

Модель многослойного покрытия для искусственного оптического синапса

Е.М. Притоцкий¹, А.П. Притоцкая¹, М.А. Панков¹

¹ Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 140700, Россия, г. Шатура, ул. Святоозёрская, д. 1

Аннотация

Выполнены расчеты оптических характеристик тонких пленок теллурида германия (GeTe) в многослойных структурах. Разработана модель многослойного оптического покрытия с четырехуровневым коэффициентом пропускания. По полученным расчетным данным определены значения толщин, при которых происходит наибольшее изменение коэффициента пропускания для модулируемого оптического излучения на длине волны 1550 нм. Изготовлены экспериментальные образцы покрытий с просветленными пленками GeTe, и исследованы их оптические характеристики пропускания. Определены комбинации параметров многослойных структур для реализации контрастных уровней пропускания. Результаты исследования представляют реализацию многоуровневого искусственного оптического синапса для нейроморфных процессоров.

Ключевые слова: многослойное покрытие, фазоизменяемый материал, оптический синапс, нейроморфный процессор.

Цитирование: Притоцкий, Е.М. Модель многослойного покрытия для искусственного оптического синапса / Е.М. Притоцкий, А.П. Притоцкая, М.А. Панков // Компьютерная оптика. – 2022. – Т. 46, № 2. – С. 214-218. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1002.

Citation: Pritotskii EM, Pritotskaya AP, Pankov MA. Model of a multilayer coating for an artificial optical synapse. Computer Optics 2022; 46(2): 214-218. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1002.

Введение

Сегодня наиболее перспективными являются информационные системы, в которых совмещают процессы хранения и обработки информации в запоминающей среде. По таким принципам строятся архитектуры искусственных нейроморфных систем, где нейроны связаны между собой синапсами [1]. При этом синапс представляется в виде весового коэффициента, значение которого влияет на активацию нейрона [2]. Основное применение нейроморфных процессоров заключается в разработке и глубоком обучении искусственных нейронных сетей, в том числе сверточных [3] и спайковых [4].

Развитие нейроморфных процессоров ведется в направлении увеличения уровней записи весового коэффициента в синапс и использования аналоговых методов вычислений. Подобные подходы реализуются на основе мемристивных элементов, которые могут физически воспроизводить несколько уровней записи [5]. Заменить мемристоры можно программными алгоритмами, где весовой коэффициент записывается четырьмя целыми числами в одном искусственном синапсе, а вычислительное ядро реализуется по классической полупроводниковой технологии [6]. Другой способ увеличить число уровней записи – использовать материалы, которые изменяют свои электрические и оптические свойства при тепловом воздействии. Технология энергонезависимой памяти реализуется за счет обратимых фазовых переходов в тонких пленках фазоизменяемых материалов и позволяет хранить несколько уровней электропроводности [7, 8]. Подобные вычис-

лительные архитектуры являются на данный момент лучшими по критериям энергоэффективности и производительности [9].

Опережающее развитие нейроморфных процессоров возможно за счет перехода к оптическим технологиям вычисления, в том числе благодаря лазерному индуцированию фазоизменяемых материалов. Оптические синапсы технологически реализуются на оптических волокнах [10] или планарных волноводах [11], где основным принципом устройства является высокочастотная модуляция пропускной способности [12].

Одним из фазоизменяемых материалов для нейроморфных приложений являются теллуриды. В качестве примера мы выбрали хорошо изученное соединение теллурида германия GeTe. Из-за высокого поглощения в видимом диапазоне лазерное индуцирование тонких пленок GeTe возможно импульсными источниками с длиной волны в этой области. Длина волны модуляции 1550 нм обусловлена, во-первых, надежными технологическими решениями в С-диапазоне на основе оптоволоконных или планарных усилителей, а во-вторых, низким значением коэффициента экстинкции для аморфной пленки GeTe с увеличением этого значения на порядок (рис. 1) при переходе в кристаллическую фазу [13, 14]. Время изменения фазового состояния пленок GeTe толщиной до 100 нм при лазерном индуцировании составляет от 10 до 100 наносекунд [15, 16].

Измерение оптических свойств тонких пленок из фазоизменяемых материалов фотометрическими и эллипсометрическими методами [15] позволяет оптимизировать различные параметры многослойных структур с помощью программных методов расчета оптиче-

ских характеристик отражения, пропускания и поглощения. Исходными данными являются зависимости показателя преломления и коэффициента экстинкции от длины волны.

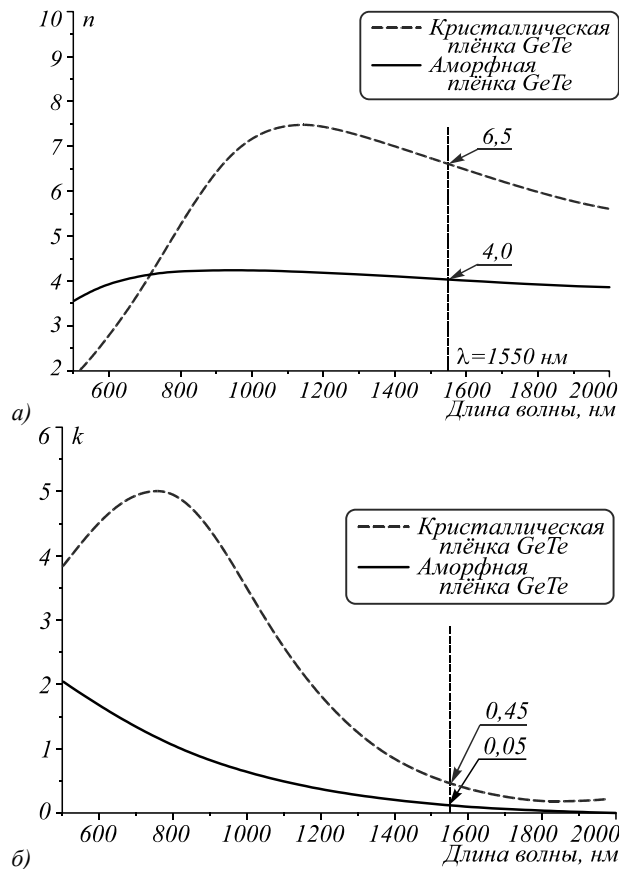


Рис. 1. Комплексный показатель преломления плёнки GeTe: показатель преломления (а), коэффициент экстинкции (б)

1. Моделирование

Расчет оптических характеристик многослойных структур производился матричным методом с учетом френелевских коэффициентов на границах тонких пленок и интерференции электромагнитных волн [18]. Исходными данными являются зависимости показателя преломления и коэффициента экстинкции от длины волны.

Показатель преломления пленки GeTe увеличивается с 4 до 6,5, а отражение на границах с волноводами из диоксида кремния (SiO₂) из-за разницы в показателях преломления может достигать пятидесяти процентов (рис. 2).

При переходе в кристаллическую фазу коэффициент экстинкции пленки GeTe увеличивается с 0,05 до 0,45, вследствие этого рассчитанные зависимости поглощения от толщины пленки в двух состояниях различаются значительно (рис. 3).

Для минимизации отражательной способности используют просветляющие слои материалов с промежуточным коэффициентом преломления. Такой подход позволит уменьшить требуемую плотность энергии иницирующего лазерного излучения и повысить

контраст уровней пропускания для модулируемого оптического сигнала. Материалом для эффективного просветления в С-диапазоне выбран сульфид цинка (ZnS) с показателем преломления, равным примерно 2,28, и высокой прозрачностью в видимом диапазоне.

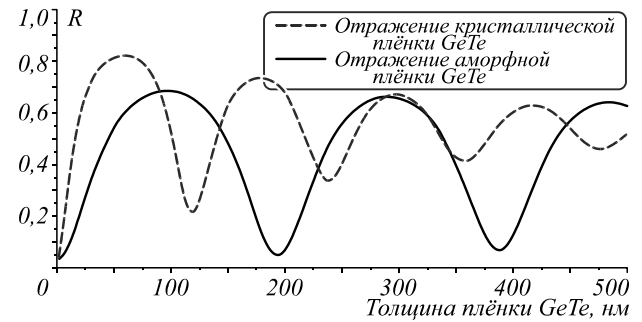


Рис. 2. Рассчитанная зависимость отражения R плёнки GeTe от толщины в аморфном и кристаллическом состояниях на основе коэффициента преломления

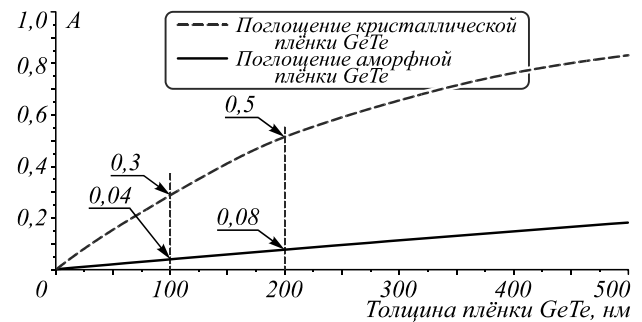


Рис. 3. Рассчитанная зависимость поглощения A плёнки GeTe от толщины в аморфном и кристаллическом состояниях на основе коэффициента экстинкции

Толщины пленок GeTe выбираются исходя из условий максимального просветления четвертьволновыми слоями сульфида цинка и расчетных коэффициентов поглощения кристаллической пленки. Первая структура с аморфной четвертьволновой пленкой, просветленной с двух сторон, обеспечивает пропускание в 95 %. При переходе в кристаллическое состояние поглощение увеличивается, а пропускание снижается до 65 % (рис. 4а). Вторая структура с аморфной полуволновой пленкой GeTe пропускает 90 %, но при фазовом переходе поглощение увеличивается еще больше и пропускание снижается до 42 % (рис. 4б).

За счет комбинации таких структур и лазерной индукции отдельных пленок GeTe можно получить четыре контрастных уровня пропускания (рис. 5). Под контрастными уровнями пропускания понимаются уровни, различающиеся друг от друга не менее, чем на десять процентов. Такой подход обеспечит воспроизводимость значений коэффициента пропускания в заданном коридоре при многочисленных циклах записи весового коэффициента в искусственный оптический синапс.

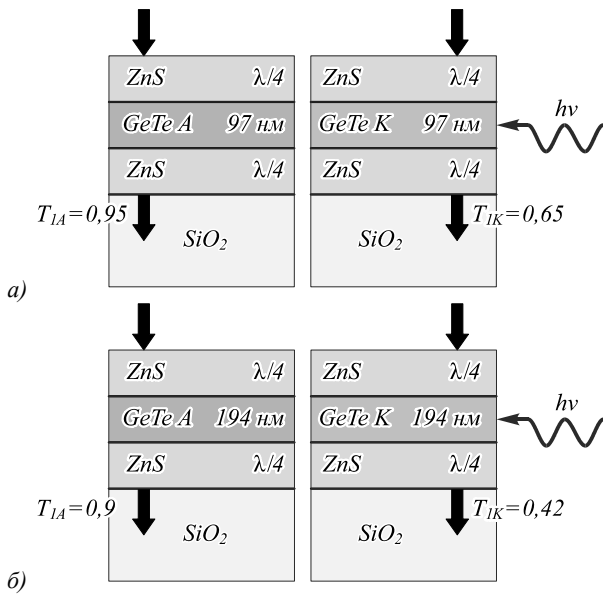


Рис. 4. Четыре рассчитанные структуры с изменяемым коэффициентом пропускания T , где GeTe A – аморфная пленка, GeTe K – кристаллическая плёнка; четвертьволновая плёнка GeTe (а), полуволновая плёнка GeTe (б)

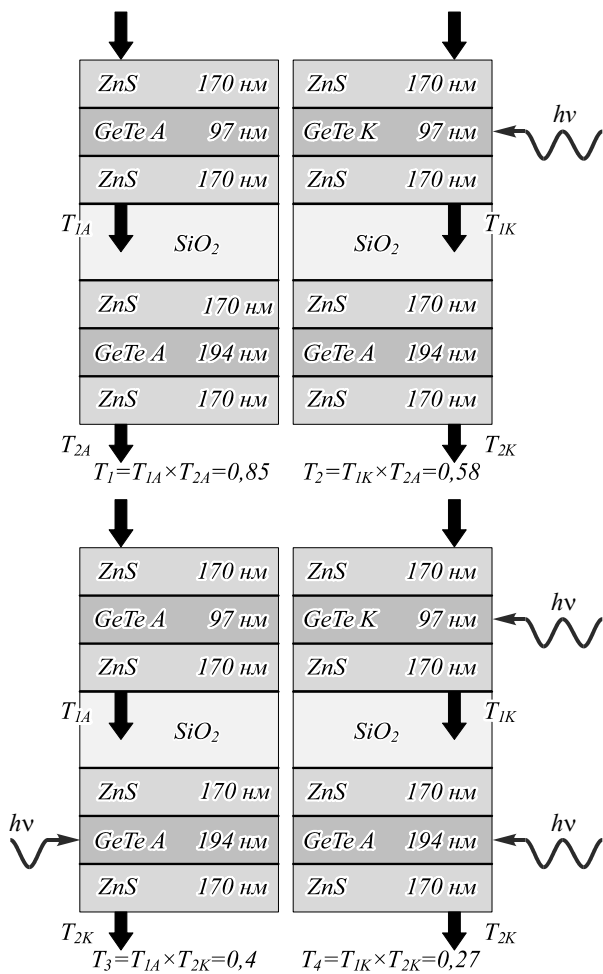


Рис. 5. Четыре рассчитанные конструкции с контрастным коэффициентом пропускания T , где GeTe A – аморфная плёнка, GeTe K – кристаллическая плёнка

2. Результаты и обсуждение

Методом испарения в вакууме при температуре 130 °С нами получены просветленные аморфные пленки GeTe на подложке SiO₂. Отдельные образцы нагревали в вакууме при температуре 300 °С в течение трех часов для получения опорной кристаллической фазы. Оптические характеристики полученных структур, измеренные на спектрофотометре, различаются для двух толщин пленок GeTe и их фазового состояния в соответствии с расчетом. Комбинации структур обеспечивают четыре контрастных уровня коэффициента пропускания (рис. 6).

Кристаллизация пленок GeTe при увеличении плотности энергии в импульсе происходит за меньшее количество импульсов. Для воспроизводимости уровней записи в искусственном синапсе требуется одноимпульсная обратимая модуляция (рис. 7). Дальнейшие исследования будут направлены на обеспечение одноимпульсной кристаллизации и аморфизации пленок фазоизменяемых материалов в многослойных структурах.

Подходы, предложенные нами в текущей работе, позволяют технологически реализовать двухбитный оптический синапс. Планируется увеличивать уровни записи с использованием известных оптических свойств тонких пленок перспективных фазоизменяемых материалов по данной методике.

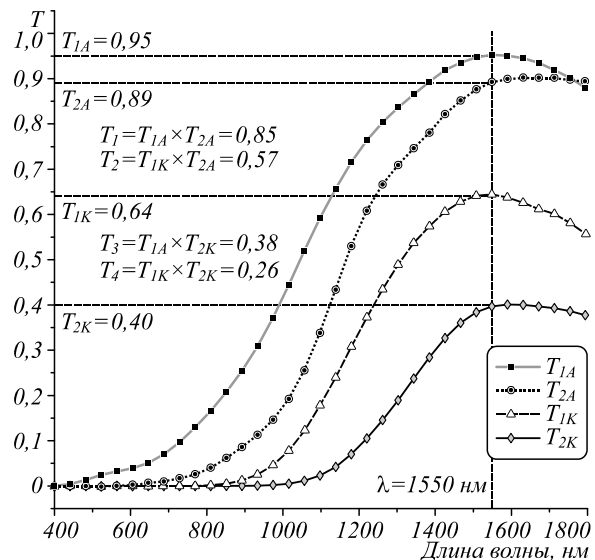


Рис. 6. Оптические характеристики изготовленных трёхслойных структур и соответствующие им уровни пропускания комбинаций этих структур

Заключение

Энергоэффективность, помехозащищенность, быстродействие, надежность и масштабируемость – основные качественные характеристики оптических синапсов, которые являются одним из основных элементов нейроморфных оптических систем. Для создания такого элемента необходимо обеспечить минимум потерь на отражение, контраст сигнала, высо-

кую скорость переключения при простой конструкции на основе проверенных технологий. В то же время технология энергонезависимой памяти уже позволяет создавать многоуровневые синапсы при изменении электропроводности фазоизменяемых материалов, однако исследование и разработка новых подходов проектирования и методов расчета параметров синапсopодобных элементов на основе многослойных структур, в которых тонкие пленки фазоизменяемых материалов изменяют свои оптические свойства при индуцировании лазерными импульсами, позволит качественно улучшить возможности нейроморфных систем для обучения искусственных нейронных сетей.

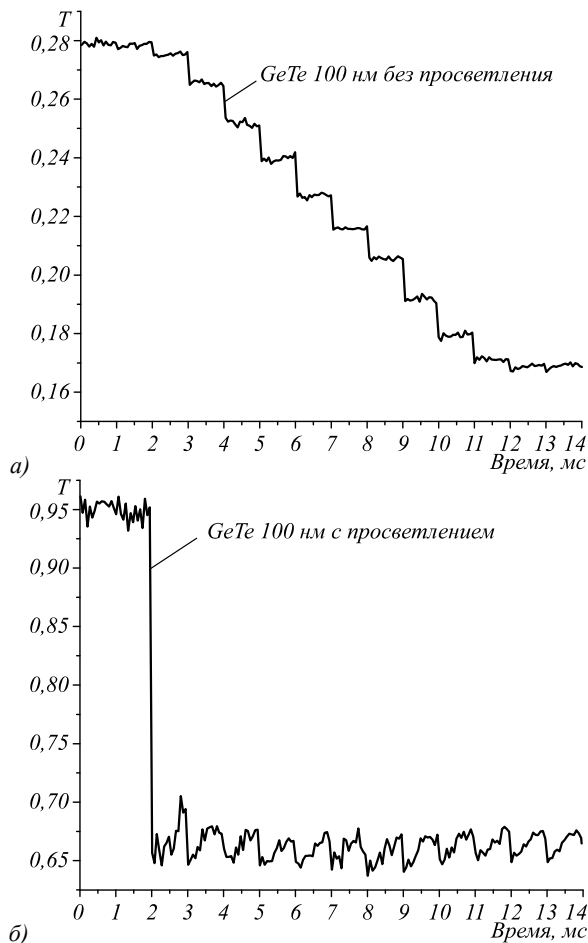


Рис. 7. Изменение коэффициента пропускания T при многоимпульсной (а) и одноимпульсной (б) кристаллизации

Благодарности

Работа поддержана грантом РФФИ №19-29-12024/19 в части синтеза тонких пленок с материалами с фазовым переходом, мегагрантом №075-15-2019-1950 Министерства науки и высшего образования России в части анализа основных свойств базовых элементов нейроморфных оптических систем и в рамках Государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части исследования оптических свойств многослойных структур.

References

- [1] Abbott LF, Regehr WG. Synaptic computation. *Nature* 2004; 431(7010): 796-803. DOI: 10.1038/nature03010.
- [2] Li X, Tang J, Zhang Q, Gao B, Yang JJ, Song S, Wu W, Zhang W, Yao P, Deng N, Deng L, Xie Y, Qian H, Wu H. Power-efficient neural network with artificial dendrites. *Nat Nanotechnol* 2020; 15(9): 776-782. DOI: 10.1038/s41565-020-0722-5.
- [3] Abawi S, Mohammed TA, Al-Zawi S. Understanding of a convolutional neural network. *2017 Int Conf on Engineering and Technology (ICET) 2017*: 1-6. DOI: 10.1109/ICEngTechnol.2017.8308186.
- [4] Gosh-Dastidar S, Adeli H. Spiking neural networks. *Int J Neural Syst* 2009; 19(4): 295-308. DOI: 10.1142/S0129065709002002.
- [5] Idiveri G, Linares-Barranco B, Legenstein R, Deligeorgis G, Prodromakis T. Integration of nanoscale memristor synapses in neuromorphic computing architectures. *Nanotechnology* 2013; 24(38): 384010. DOI: 10.1088/0957-4484/24/38/384010.
- [6] Merolla PA, Arthur JV, Alvarez-Icaza R, Cassidy AS, Sawada J, Akopyan F, Jackson BL, Imam N, Guo C, Nakamura Y, Brezzo B, Vo I, Esser SK, Appuswamy R, Taba B, Amir A, Flickner MD, Risk WP, Manohar R, Modha DS. A million spiking-neuron integrated circuit with a scalable communication network and interface. *Science* 2014; 345(6197): 668-673. DOI: 10.1126/science.1254642.
- [7] Ahmanathan A, Stanisavljevic M, Papandreu N, Pozidis H, Eleftheriou E. Multilevel-cell phase-change memory: A viable technology. *IEEE J Emerg Sel* 2016; 6(1): 87-100. DOI: 10.1109/JETCAS.2016.2528598.
- [8] Ambrogio S, Narayanan P, Tsai H, Shelby RM, Boybat I, di Nolfo C, Sidler S, Giordano M, Bodini M, Farinha NCP, Killeen B, Cheng C, Jaoudi Y, Burr GW. Equivalent-accuracy accelerated neural-network training using analogue memory. *Nature* 2018; 558(7708): 60-67. DOI: 10.1038/s41586-018-0180-5.
- [9] Amirsoleimani A, Alibart F, Yon V, Xu J, Pazhouhandeh MR, Ecoffey S, Beilliard Y, Genov R, Drouin D. In-memory vector-matrix multiplication in monolithic complementary metal-oxide-semiconductor-memristor integrated circuits: Design choices, challenges, and perspectives. *Advanced Intelligent Systems* 2020; 2(11): 2000115. DOI: 10.1002/aisy.202000115.
- [10] Gholipour B, Bastock P, Craig C, Khan K, Hewak D, Soci C. Amorphous metal-sulphide microfibers enable photonic synapses for brain-like computing. *Adv Opt Mater* 2015; 3(5): 635-641. DOI: 10.1002/adom.201400472.
- [11] Cheng Z, Rios C, Pernice WHP, Wright CD, Bhaskaran H. On-chip photonic synapse. *Sci Adv* 2017; 5(9): e1700160. DOI: 10.1126/sciadv.1700160.
- [12] Sun X, Lotnyk A, Ehrhardt M, Gerlach JW, Rauschenbach B. Realization of multilevel states in phase-change thin films by fast laser pulse irradiation. *Adv Opt Mater* 2017; 5(12): 1700169. DOI: 10.1002/adom.201700169.
- [13] Eliseev NN, Kiselev AV, Ionin VV, Mikhalevsky VA, Burtsev AA, Pankov MA, Karimov DN, Lotin AA. Wide range optical and electrical contrast modulation by laser-induced phase transitions in GeTe thin films. *Results Phys* 2020; 19: 103466. DOI: 10.1016/j.rinp.2020.103466.
- [14] Wuttig M, Bhaskaran H, Taubner T. Phase-change materials for non-volatile photonic applications. *Nat Photon* 2017; 11(8): 465-476. DOI: 10.1038/nphoton.2017.126.
- [15] Zhang W, Mazzarello R, Wuttig M, Ma E. Designing crystallization in phase-change materials for universal memory

- and neuro-inspired computing. *Nat Rev Mater* 2019; 4(3): 150-168. DOI: 10.1038/s41578-018-0076-x.
- [16] Ionin VV, Kiselev AV, Eliseev NN, Mikhalevsky VA, Pankov MA, Lotin AA. Multilevel reversible laser-induced phase transitions in GeTe thin films. *Appl Phys Lett* 2020; 117(1): 011901. DOI: 10.1063/5.0014375.
- [17] Gemo E, Kesava SV, De Galarreta CR, Trimby L, Carrillo SGC, Riede M, Baldycheva A, Alexeev A, Wright CD. Simple technique for determining the refractive index of phase-change materials using near-infrared reflectometry. *Opt Mater Express* 2020; 10(7): 1675-1686. DOI: 10.1364/OME.395353.
- [18] Arakelyan SM, Butkovskiy OY, Burtsev AA, Lysenko SL, Pankov MA, Pritotskiy EM, Pritotskaya AP. Modeling of sizes of coefficients of reflection and transmission for multilayered coatings [In Russian]. *Computational Nanotechnology* 2017; 4: 14-20.

Сведения об авторах

Притоцкий Егор Михайлович, 1991 года рождения, в 2016 году окончил Владимирский государственный университет по направлению «Лазерная техника и лазерные технологии» и аспирантуру по направлению «Физика и астрономия» с направленностью «Лазерная физика» в 2020 году. Работает научным сотрудником лаборатории нейроморфных оптических систем в Институте проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиале ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: многослойная оптика, лазерная физика. E-mail: pritotsky@bk.ru. ORCID: 0000-0002-7769-5205

Притоцкая Анастасия Павловна, 1991 года рождения, в 2015 году окончила Владимирский государственный университет по направлению «Опготехника» со специализацией «Лазерная техника» и аспирантуру по направлению «Физика и астрономия» с направленностью «Лазерная физика» в 2019 году. Область научных интересов: оптическая и лазерная керамика, лазерная физика. E-mail: pritotskaya@bk.ru. ORCID: 0000-0002-1706-5586

Панков Михаил Александрович, 1979 года рождения, в 2002 году окончил Владимирский государственный университет по специальности «Радиотехника» и в 2012 году защитил диссертацию на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности «Физика конденсированного состояния». Работает старшим научным сотрудником лаборатории нанофотоники и наноплазмоники в Институте проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиале ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: лазерная физика, оптическая и лазерная керамика, тонкие пленки и поверхность. E-mail: mpa.off@gmail.com. ORCID: 0000-0002-3735-7578

ГРНТИ: 28.23.33

Поступила в редакцию 27 июня 2021 г. Окончательный вариант – 31 июля 2021 г.

Model of a multilayer coating for an artificial optical synapse

E.M. Pritotskii¹, A.P. Pritotskaya¹, M.A. Pankov¹

*¹Institute on Laser and Information Technologies of Russian Academy of Sciences –
Branch of the FSRC «Crystallography and Photonics» RAS,
140700, Russia, Shatura, Svyatoozerskaya, 1*

Abstract

Optical characteristics of germanium telluride (GeTe) thin films in multilayer structures are calculated. A model of a multilayer optical coating with a four-level transmission coefficient is developed. Based on the calculated data, thickness values are determined at which the transmittance change is greatest for 1550-nm modulated optical radiation. Experimental samples coated with antireflection GeTe films are synthesized and their optical transmission characteristics are investigated. Combinations of parameters of the multilayer structures for the implementation of contrast transmittance levels are determined. The results of the study represent the implementation of a multilevel artificial optical synapse for neuromorphic processors.

Keywords: multilayer coating, phase-change material, optical synapse, neuromorphic processor.

Citation: Pritotskii EM, Pritotskaya AP, Pankov MA. Model of a multilayer coating for an artificial optical synapse. *Computer Optics* 2022; 46(2): 214-218. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1002.

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research under RFBR grant No.19-29-12024/19 (Synthesis of thin films with phase change materials), the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under grant No. 075-15-2019-1950 (Analysis of main properties of basic elements for neuromorphic optical systems), and a government project of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS (Study of optical properties of the multilayer structures).

Authors' information

Egor Mikhailovich Pritotskii (b. 1991) graduated from Vladimir State University in 2016 with a degree in Laser Engineering and Laser Technologies and postgraduate in Physics and Astronomy with a direction in Laser Physics in 2020. Currently he works as a researcher of laboratory of neuromorphic optical systems at the Institute on Laser and Information Technologies of Russian Academy of Sciences–Branch of the FSRC «Crystallography and Photonics» RAS. Research interests are multilayer optics and laser physics. E-mail: pritsky@bk.ru. ORCID: 0000-0002-7769-5205

Anastasia Pavlovna Pritotskaya (b. 1991) graduated from Vladimir State University in 2015 with a degree in Optical Engineering with a specialization in Laser Engineering and a postgraduate degree in Physics and Astronomy with a specialization in Laser Physics in 2019. Research interests: optical and laser ceramics, laser physics. E-mail: pritskaya@bk.ru. ORCID: 0000-0002-1706-5586

Mikhail Aleksandrovich Pankov (b. 1979) graduated from Vladimir State University in 2002 with a degree in Radio Engineering and defended PhD in Condensed Matter Physics in 2012. Currently he works as a senior researcher at the laboratory of nanophotonics and nanoplasmonics at the Institute on Laser and Information Technologies of Russian Academy of Sciences–Branch of the FSRC «Crystallography and Photonics» RAS. Research interests: laser physics, optical and laser ceramics, thin films and surfaces. E-mail: mpa.off@gmail.com. ORCID: 0000-0002-3735-7578

Received June 27, 2021. The final version – July 31, 2021.
