

Влияние степени кристалличности на дисперсию оптических параметров тонких пленок фазовой памяти $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$

*М.Е. Федянина¹, П.И. Лазаренко¹, Ю.В. Воробьев², С.А. Козюхин³,
А.А. Дедкова⁴, А.О. Якубов¹, В.С. Левицкий⁵, И.В. Сагунова¹, А.А. Шерченков¹*

¹Национальный исследовательский университет МИЭТ,
г. Москва, Россия

²Рязанский государственный радиотехнический университет,
г. Рязань, Россия

³Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова
Российской академии наук, г. Москва, Россия

⁴ЦКП «Микросистемная техника и электронная компонентная
база» МИЭТ, г. Москва, Россия

⁵ООО «НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике»,
г. Санкт-Петербург, Россия

fedyanina.m@org.miet.ru

Активное исследование материала $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ связано с возможностью создания многоуровневых энергонезависимых элементов для быстродействующих интегрально-оптических функциональных схем. Принцип многоуровневой записи в данных устройствах основан на формировании областей в тонких пленках $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ с частичной кристаллизацией и существенно различающимися оптическими свойствами. Для прогнозирования параметров инициирующего фазовые превращения воздействия и надежного обеспечения обратимого перехода между множеством логических состояний необходима достоверная информация об оптических характеристиках тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ в состояниях с разной степенью кристалличности и условиях их получения. В работе исследовано влияние фазового состояния пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ на коэффициент экстинкции и показатель преломления, изучено изменение значений оптической ширины запрещенной зоны в зависимости от температуры термообработки. Образцы тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ исследованы методами атомно-силовой микроскопии, рентгенофазового анализа и энергодисперсионного микроанализа для определения их толщины, морфологии, фазового состояния и состава. С помощью метода спектральной эллипсометрии получены спектры эллипсометрических углов ψ и Δ (амплитудной и фазовой составляющих световой волны) и

определены значения коэффициента экстинкции и показателя преломления. Рассмотрено влияние слоевых и математических моделей на расчет дисперсий оптических параметров пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$. Установлено существенное увеличение значений коэффициента экстинкции и показателя преломления на длине волны излучения 1550 нм при термообработке выше 200 °С. Показано, что оптическая ширина запрещенной зоны тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ в аморфном состоянии равна 0,71 эВ, а в кристаллическом – 0,47 эВ. Выяснено, что зависимости показателя преломления, коэффициента экстинкции и оптической ширины запрещенной зоны от степени кристалличности пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ близки к линейным.

Ключевые слова: многоуровневые устройства; нанофотоника; фазовая память; тонкие пленки; $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$; эллипсометрия; показатель преломления; коэффициент экстинкции; оптическая ширина запрещенной зоны; кристаллизация; степень кристалличности

Для цитирования: Влияние степени кристалличности на дисперсию оптических параметров тонких пленок фазовой памяти $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ / М.Е. Федянина, П.И. Лазаренко, Ю.В. Воробьев и др. // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 3. С. 203–218. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-3-203-218

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-07-01092), гранта Президента РФ (тема № МК-6347.2018.3, Соглашение 075-02-2018-16) с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования РГРТУ, ЦКП «Диагностика и модификация микроструктур и нанообъектов» и ЦКП «Микросистемная техника и электронная компонентная база» МИЭТ при поддержке Минобрнауки России.

Influence of Crystallization Degree on the Optical Parameters Dispersion of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ Thin Films for Phase-Change Memory

M.E. Fedyanina¹, P.I. Lazarenko¹, Yu.V. Vorobyev², S.A. Kozyukhin³,
A. A. Dedkova⁴, A.O. Yakubov¹, V.S. Levitskii⁵, I.V. Sagunova¹, A. A. Sherchenkov¹

¹National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

²Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Russia

³Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁴Science-Technology Center «Microsystem Engineering and Electronic Component Base» National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

⁵R&D Center of Thin Film Technologies in Energetics, St. Petersburg, Russia

fedyanina.m@org.miet.ru

Abstract: Active research of the $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ material (GST225) is connected with the possibility of creating multi-level non-volatile elements for high-speed integrated optical functional circuits. The principle of multi-level recording in these devices is based on the formation of regions in $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ thin films with partial crystallization and significantly different optical properties. To predict the pa-

rameters of the effect that initiates phase transformations and reliably ensure a reversible transition between a set of logical states, it is necessary to have reliable information about the optical characteristics of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ thin films in states with different degrees of crystallization and the conditions for their production. Thereby, the purpose of this research was to determine the influence of phase state $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ films on the extinction coefficient (k) and refractive index (n) and study changes in the values of optical band gap depending on the annealing temperature have been considered. The obtained samples of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ thin films were examined using atomic force microscopy, X-ray phase analysis, and energy dispersion X-ray phase analysis, and energy-dispersive microanalysis to determine the film thickness, morphology, phase state, and composition of the films. The ellipsometry method was used to obtain the spectra of ellipsometric angles ψ and Δ (the amplitude and phase components of light wave) and the parameters n and k were determined. The influence of layer and mathematical models on the calculation dispersion of optical parameters of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ films, have been considered. It was found a significant increase in the values of n and k on the wavelength of 1550 nm when annealing above 200 °C has been found. It has been shown that in the amorphous state, $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ thin films have an optical band gap (E_g^{opt}) equal to 0,71 eV, and in the crystalline ($E_g^{\text{opt}} = 0,47$ eV. It was determined that the dependences of the refractive index, extinction coefficient, and optical band gap on the degree of crystallization of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ thin films are close to linear.

Keywords: multilevel devices; nanophotonics; phase-change memory; thin films; $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$; ellipsometry; refractive index; extinction coefficient; optical band gap; degree of crystallization

For citation: Fedyanina M.E., Lazarenko P.I., Vorobyev Yu.V., Kozyukhin S.A., Dedkova A.A., Yakubov A.O., Levitskii V.S., Sagunova I.V., Sherchenkov A.A. Influence of Crystallization Degree on the Optical Parameters Dispersion of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ Thin Films for Phase-Change Memory. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 3, pp. 203–218. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-3-203-218

Funding: This study has been supported by the Russian Foundation for basic Research (project № 20-07-01092), the Russian Federation President's grant (subject № МК-6347.2018.3, Agreement 075-02-2018-16). The studies have been performed using equipment of Regional Center of Probe Microscopy of RSREU and Core facilities centers «Diagnostics and Modification of Microstructures and Nanoobjets», «MEMS and Electronic Components», and «STI Sensory» of MIET with the support of the Ministry of Education and Science of Russia.

Введение. Энергонезависимые электрические запоминающие устройства фазовой памяти (Phase Change Memory, PCM) на основе халькогенидных полупроводниковых соединений системы Ge–Sb–Te в течение последних пяти лет успешно применяются в качестве памяти класса Storage-Class Memory (SCM) [1]. Устройства электрической PCM, изготавливаемые компанией Intel на основе материала системы Ge–Sb–Te по технологии 3D-Xpoint, Intel Optane, характеризуются в 1000 раз более высоким быстродействием по сравнению с флэш-памятью NAND [2] и в 4,5 раз более высокой плотностью записи информации по сравнению с DRAM, изготовленными по 20-нм технологии.

При переходе от аморфного состояния к кристаллическому под действием импульсов лазерного излучения [3] или тока [4] наблюдается существенное изменение оптических свойств тонких пленок Ge–Sb–Te. Возможность формирования промежуточных состояний с частичной кристаллизацией [5] открывает широкие перспективы для создания многоуров-

невых (Multi Level Cell, MLC) энергонезависимых элементов быстродействующих интегрально-оптических функциональных схем, позволяющих записывать более двух логических состояний [6]. Разработка энергонезависимых элементов нанофотоники с возможностью многоуровневого изменения параметров оптического сигнала имеет важное прикладное значение для дальнейшего развития нанофотоники и интегральной оптики, а также для создания более эффективных вычислительных нейронных сетей [7].

Принцип работы многоуровневых реконфигурируемых РСМ-устройств нанофотоники основан на процессах кристаллизации и аморфизации и, соответственно, разном соотношении двух фаз для функциональных областей тонких пленок материалов системы Ge–Sb–Te. Инициация данных процессов может быть осуществлена температурным воздействием [8], лазерным излучением [3] или электрическим током [4]. Варьируя параметры иницирующего воздействия, в функциональной области можно сформировать полностью аморфное и полностью кристаллическое (ГЦК и ГПУ) состояния, а также состояния, характеризующиеся различным объемом аморфизованного и закристаллизованного материала (частичная кристаллизация). Именно возможность формировать в пленках $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ состояния с различной степенью кристалличности и значительный контраст оптических свойств между ними позволяют обеспечить многоуровневость с приемлемым соотношением сигнал/шум. В настоящее время продемонстрирована принципиальная возможность создания работоспособного 5-битного энергонезависимого элемента полностью оптической памяти, сохраняющего более 34 энергонезависимых состояний в одной ячейке [9].

При создании многоуровневых элементов памяти возникает ряд нерешенных проблем. Большинство исследователей изучают оптические свойства полностью аморфных или кристаллических пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, которые определяют значения максимально достижимого оптического контраста [10, 11]. Анализ результатов, полученных методами спектрофотометрии [12] и эллисометрии (рис.1) для аморфных и кристаллических образцов, выявил существенный разброс данных. Причинами такого разброса могут являться особенности получения пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, используемые режимы кристаллизации, а также применение различных подходов и моделей на этапе обработки экспериментальных результатов, например моделей дисперсии оптических постоянных Тауца – Лоренца [13, 14], Коши [15], Коши – Лоренца [16].

Для прогнозирования параметров воздействия, иницирующего фазовые превращения, и надежного обеспечения обратимого перехода между множеством логических состояний необходимо иметь достоверную и надежную информацию об оптических параметрах пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ в состояниях с различной степенью кристалличности и условиях их получения. При этом измерения следует проводить в одинаковых условиях, что позволит исключить дополнительные погрешности, например из-за проявления термооптического эффекта [17].

В работе [12] представлены результаты исследования оптических свойств частично закристаллизованных пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ методом спектрофотометрии. Метод эллисометрии позволяет определить эллисометрические углы ψ и Δ , описывающие эллиптическую поляризацию света, отраженного от интерфейсов многослойного образца. Далее с использованием соответствующей модели можно оперативно и с высокой чувствительностью к особенностям поверхности определить оптические параметры (показатель преломления и коэффициент экстинкции) тонких пленок, сформированных на непрозрачных подложках. Метод обеспечивает более высокую точность по сравнению со спектрофотометрическими методами, так как нет необходимости измерять коэффициенты пропускания и отражения имеющих сильное поглощение тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$.

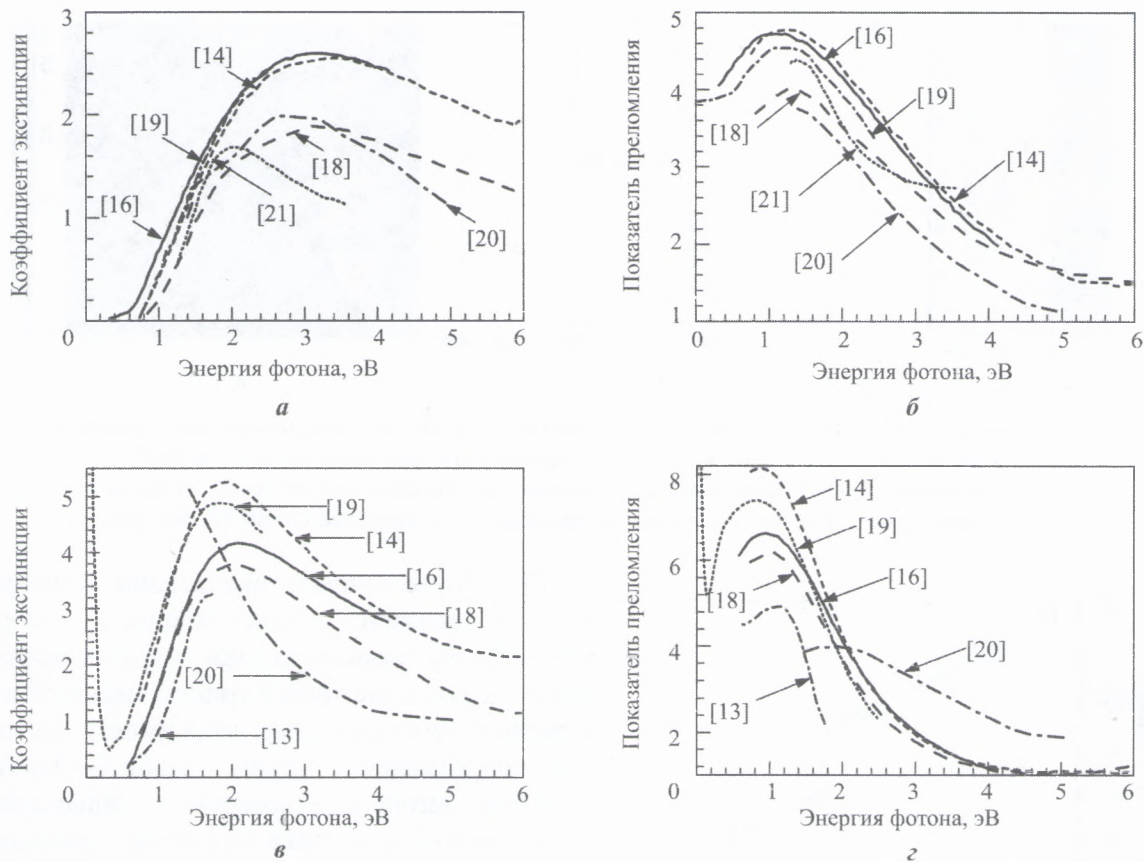


Рис. 1. Спектральные зависимости коэффициента экстинкции и показателя преломления для аморфных (а, б) и кристаллических (в, г) пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ [13, 14, 16, 18–21]
 Fig. 1. Spectra of the extinction coefficient and refractive index for the amorphous (a, b) and crystalline (c, d) $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ thin films [13, 14, 16, 18–21]

Цель настоящей работы – исследование оптических свойств аморфных, частично закристаллизованных и кристаллических тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ с применением метода эллипсометрии.

Методика эксперимента. Исследовались тонкие пленки $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, сформированные методом магнетронного распыления поликристаллической мишени. Давление аргона во время нанесения составляло $5,7 \cdot 10^{-1}$ Па, мощность – 100 Вт. В качестве подложек использовались кремниевые пластины КДБ-12.

Контроль исходных образцов тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ с применением атомно-силового микроскопа (АСМ) Solver P47-Pro выявил следующее: толщина всех исследуемых пленок составляет ~101 нм, значение средней арифметической шероховатости не превышает 1 нм (рис.2). По результатам исследований на просвечивающем электронном микроскопе FEI Titan Themis 200-80 с использованием приставки для проведения энергодисперсионного микроанализа установлено, что осажденные пленки имеют равномерное распределение состава по толщине, близкое к распределению в пленках $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$. Структура пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ исследовалась методом рентгенофазового анализа (Rigaku SmartLab). Для рентгенограмм исходных аморфных пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ характерно наличие аморфного гало, что свидетельствует о некристаллической фазе пленок. При этом термообработка тонких пленок при температуре 250 °С приводит к появлению рефлексов, положение которых характерно для пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ с кубической кристаллической структурой типа NaCl.

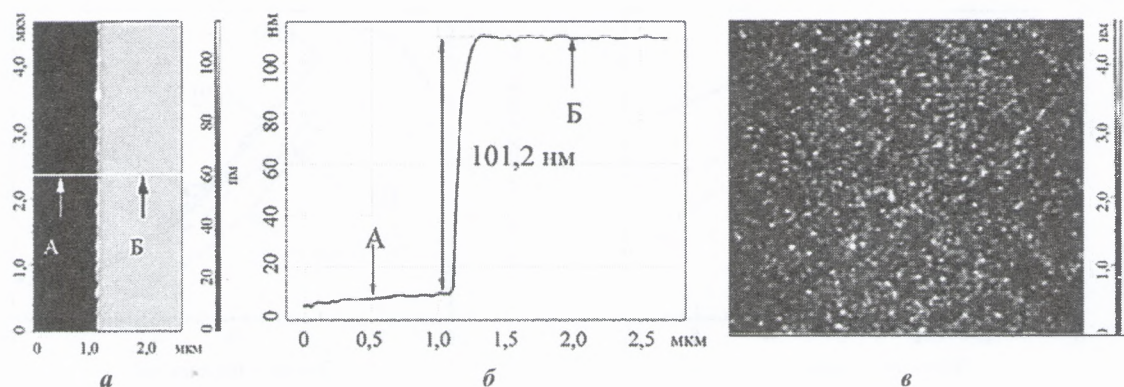


Рис.2. Результаты АСМ: изображение ступенчатой поверхности (а), профиль сечения ступеньки с указанием толщины (б), морфология поверхности (в) исходной пленки $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$

Fig.2. The results of AFM: images of the step surface (a), the cross-section profile of the step with indicating the thickness (b), surface morphology (c) as-deposited $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ thin film

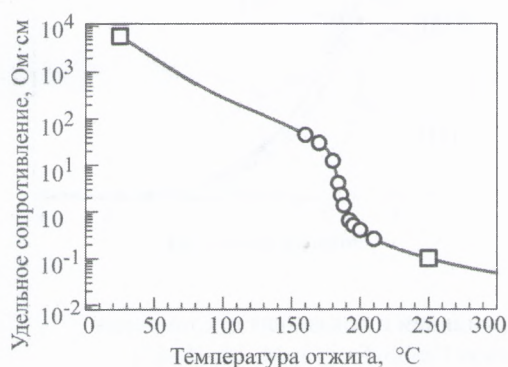


Рис.3. Температурная зависимость удельного сопротивления тонкой пленки $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (□, ○ – значения выбранной температуры термообработки для исследования оптических свойств)

Fig.3. Temperature dependence of resistivity for $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ thin film (□, ○ – annealing temperatures used for optical measurements)

выбраны 11 значений температуры термообработки образцов (см. рис.3). Термообработка заключалась в нагреве образцов до одного из значений выбранной температуры и последующем охлаждении в потоке аргона со скоростью изменения температуры $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$. Выдержка при достижении максимальной температуры не проводилась.

Спектральные зависимости эллипсометрических параметров I_s и I_c , определяющих характеристики световой волны после отражения от образца, измерялись на спектральном эллипсометре Horiba Uvisel 2 в диапазоне длин волн $200\text{--}2100\text{ нм}$ с шагом изменения длины волны 5 нм и при углах наклона поляризатора и анализатора 70° . С использованием параметров I_s и I_c определены спектры значений эллипсометрических углов ψ и Δ , показатели преломления n , коэффициенты экстинкции k , значения оптической ширины запрещенной зоны $E_g^{\text{опт}}$ и толщины пленок. Управление работой эллипсометра во время измерений и последующее определение результатов путем моделирования проводилось с помощью программы DeltaPsi2 (Horiba).

Для более точного определения температурного диапазона кристаллизации и выбора температуры термообработки для формирования образцов с частичной кристаллизацией измерялись температурные зависимости удельного сопротивления тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ в потоке аргона с применением аппаратно-программного комплекса на основе термостоллика Linkam HFS600E-PB4. Измерения тока проводились при напряженности поля $0,77\text{ В}/\text{см}$ со скоростью $1\text{ точка}/\text{с}$ в диапазоне от комнатной температуры до $300\text{ }^\circ\text{C}$ со скоростью нагрева $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$. Из рис.3 видно, что фазовый переход из аморфного состояния в кристаллическое, сопровождающийся уменьшением удельного сопротивления тонкой пленки $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, происходит в диапазоне температур $170\text{--}200\text{ }^\circ\text{C}$. На основе полученных данных для дальнейших исследований

Результаты и их обсуждение. Спектральные зависимости эллипсометрических углов ψ и Δ получены для образцов в аморфном состоянии и после термообработки при выбранных температурах. В качестве примера на рис.4 представлены результаты измерения для исходного аморфного образца и образца, прошедшего термообработку при температуре 250 °С.

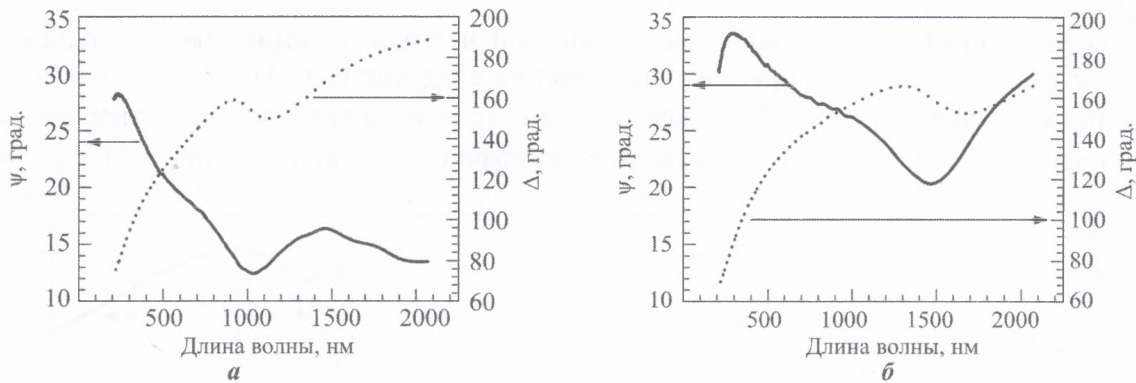


Рис.4. Спектральные зависимости эллипсометрических углов ψ и Δ для аморфного (а) и кристаллического (б) образцов

Fig.4. Spectra of ψ and Δ for amorphous (a) and crystalline (b) samples

Используя полученные эллипсометром спектральные характеристики и соответствующую модель дисперсии оптических постоянных, можно определить спектры комплексного показателя преломления и коэффициента экстинкции, рассчитать комплексную диэлектрическую функцию, а также оценить толщину слоев исследуемых образцов. Выбор моделей оптических постоянных разнообразен и зависит от типа материала, спектрального диапазона и т.д. Наиболее часто при интерпретации эллипсометрических измерений аморфных тонких пленок, в том числе пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, используются модели Тауца – Лоренца [13, 14] и Коди – Лоренца [16].

Модель Тауца – Лоренца разработана Джеллисоном и Модином на основе плотности состояний Тауца и осциллятора Лоренца [22]. Мнимая часть диэлектрической функции $\epsilon_2(E)$ в данной модели может быть определена с использованием следующего уравнения в случае, когда энергия фотонов E больше оптической ширины запрещенной зоны:

$$\epsilon_2(E) = T(E) L(E) = \frac{AE_0 C (E - E_g^{\text{опт}})^2}{(E^2 - E_0^2)^2 + C^2 E^2} \frac{1}{E}, \quad E > E_g^{\text{опт}}$$

В случае, когда $E < E_g^{\text{опт}}$, $\epsilon_2(E) = 0$.

Модель Коди – Лоренца предложена в работе Ферлауто [23]. Особенностью использования при расчете данной модели является учет энергии Урбаха, характеризующей протяженность плотности локализованных состояний хвостов в щели подвижности аморфного полупроводника. Функциональная форма модели определяется системой из двух уравнений:

$$\epsilon_2(E) = \frac{E_t G(E_t) L(E_t)}{E} \exp\left(\frac{E - E_t}{E_\mu}\right), \quad 0 < E \leq E_t,$$

$$\epsilon_2(E) = G(E) L(E) = \left[\frac{(E - E_g^{\text{опт}})^2}{(E - E_g^{\text{опт}})^2 + E_p^2} \right] \left[\frac{AE_0 \Gamma E}{(E^2 - E_0^2)^2 + \Gamma^2 E^2} \right], \quad E > E_t.$$

С помощью модели Коди – Лоренца можно получить семь параметров, в том числе энергию E_t , разделяющую преобладающий вклад поглощения на локализованных состояниях хвоста Урбаха при $0 < E < E_t$ и собственного поглощения, обусловленного межзонными переходами; энергию E_p , характеризующую переход от поглощения при $E < (E_p + E_g^{\text{опт}})$ к поглощению при $E > (E_p + E_g^{\text{опт}})$, которое описывается моделью Лоренца; энергию Урбаха E_μ .

На рис.5 представлены зависимости мнимой части диэлектрической функции от энергии фотона и пояснен принцип определения следующих параметров: оптической ширины запрещенной зоны $E_g^{\text{опт}}$; максимума интенсивности поглощения A ; энергии, характеризующей пик плотности состояний E_0 ; коэффициента уширения пика C [24].

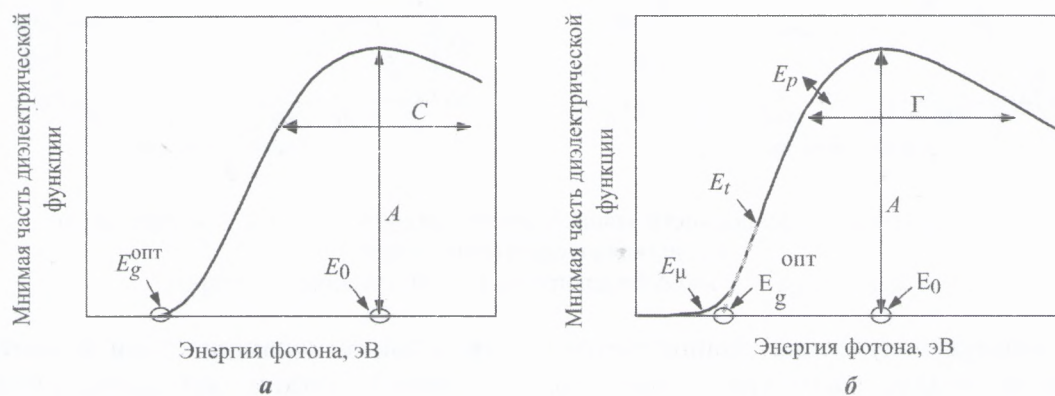


Рис.5. Схематические изображения принципа определения параметров моделей Тауца – Лоренца (а) и Коди – Лоренца (б)

Fig.5. Schematic representation of the determination of parameters for the Tauc – Lorentz (a) and Cody – Lorentz (b) models

Существенное влияние на результаты помимо математической модели оказывает слоевая модель образца. Наиболее простым случаем является применение двухслойной модели I, состоящей из Si^* -подложки и исследуемой тонкой пленки $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$. Однако эта модель не учитывает прилегающие слои, например образующиеся на воздухе оксиды, а также принимает поверхность пленки идеально ровной. В связи с этим проведено сравнение нескольких слоевых моделей для оценки влияния отдельных слоев на результат моделирования. В модели II учитывается наличие на поверхности тонкой пленки $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ слоя, характеризующего шероховатость. Данный слой задается как смесь воздуха и материала $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ в соотношении 1:1. В модели III поверхность пленки $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ принимается идеально ровной, но при этом учитывается наличие естественного оксидного слоя кремния между пленкой $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ и Si^* -подложкой. Модель IV учитывает все перечисленные слои, а именно: $\text{Si}^* / \text{SiO}_x / \text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5 / \text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ и воздух (1:1).

С применением описанных слоевых моделей и модели Тауца – Лоренца получены зависимости, представленные на рис.6,а, и выходные параметры моделирования (табл.1).

На результаты моделирования оказывает существенное влияние слоевая модель, в особенности использование поверхностного слоя пленки $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ с воздухом (1:1). Рассчитанные дисперсии оптических параметров можно условно разделить на две группы: учитывающие (модели I и III) и не учитывающие (модели II и IV) слой, отвечающий за шероховатость. Различие наблюдается как в дисперсиях оптических параметров, так и в выходных параметрах моделирования. Например, оптическая ширина запрещен-

ной зоны для пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ может отличаться более чем на 15 % (см. табл.1). Для проведения дальнейших расчетов выбрана модель IV, как наиболее близкая к результатам, полученным другими методами, например с помощью спектрофотометрии [12].

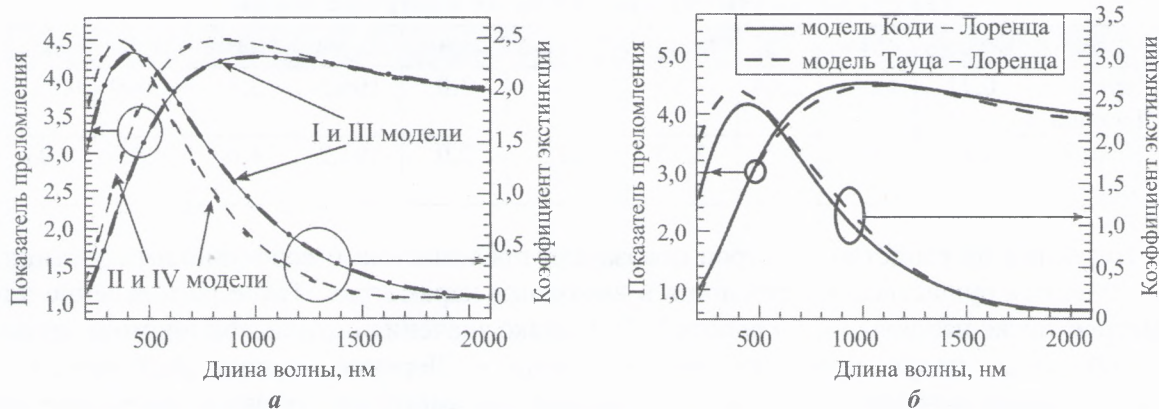


Рис.6. Зависимости показателя преломления и коэффициента экстинкции от длины волны для слоевых (а) и математических (б) моделей

Fig.6. Dependences of refractive index and extinction coefficient on the wavelength for the different layer (a) and mathematical (b) models

Таблица 1

Сравнение выходных параметров для различных слоевых моделей

Table 1

Comparison of simulation output parameters obtained by different layer models

Модель	$E_g^{\text{опт}}$, эВ	A	C	E_0 , эВ	h_1 , нм	h_2 , нм	h_3 , нм	n_{1550}	k_{1550}
I	0,58	97,4	3,80	2,46	—	104,1	—	4,075	0,181
II	0,73	127,0	4,10	2,74	—	104,0	4,6	4,053	0,018
III	0,57	96,5	3,82	2,47	2,6	105,6	—	4,078	0,188
IV	0,71	120,6	2,64	3,95	3,0	106,5	3,5	4,049	0,031

Примечание: h_1 , h_2 и h_3 – толщина слоев SiO_x , $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ и $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ с воздухом (1:1) соответственно; k_{1550} и n_{1550} – коэффициент экстинкции и показатель преломления, полученные для длины волны излучения 1550 нм.

Следует отметить, что наблюдается различие между значением толщины слоя $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ с воздухом (1:1), полученным в результате моделирования по данным эллипсометрии с применением модели IV, и значением шероховатости пленки, измеренным методом атомно-силовой микроскопии (менее 1 нм). Данный факт обусловлен применением различных по физической природе методов измерения, а также дополнительным вкладом в результаты моделирования естественного оксидного слоя на поверхности пленки $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, толщина которого, согласно результатам вторичной ионной масс-спектрометрии [25] и спектроскопии низкоэнергетического ионного рассеяния [26], составляет ~ 5 нм.

На рис.6,б представлены результаты, полученные для исходных аморфных тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ с применением моделей Тауца – Лоренца и Коди – Лоренца. Для показателя преломления значения практически совпадают, имеются небольшие расхождения вблизи пиковых значений и при больших длинах волн. Однако для коэффициента экстинкции наблюдается более существенное расхождение в значениях на длинах волн менее 500 нм. Модель Тауца – Лоренца показывает более линейное изменение коэффициента экстинкции в диапазоне 600–1300 нм. В табл.2 представлены выходные параметры моделирования с применением моделей Тауца – Лоренца и Коди – Лоренца для аморфного образца.

Таблица 2

Выходные параметры моделирования, полученные для аморфного образца

Table 2

The output parameters obtained for an amorphous sample

Модель	E_g^{opt} , эВ	A	C/Γ	E_0 , эВ	E_μ , мэВ	h_1 , нм	h_2 , нм	h_3 , нм	n_{1550}	k_{1550}
Тауца – Лоренца	0,71	120,6	2,64	3,95	–	3,0	106,5	3,5	4,049	0,031
Коди – Лоренца	0,77	108,8	6,73	3,37	142,5	2,0	103,2	6,0	4,03	0,03

Несмотря на сходство спектров показателя преломления и коэффициента экстинкции, имеются существенные различия в выходных параметрах. Такое расхождение параметров также наблюдалось в работе [23]. Однако значения оптической ширины запрещенной зоны, полученные для модели Тауца – Лоренца, лучше соотносятся с литературными данными, а также результатами для аморфного образца, полученными методом спектрофотометрии [12]. В связи с этим для дальнейших исследований используется модель Тауца – Лоренца.

На рис.7 представлены спектральные зависимости показателя преломления и коэффициента экстинкции, полученные для образцов с разной температурой термообработки (см. рис.2). В табл.3 приведены выходные параметры моделирования для аморфного образца пленки $Ge_2Sb_2Te_5$ и образцов, прошедших термообработку при различных температурах.

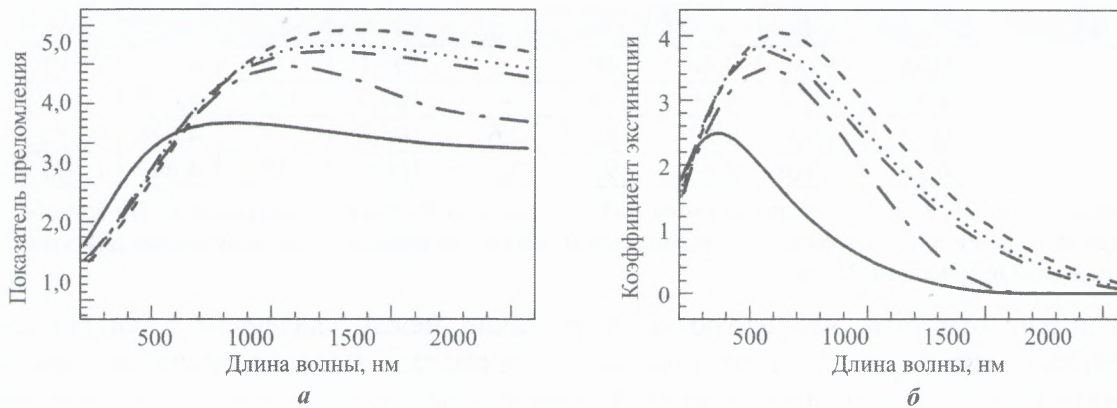


Рис.7. Спектры показателя преломления (а) и коэффициента экстинкции (б) для образцов пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ с разной температурой термообработки: — аморфный образец; — - 180 °С; -- 192 °С; ... 200 °С; --- 250 °С

Fig.7. Comparison of the spectra of refractive index (a) and extinction coefficient (b) for $Ge_2Sb_2Te_5$ film samples with different annealing temperature: — amorphous sample; — - 180 °С; -- 192 °С; ... 200 °С; --- 250 °С

Анализ полученных данных показывает, что термообработка при температуре выше 180 °С приводит к существенному увеличению значений показателя преломления и коэффициента экстинкции, а также смещению пиковых значений в область больших длин волн. При дальнейшем повышении температуры термообработки значения также увеличиваются, однако не так резко. Отметим, что полученные спектры для аморфных и полностью закристаллизованных образцов имеют схожие тенденции изменения оптических параметров показателя преломления и коэффициента экстинкции со спектрами, представленными на рис.1. При этом с повышением температуры термообработки зафиксировано уменьшение толщины h_2 тонкой пленки $Ge_2Sb_2Te_5$ с 106,5 до 98 нм (на 7,98%). Это может быть объясне-

но увеличением плотности материала при переходе из аморфного состояния ($5,87 \text{ г}\cdot\text{см}^3$) в кристаллическое состояние с кубической структурой типа NaCl ($6,33 \text{ г}\cdot\text{см}^3$) приблизительно на 7,27% [27].

Таблица 3

Выходные параметры моделирования, полученные для образцов после термообработки при разной температуре

Table 3

Simulation output parameters for the samples after annealing at different temperatures

$T, ^\circ\text{C}$	α	$E_g^{\text{опт}}, \text{эВ}$	A	$E_0, \text{эВ}$	C	$h_1, \text{нм}$	$h_2, \text{нм}$	$h_3, \text{нм}$
—	—	0,71	120,6	2,64	3,95	3,0	106,5	3,5
160	—	0,69	124,3	2,60	3,93	1,0	106,0	3,5
170	0	0,69	120,0	2,61	3,85	3,0	104,7	3,5
180	0,24	0,66	200,0	1,70	2,56	4,0	103,0	3,5
184	0,33	0,59	190,0	1,68	2,55	3,0	102,0	3,5
186	0,42	0,57	195,4	1,63	2,46	3,0	102,0	3,52
188	0,49	0,55	190,0	1,64	2,49	3,0	101,0	3,7
192	0,61	0,53	186,0	1,65	2,47	4,0	101,0	4,0
195	0,68	0,53	191,3	1,66	2,47	4,0	100,5	4,3
200	0,76	0,50	186,5	1,68	2,48	2,0	101,0	4,4
210	0,83	0,50	187,7	1,62	2,38	3,0	99,0	4,5
250	1,00	0,47	193,0	1,59	2,29	3,0	98,0	4,5

На рис.8 показано, как влияет температура термообработки на показатель преломления и коэффициент экстинкции тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ при телекоммуникационной длине волны, равной 1550 нм, а также на оптическую ширину запрещенной зоны.

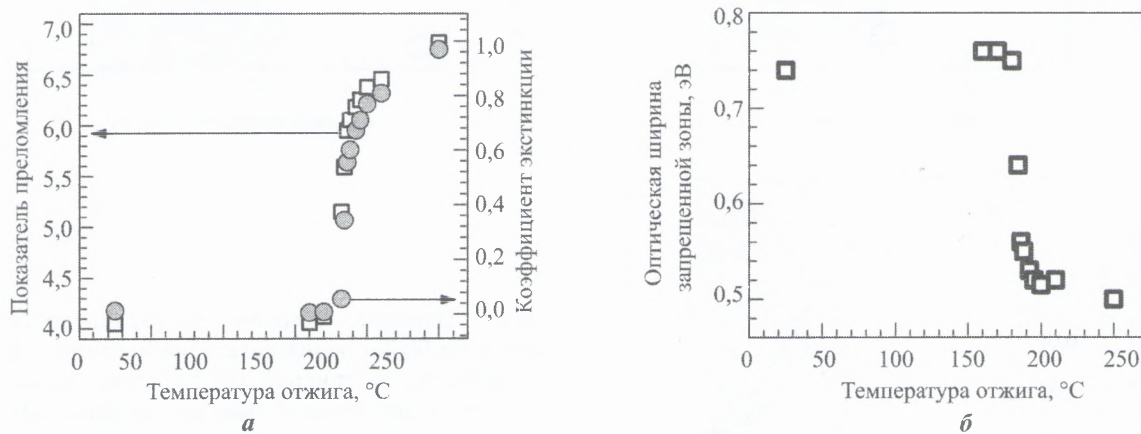


Рис.8. Влияние температуры термообработки на показатель преломления, коэффициент экстинкции пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ на длине волны 1550 нм (а) и оптическую ширину запрещенной зоны (б)

Fig.8. Influence of annealing temperature on the refractive index, extinction coefficient of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ films at a wavelength of 1550 nm (a) and optical band gap (b)

Из рис.8,а видно, что термообработка приводит к заметному увеличению показателя преломления и коэффициента экстинкции. При этом в диапазоне температур 170–200 °С наблюдается резкое изменение оптических параметров, что связано с кристаллизацией тонкой пленки $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$. При термообработке выше 200 °С происходит дальнейшее увеличение значений, что может быть связано, в частности, с увеличением размера зерен поликристаллической структуры. На рис.8,б представлены результаты расчета оптической ширины запрещенной зоны. Диапазон фазового перехода соотно-

сится с зависимостями на рис.8,а. При этом уменьшение E_g^{opt} с 0,71 до 0,47 эВ наблюдается при нагреве образца от комнатной температуры до 250 °С.

Рассчитана степень кристалличности α [28] и оценено ее влияние на оптические параметры тонких пленок $Ge_2Sb_2Te_5$:

$$\alpha = \frac{\ln \sigma - \ln \sigma_a}{\ln \sigma_c - \ln \sigma_a},$$

где σ – проводимость исследуемой тонкой пленки; σ_a, σ_c – проводимость для 100 %-ного аморфного и 100 %-ного кристаллического состояния соответственно.

Для полностью аморфного состояния использовалась электропроводность при температуре начала фазового перехода, определенной по результатам измерения температурной зависимости удельного сопротивления с применением метода первой производной [29]. В качестве электропроводности полностью закристаллизованного материала выбрана величина, полученная для тонкой пленки при 250 °С. В результате степень кристалличности α , т.е. доля закристаллизовавшегося материала, изменяется от 0 (100 %-ное аморфное состояние) до 1 (100 %-ное кристаллическое состояние). Зависимости оптических параметров от степени кристалличности представлены на рис.9.

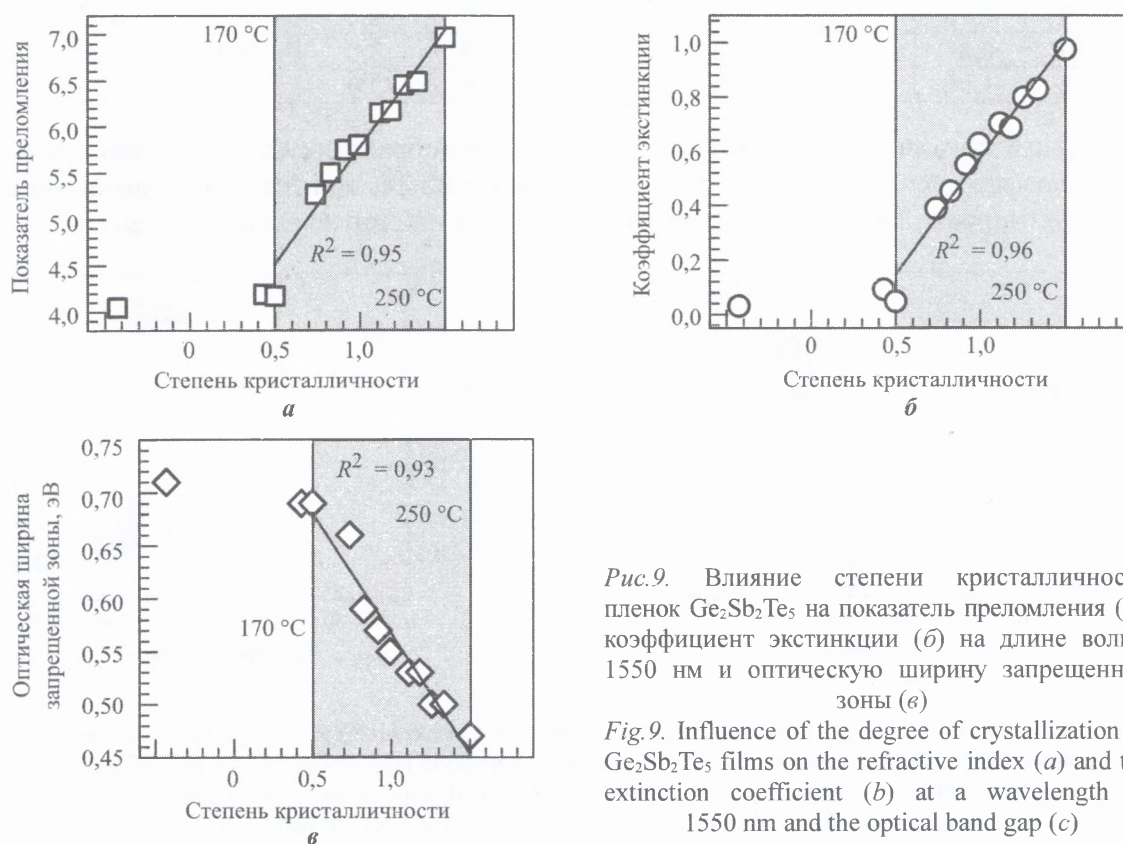


Рис.9. Влияние степени кристалличности пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ на показатель преломления (а), коэффициент экстинкции (б) на длине волны 1550 нм и оптическую ширину запрещенной зоны (в)

Fig.9. Influence of the degree of crystallization of $Ge_2Sb_2Te_5$ films on the refractive index (a) and the extinction coefficient (b) at a wavelength of 1550 nm and the optical band gap (c)

В пределах температурного диапазона кристаллизации слоя $Ge_2Sb_2Te_5$ от 170 до 250 °С зависимости показателя преломления и коэффициента экстинкции от степени кристалличности близки к линейным. Данный результат коррелирует с зависимостью оптической ширины запрещенной зоны от степени кристалличности, близкой к линейной. Полученные результаты показывают, что степень кристалличности пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ влияет на их оптические свойства посредством изменения оптической ширины запре-

щенной зоны. Такая линейная взаимосвязь оптических свойств и степени кристалличности с учетом существенного изменения оптических свойств при фазовом переходе позволит надежно фиксировать промежуточные состояния в ячейках фазовой памяти.

Заключение. Исследование методом эллипсометрии оптических свойств тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, подверженных термообработке при разной температуре, показало следующее.

На определяемые оптические параметры и дисперсию оказывает влияние применение разных слоевых и математических моделей. При фазовом переходе существенно увеличиваются значения показателя преломления и коэффициента экстинкции. Оптическая ширина запрещенной зоны уменьшается с 0,71 до 0,47 эВ при переходе от аморфного состояния к кристаллическому. Зависимости показателя преломления, коэффициента экстинкции и оптической ширины запрещенной зоны от степени кристалличности пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ близки к линейным.

Литература

1. 3D Cross-point phase change memory for storage-class memory / *H.-Yu Cheng, F. Carta, W.C. Chien et al.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2019. Vol. 52. No. 47. P. 473002-1–473002-89.
2. Intel and micron produce breakthrough memory technology: URL: <https://newsroom.intel.com/news-releases/intel-and-micron-produce-breakthrough-memory-technology/#gs.vj10lb> (дата обращения 10.02.2020).
3. Isothermal and CW laser crystallization of amorphous $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ thin films / *S. Kozyukhin, Yu. Vorobyov, P. Lazarenko et al.* // Non-Crystalline Solids. 2018. Vol. 480. P. 51–56.
4. Electro-optical switch using $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ phase-change material in a silicon MZI structure / *H. Zhang, L. Zhou, L. Lu et al.* // Conf. on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim. Optical Society of America. 2017. P. s1972.
5. Device-level photonic memories and logic applications using phase-change materials / *Z. Cheng, C. Rios, N. Youngblood et al.* // Adv. Mater. 2018. Vol. 30. No. 32. P. 1802435-1–1802435-8.
6. Integrated 256 cell photonic phase-change memory with 512-bit capacity / *J. Feldmann, N. Youngblood, X. Li et al.* // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2019. Vol. 26. No. 2. P. 1–7.
7. Toward fast neural computing using all-photonic phase change spiking neurons / *I. Chakraborty, G. Saha, A. Sengupta et al.* // Scientific reports. 2018. Vol. 8. No. 1. P. 1–9.
8. Effect of heating rate on the activation energy for crystallization of amorphous $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ thin film / *Y. Choi, M. Jung, Y.-K. Leez* // Electrochem. Solid-State Lett. 2009. Vol. 12. No. 7. P. 17–19.
9. Fast and reliable storage using a 5 bit, nonvolatile photonic memory cell / *X. Li, N. Youngblood, C. Rios et al.* // Optica. 2019. Vol. 6. No. 1. P. 1–6.
10. Structural transition and enhanced phase transition properties of Se doped $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ alloys / *E.M. Vinod, K. Ramesh, K.S. Sangunni* // Scientific Reports. 2015. Vol. 5. P. 8050-1–8050-7.
11. Improved thermal and electrical properties of Al-doped $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ films for phase-change random access memory / *G. Wang, X. Shen, Q. Nie. et al.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2012. Vol. 45. No. 37. P. 375302-1–375302-6.
12. Особенности определения оптической ширины запрещенной зоны тонких пленок материалов фазовой памяти / *П.И. Лазаренко, Ю.В. Воробьев, М.Е. Федянина и др.* // Перспективные материалы. 2019. № 10. С. 14–25.
13. Optical constants acquisition and phase change properties of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ thin films based on spectroscopy / *Z. Xu, C. Chen, Z. Wang et al.* // RSC Adv. 2018. Vol. 8. P. 21040–21046.
14. *Redaelli An.* Phase change memory. Device physics, reliability and applications. Springer, 2018. 342 p.
15. Effect of indium doping on $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ thin films for phase-change optical storage / *K. Wang, C. Steimer, D. Wamwangi et al.* // Appl. Phys. A. 2005. Vol. 80. P. 1611–1616.
16. Ge-Sb-Te thin films deposited by pulsed laser: An ellipsometry and Raman scattering spectroscopy study / *P. Nemeč, A. Moreac, V. Nazabal et al.* // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 106. P. 103509-1–103509-7.
17. Thermo-optical effect in phase-change nanophotonics / *Matthias Stegmaier, Carlos Rios, Harish Bhaskaran et al.* // ACS Photonics. 2016. Vol. 3. P. 828–835.
18. Optical properties of $(\text{GeTe}, \text{Sb}_2\text{Te}_3)$ pseudobinary thin films studied with spectroscopic ellipsometry / *J.-W. Park, S. Ho Baek, T.D. Kang et al.* // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 93. P. 021914-1–021914-3.

19. *Wuttig M., Bhaskaran H., Taubner T.* Phase-change materials for non-volatile photonic applications // Nature photonics. 2017. Vol 11. P. 465–476.
20. Mechanism of the isothermic amorphous-to-crystalline phase transition in Ge:Sb:Te ternary alloys / *J. Gonzalez-Hernandez, E.F. Prokhorov, Yu.V. Vorobiev et al.* // J. Vac. Sci. Technol. A. 2001. Vol. 19. No. 4. P. 1623–1629.
21. *Нгуен Х.Ф., Козюхин С.А., Певцов А.Б.* Влияние висмута на оптические свойства тонких пленок Ge₂Sb₂Te₅ // Физика и техника полупроводников. 2014. Т. 48. № 5. С. 597–603.
22. *Jellison G.E., Modine F.A.* Parameterization of the optical functions of amorphous materials in the interband region // Appl. Phys. Lett. 1996. Vol. 69. P. 371–373.
23. Analytical model for the optical functions of amorphous semiconductors from the near-infrared to ultraviolet: Applications in thin film photovoltaics / *A.S. Ferlauto, G.M. Ferreira, J.M. Pearce et al.* // J. Appl. Phys. 2002. Vol. 92. P. 2424–2434.
24. Comparison of methods to determine bandgaps of ultrathin HfO₂ films using spectroscopic ellipsometry / *M. Di, Er. Bersch, Al. C. Diebold et al.* // J. Vac. Sci. Technol. A. 2011. Vol. 29. P. 041001-1–041001-8.
25. Effect of tin ion implantation on the properties of amorphous Ge₂Sb₂Te₅ thin films / *D.N. Seleznev, A.L. Sitnikov, A.V. Kozlov et al.* // RUPAC. 2018. P. 230–232.
26. Oxygen incorporation into GST phase-change memory matrix / *R. Golovchak, Y.G. Choi, S. Kozuyukhin et al.* // Applied Surface Science. 2015. Vol. 332. P. 533–541.
27. Influence of Bi doping upon the phase change characteristics of Ge₂Sb₂Te₅ / *K. Wang, D. Wamwangi, S. Ziegler et al.* // Citation: Journal of Applied Physics. 2004. Vol. 96. No. 10. P. 5557–5562.
28. *Mehta N., Kumar A.* Studies of crystallization kinetics in a-Ge_{80-x}Te₂₀Cd_x and a-Ge_{80-x}Te₂₀Ge_x alloys using D.C. conductivity measurements // J. Therm. Anal. Calorim. 2006. Vol. 83. No. 3. P. 669–673.
29. *Muchira I.W., Njoroge W.K., Karimi P.M.* Crystallization kinetics of In₄₀Se₆₀ thin films for phase change random access memory (PRAM) applications // Journal of Ovonic Research. 2015 Vol. 11. No. 3. P. 131–136.

Поступила в редакцию 14.02.2020 г.; после доработки 14.02.2020 г.; принята к публикации 17.03.2020 г.

Федянина Мария Евгеньевна – студентка Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124482, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), fedyanina.m@org.miet.ru

Лазаренко Петр Иванович – кандидат технических наук, доцент Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124482, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), lpi@org.miet.ru

Воробьев Юрий Владимирович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Рязанского государственного радиотехнического университета (Россия, 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59), vorobjov.y.v@rsreu.ru

Козюхин Сергей Александрович – доктор химических наук, профессор Института общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук (Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 31), sergkoz@igic.ras.ru

Дедкова Анна Александровна – ведущий инженер ЦКП «Микросистемная техника и электронная компонентная база» МИЭТ (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), my_name9999@mail.ru

Якубов Алексей Олегович – аспирант, младший научный сотрудник Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124482, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), alexsey007@mail.ru

Левицкий Владимир Сергеевич – кандидат технических наук, специалист по измерениям ООО «НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике» (Россия, 194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 28), v.levitskiy@hevelsolar.com

Сагунова Ирина Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124482, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), sagunova@list.ru

Шерченков Алексей Анатольевич – доктор технических наук, профессор Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124482, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), aa_sherchenkov@rambler.ru

References

1. Cheng H.-Yu, Carta, F., Chien W.C. et al. 3D cross-point phase change memory for storage-class memory. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2019, vol. 52, no. 47, pp. 473002-1–473002-89.
2. Intel and Micron Produce Breakthrough Memory Technology: Available at: <https://newsroom.intel.com/news-releases/intel-and-micron-produce-breakthrough-memory-technology/#gs.vjlob> (accessed: 10.02.2020).
3. Kozyukhin S., Vorobyov Yu., Lazarenko P. et al. Isothermal and CW laser crystallization of amorphous Ge₂Sb₂Te₅ thin films. *Non-Crystalline Solids*, 2018, vol. 480, pp. 51–56.
4. Zhang H., Zhou L., Lu L. et al. Electro-optical switch using Ge₂Sb₂Te₅ phase-change material in a silicon MZI structure. *Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim. – Optical Society of America*, 2017, p. s1972.
5. Cheng Z., Rios C., Youngblood N. et al. Device-level photonic memories and logic applications using phase-change materials. *Adv. Mater.*, 2018, vol. 30, no. 32, p. 1802435-1–1802435-8.
6. Feldmann J., Youngblood N., Li X. et al. Integrated 256 cell photonic phase-change memory with 512-bit capacity. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, vol. 26, no. 2, pp. 1–7.
7. Chakraborty I., Saha G., Sengupta A. et al. Toward fast neural computing using all-photonic phase change spiking neurons. *Scientific reports*, 2018, vol. 8, no. 1, pp. 1–9.
8. Choi Y., Jung M., Leez Y.-K. Effect of heating rate on the activation energy for crystallization of amorphous Ge₂Sb₂Te₅ thin film. *Electrochem. Solid-State Lett.*, 2009, vol. 12, no. 7, pp. 17–19.
9. Li X., Youngblood N., Rios C. et al. Fast and reliable storage using a 5 bit, nonvolatile photonic memory cell. *Optica*, 2019, vol. 6, no. 1, pp. 1–6.
10. Vinod E.M., Ramesh K., Sangunni K.S. Structural transition and enhanced phase transition properties of Se doped Ge₂Sb₂Te₅ alloys. *Scientific Reports*, 2015, vol. 5, p. 8050-1–8050-7.
11. Wang G., Shen X., Nie Q. et al. Improved thermal and electrical properties of Al-doped Ge₂Sb₂Te₅ films for phase-change random access memory. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2012, vol. 45, no. 37, p. 375302-1–375302-6.
12. Lazarenko P.I., Vorobiev Yu.V., Fedyanina M.E. et al. Peculiarities of estimating the optical band gap of thin films of phase change memory materials. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2020, vol. 11, no. 2, pp. 330–337.
13. Xu Z., Chen C., Wang Z. et al. Optical constants acquisition and phase change properties of Ge₂Sb₂Te₅ thin films based on spectroscopy. *RSC Adv.*, 2018, vol. 8, pp. 21040–21046.
14. Redaelli An. *Phase change memory. Device physics, reliability and applications*. Springer, 2018. 342 p.
15. Wang K., Steimer C., Wamwangi D. et al. Effect of indium doping on Ge₂Sb₂Te₅ thin films for phase-change optical storage. *Appl. Phys. A*, 2005, vol. 80, pp. 1611–1616.
16. Nemeč P., Moreac A., Nazabal V. et al. Ge–Sb–Te thin films deposited by pulsed laser: An ellipsometry and Raman scattering spectroscopy study. *J. Appl. Phys.*, 2009, vol. 106, p. 103509-1–103509-7.
17. Matthias Stegmaier, Carlos Rios, Harish Bhaskaran et al. Thermo-optical effect in phase-change nanophotonics. *ACS Photonics*, 2016, vol. 3, pp. 828–835.
18. Park J.-W., Ho Baek S., Kang T.D. et al. Optical properties of (GeTe, Sb₂Te₃) pseudobinary thin films studied with spectroscopic ellipsometry. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, vol. 93, p. 021914-1–021914-3.
19. Wuttig M., Bhaskaran H., Taubner T. Phase-change materials for non-volatile photonic applications. *Nature photonics*, 2017, vol. 11, pp. 465–476.
20. Gonzalez-Hernandez J., Prokhorov E.F., Vorobiev Yu.V. et al. Mechanism of the isothermic amorphous-to-crystalline phase transition in Ge:Sb:Te ternary alloys. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 2001, vol. 19, no. 4, pp. 1623–1629.
21. Nguyen X.F., Kozyukhin S.A., Pevtsov A.B. The effect of bismuth on the optical properties of thin films Ge₂Sb₂Te₅. *Physics and technology of semiconductors*, 2014, vol. 48, no 5, pp. 597–603. (In Russian).

22. Jellison G.E., Modine F.A. Parameterization of the optical functions of amorphous materials in the inter-band region. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, vol. 69, pp. 371–373.
23. Ferlauto A.S., Ferreira G.M., Pearce J.M. et al. Analytical model for the optical functions of amorphous semiconductors from the near-infrared to ultraviolet: Applications in thin film photovoltaics. *J. Appl. Phys.*, 2002, vol. 92, pp. 2424–2434.
24. Di M., Bersch Er., Diebold Al.C. et al. Comparison of methods to determine bandgaps of ultrathin HfO₂ films using spectroscopic ellipsometry. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 2011, vol. 29, p. 041001-1–041001-8.
25. Seleznev D.N., Sitnikov A.L., Kozlov A.V. et al. Effect of tin ion implantation on the properties of amorphous Ge₂Sb₂Te₅ thin films. *RUPAC*, 2018, pp. 230–232.
26. Golovchak R., Choi Y.G., Kozyukhin S. et al. Oxygen incorporation into GST phase-change memory matrix. *Applied Surface Science*, 2015, vol. 332, pp. 533–541.
27. Wang K., Wamwangi D., Ziegler S. et al. Influence of Bi doping upon the phase change characteristics of Ge₂Sb₂Te₅. *J. Appl. Phys.*, 2004, vol. 96, no. 10, pp. 5557–5562.
28. Mehta N., Kumar A. Studies of crystallization kinetics in α -Se_{80-x}Te₂₀Cd_x and α -Se_{80-x}Te₂₀Ge_x alloys using D.C. conductivity measurements. *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2006, vol. 83, no. 3, pp. 669–673.
29. Muchira I.W., Njoroge W.K., Karimi P.M. Crystallization kinetics of In₄₀Se₆₀ thin films for phase change random access memory (PRAM) applications. *Journal of Ovonic Research*, 2015, vol. 11, no 3, pp. 131–136.

Received 14.02.2020; Revised 14.02.2020; Accepted 17.03.2020.

Information about the authors:

Mariya E. Fedyanina – Student of the Institute of Perspective Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), fedyanina.m@org.miet.ru.

Petr I. Lazarenko – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Perspective Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), lpi@org.miet.ru

Yuri V. Vorobyov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Ryazan State Radio Engineering University (Russia, 390005, Ryazan, Gagarin st., 59), vorobjov.y.v@rsreu.ru

Sergey A. Kozyukhin – Dr. Sci. (Chem.), Prof., Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of Russian Academy of Sciences (Russia, 119991, Moscow, Leninsky pr., 31), sergkoz@igic.ras.ru

Anna A. Dedkova – Lead Engineer, National Research University of Electronic Technology Core facilities center «MEMS and electronic components» (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solar Alley, 6), my_name9999@mail.ru

Aleksey O. Yakubov – PhD Student, Junior Researcher of the Institute of Perspective Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), alexsey007@mail.ru

Vladimir S. Levitskii – Cand. Sci. (Eng.), Measurement Specialist, R&D Center of Thin Film Technologies in Energetics (Russia, 194021, St. Petersburg, Polytechnicheskaya st., 28), v.levitskiy@hevelsolar.com

Irina V. Sagunova – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), sagunova@list.ru

Aleksey A. Sherchenkov – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Institute of Perspective Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), aa_sherchenkov@rambler.ru