skandalos, S. Ilie, T. Rutirawut, W. Talataisong, J. Faneca, V. Vitali, Y. Hou, T. Bucio, I. Zeimpekis, C. Lacava, P. Petropoulos. *Sensors (Basel)*, **22**, 4227 (2022).
7. S. Gyger, J. Zichi, L. Schweickert, A.W. Elshaari, S. Steinhauer, S.F. Covre da Silva, A. Rastelli, V. Zwiller, K.D. Jöns, C. Errando-Herranz. *Nat. Commun.*, **12**, 1408 (2021).
8. E. Lomonte, M.A. Wolff, F. Beutel, S. Ferrari, C. Schuck, W.H.P. Pernice, F. Lenzini. *Nat. Commun.*, **12**, 6847 (2021).
9. 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).
10. F. Wiesner, M. Wünsche, J. Reinhard, J.J. Abel, J. Nathanael, S. Skruszewicz, C. Rödel, S. Yulin, A. Gawlik, G. Schmidl, U. Hübner, J. Plentz, G.G. Paulus, S. Fuchs. *Optica*, **8**, 230 (2021).
11. R. Klas, S. Demmler, M. Tschernajew, S. Hädrich, Y. Shamir, A. Tünnermann, J. Rothhardt, J. Limpert. *Optica*, **3**, 1167 (2016).
12. M.D. Seaberg, B. Zhang, D.F. Gardner, E.R. Shanblatt, M.M. Murnane, H.C. Kapteyn, D.E. Adams. *Optica*, **1**, 39 (2014).
13. M. Zürch, J. Rothhardt, S. Hädrich, et al., *Sci. Rep.*, **4**, 7356 (2014).
14. D. Popmintchev, B.R. Galloway, M.-C. Chen, F. Dollar, C.A. Mancuso, A. Hankla, L. Miaja-Avila, G. O'Neil, J.M. Shaw, G. Fan, S. Ališauskas, G. Andriukaitis, T. Balčiūnas, O.D. Mücke, A. Pugzlys, A. Baltuška, H.C. Kapteyn, T. Popmintchev, M.M. Murnane. *Phys. Rev. Lett.*, **120**, 093002 (2018).
15. B. Buades, D. Moonshiram, T.P.H. Sidiropoulos, I. León, P. Schmidt, I. Pi, N. Di Palo, S.L. Cousin, A. Picón, F. Koppens, J. Biegert. *Optica*, **5**, 502 (2018).
16. S. Fuchs, J.J. Abel, J. Nathanael, J. Reinhard, F. Wiesner, M. Wünsche,

- S. Skruszewicz, C. Rödel, D. Born, H. Schmidt, G.G. Paulus. Appl. Phys. B, **128**, 26 (2022).
17. A. Gulian, K. Wood, D. Van Vechten, G. Fritz. J. Mod. Opt., **51**, 1467 (2004).
 18. A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan. Opt. Eng., **63**, 017105 (2024).
 19. A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan. IEEE Sens. J., **20**, 3040 (2020).
 20. A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan. IEEE Sens. J., **20**, 12776 (2020).
 21. A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, L.G. Mheryan, A.S. Kuzanyan. J. Contemp. Phys., **59**, 323 (2024).
 22. A.A. Kuzanyan, A.S. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, L.G. Mheryan, V.T. Tatoyan, V.S. Kuzanyan, G.R. Badalyan. J. Contemp. Phys., **60**, 62 (2025).
 23. A. Gulian, A.M. Gulian. Mod. Phys. Lett. B, **34**, 2050403 (2020).
 24. K. Samwer, K. Winzer. Z. Physik B, **25**, 269 (1976).
 25. G.K. White, S.J. Collocott. J. Phys. Chem. Ref. Data, **13**, 1251 (1984).
 26. C.Y. Ho, R.W. Powell, P.E. Liley. J. Phys. Chem. Ref. Data, **3**, 689 (1974).
 27. P.D. Desai, T.K. Chu, H.M. James, C.Y. Ho. J. Phys. Chem. Ref. Data, **13**, 1069 (1984).
 28. W. Duffy, S. Dalal, M. Quiazon. J Appl. Phys., **81**, 6675 (1997).
 29. G.T. Furukawa, T.B. Douglas, R.E. McCoskey, D.C. Ginnings. J. Res. Nat. Bur. Stand., **57**, 67 (1956).
 30. M.W. Wolfmeyer, J.R. Dillinger. Phys. Lett., **34A**, 247 (1971).
 31. 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).
 32. W.S.M. Werner, K. Glantschnig, C. Ambrosch-Draxl. J. Phys. Chem. Ref. Data, **38**, 1013 (2009).
 33. U. Dillner, E. Kessler, H.-G. Meyer. J. Sens. Sens. Syst., **2**, 85 (2013).
 34. A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, A.S. Kuzanyan. Opt. Eng., **63**, 067102 (2024).
 35. A. Kuzanyan, V. Nikoghosyan, A. Davoyan, A.S. Kuzanyan. Appl. Opt., **64**, 2490 (2025).

HIGH-EFFICIENCY THERMOELECTRIC SENSOR WITH TUNGSTEN ABSORBER FOR REGISTRATION OF SINGLE PHOTONS OF THE EXTREMELY ULTRAVIOLET RANGE

A.A. KUZANYAN, V.R. NIKOGHOSYAN, L.G. MHERYAN, A.S. KUZANYAN

The results of computer modeling of heat propagation processes in a multilayer thermoelectric sensor after absorption of single photons of the extreme ultraviolet wavelength range are presented. The sensor consists from a W absorber, a $\text{La}_{0.99}\text{Ce}_{0.01}\text{B}_6$ thermoelectric layer, a Mo heat sink, and an Al_2O_3 dielectric substrate. The optical spectra of tungsten are examined and it is found that a sensor with a W absorber can provide efficient optical coupling with photons of extreme ultraviolet wavelengths. The optimal thickness of the absorber that will provide effective absorption of photons in this region is determined. Computer simulation was performed using the three-dimensional matrix method based on the equation of heat propagation from a limited volume. The temporal dependences of the temperature of different areas of the sensor after absorption of single photons with wavelengths of 55.1, 32.627 and 27.71 nm (22.5, 38 and 44.7 eV) were studied. The obtained results allow calculating the signal/noise ratio of the sensor and determining the efficiency of recording an already absorbed photon. It has been proven that the system efficiency of a thermoelectric sensor with a tungsten absorber can exceed 90% when recording single photons in the extreme ultraviolet range.