

ВЛИЯНИЯ ТЕРМООБРАБОТКИ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ ДЛЯ МНОГОУРОВНЕВЫХ УСТРОЙСТВ НАНОФОТОНИКИ

М.Е. Федянина¹, А.А. Дедкова², А.О. Якубов¹

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
(124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, д.1)

²ЦКП «Микросистемная техника и электронная компонентная база» МИЭТ,
г. Москва, Россия

(124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, д. 6)

e-mail: mahamaha1996@gmail.com

Изменение оптических параметров тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ во время фазового перехода обуславливает перспективы их применения в энергонезависимых элементах нанофотоники. В работе установлены зависимости между степенью кристалличности, оптическими свойствами и оптической шириной запрещенной зоны тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$. Определены особенности процесса кристаллизации и продемонстрирована возможность многоуровневого изменения оптического сигнала, что может быть применено в элементах нейроморфных вычислительных систем.

Ключевые слова: тонкие пленки, $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, кристаллизация, степень кристалличности, оптические свойства.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время скорость передачи и обработки информации является одним из основных параметров, определяющих быстродействие современных устройств. Уменьшение топологических размеров и проявление квантово-размерных эффектов в элементах памяти, работающих с использованием электрических импульсов, существенно ограничивает дальнейшее развитие и усовершенствование электрических видов памяти. Одним из возможных путей повышения быстродействия является переход к оптическим способам передачи информации и полностью оптическим системам ее обработки.

Тонкие пленки GST225 под действием лазерного импульса, электрического тока или температурного воздействия изменяют фазовое состояние и, как следствие, оптические свойства, что стало основой принципа работы различного вида устройств оптической фазовой памяти. Один из таких

видов полностью оптической энергонезависимой фазовой памяти, позволяющий осуществлять управление оптическим сигналом, был изготовлен на основе тонкопленочных волновода и халькогенидного полупроводника [1]. При этом возможность формирования состояний с частичной степенью кристалличности тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ открывает широкие перспективы по созданию прототипов многоуровневых энергонезависимых элементов и их применения в полностью оптических нейронных вычислительных системах [2].

Однако отсутствие детальных исследований оптических свойств состояний с частичной степенью кристалличности и разброс имеющихся в научно-технической литературе данных является проблемой создания прототипов многоуровневых элементов нанофотоники, что требует проведения моделирования и отработки режимов исследования оптических параметров.

В связи с этим, целью данной работы являлось определение влияния термообработки тонких пленок материала фазовой памяти $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ на их оптические свойства и оптическую ширину запрещенной зоны, а также оценка их зависимости от степени кристалличности.

2. МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1. Методика формирования образцов тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$

Аморфные тонкие пленки $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ были сформированы методом магнетронного распыления мишени с использованием источника постоянного тока. Давление аргона во время распыления составляло $5,7 \cdot 10^{-1}$ Па, мощность - 25 Вт. В качестве подложек использовались кремниевые пластины КДБ-12 для проведения эллипсометрических исследований и стекла corning glass 1737F для спектрофотометрических.

Выбор температур для формирования состояний с частичной степенью кристалличности был сделан по результатам анализа измеренной температурной зависимости удельного сопротивления исследуемых тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, представленной на рисунке 1 [3].

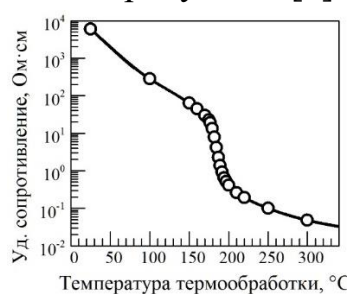


Рис. 1. Температурная зависимость удельного сопротивления тонкой пленки $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ с выбором температур термообработки

Скорость нагрева образцов до выбранных температур составляла 5°С/мин, выдержки при достижении выбранных температур не проводилось. Измерение оптических свойств осуществлялось в диапазоне от 200 до 2500 нм с применением спектрофотометра Agilent Cary 5000 и эллипсометра Horiba Uvisel 2

2.2. Методики расчета оптических параметров и оценки оптической ширины запрещенной зоны

Оценка оптической ширины запрещенной зоны ($E_g^{\text{опт}}$) по результатам спектрофотометрии проводилась с помощью метода Тауца, который основан на анализе зависимостей $(\alpha h\nu)^{1/2}$, в частности на определении точки пересечения линейного участка графика с осью абсцисс В данной работе коэффициент поглощения (α) рассчитывался по формуле:

$$\alpha = -\frac{1}{x} \cdot \ln\left(\frac{T}{1-R}\right), \quad (1)$$

где x – толщина пленки, а T , R – пропускание и отражение, полученные с помощью спектрофотометрии.

Для проведения моделирования и оценки спектров показателя преломления (n) и коэффициента экстинкции (k) с применением эллипсометрии требуется задавать слоевую и математическую модели. В данной работе для тонких пленок GST225 применялась математическая модель Тауца-Лоренца. В свою очередь в качестве слоевой модели была выбрана модель Si / SiO_x / Ge₂Sb₂Te₅ / Ge₂Sb₂Te₅ и воздух (1:1), учитывающая наличие тонкого оксидного слоя на поверхности подложки до напыления (SiO_x) и шероховатость пленки (Ge₂Sb₂Te₅ и воздух (1:1)).

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

На рисунке 2 представлены результаты измерения пропускания (а) и отражения (б) тонких пленок Ge₂Sb₂Te₅ с помощью спектрофотометрии. Термообработка выше 150 °С приводит к существенному смещению пиковых значений пропускания и отражения в сторону больших длин волн. Дальнейшее изменение значений после 200 °С может быть объяснено увеличением размеров зерен поликристаллической структуры [4].

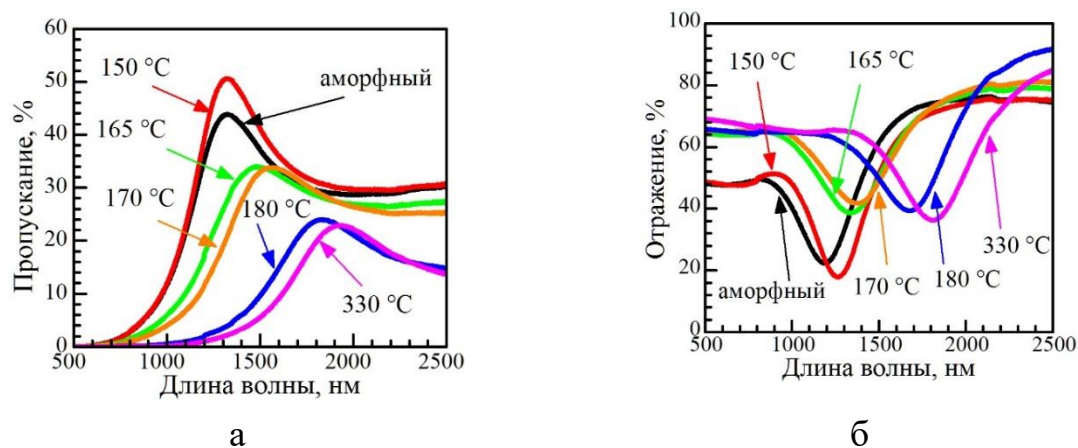


Рис. 2. Спектральные зависимости пропускания (а) и отражения (б) для тонких пленок GST225

Кроме того, с применением метода Тауца проведена оценка влияния термообработки на оптическую ширину запрещенной зоны по спектрам поглощения. Установлено, что оптическая ширина запрещенной зоны изменяется от $\sim 0,72$ до $\sim 0,40$ эВ в процессе кристаллизации.

На рисунке 3 представлены результаты моделирования показателя преломления и коэффициента экстинкции, полученные с помощью результатов эллипсометрии. Термообработка тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ приводит к изменению значений оптических параметров (на длине волны 1550 нм n и k увеличиваются приблизительно в 1,5 раза) и смещению пиков в область больших длин волн. При этом результаты эллипсометрического анализа позволили выявить, что в процессе кристаллизации происходит уменьшение толщины тонкой пленки GST225 на 8 %, что связано с изменением плотности материала с $5,87 \text{ г/см}^3$ для аморфного состояния до $6,33 \text{ г/см}^3$ для кристаллического.

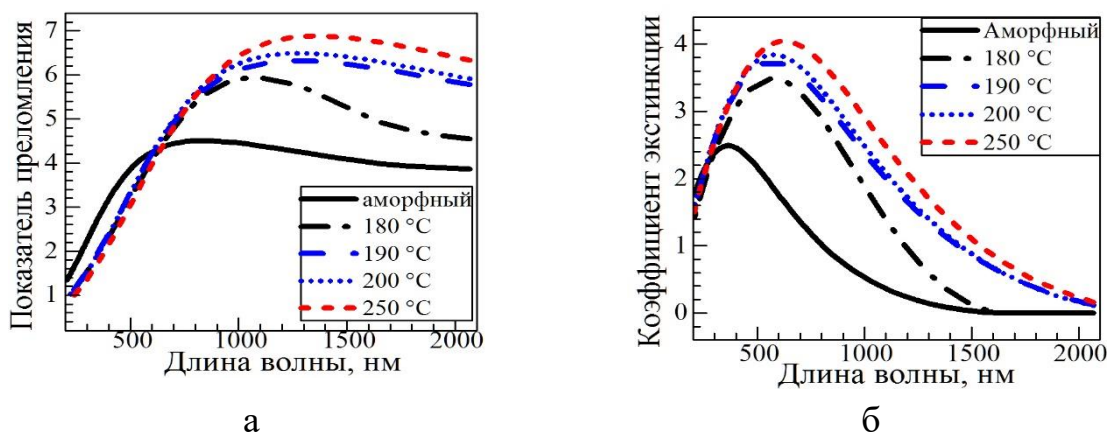


Рис 3 Спектральные зависимости показателя преломления (а) и коэффициента экстинкции (б) тонкой пленки $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$

Дополнительно была рассчитана степень кристалличности (α_k) по формуле (2), характеризующая долю закристаллизованного материала.

$$\alpha_k = \frac{\ln(\sigma) - \ln(\sigma_a)}{\ln(\sigma_c) - \ln(\sigma_a)}, \quad (2)$$

где σ – проводимость исследуемой тонкой пленки, σ_a , σ_c – проводимость для 100 % аморфного образца, взятого при температуре начала фазового перехода, и 100 % кристаллического состояния для тонкой пленки с термообработкой при 250 °С соответственно. На рисунках 4 (а-в) представлены полученные зависимости показателя преломления, коэффициента экстинкции и оптической ширины запрещенной зоны тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ от степени их кристалличности.

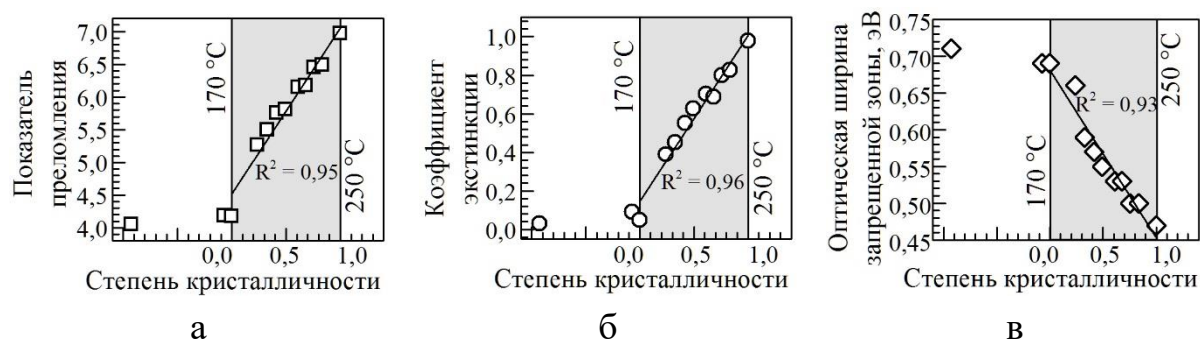


Рис. 4. Влияние степени кристалличности пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ на показатель преломления (а) и коэффициент экстинкции (б) на длине волны 1550 нм, а также на оптическую ширину запрещенной зоны (в)

Определено, что в диапазоне температур от 170 до 250 °С зависимости показателя преломления, коэффициента экстинкции и оптической ширины запрещенной зоны от степени кристалличности близки к линейным. Таким образом, управляя уровнем программируемого сигнала и достигая различной степени кристалличности тонких пленок можно достичь формирования набора логических состояний, различающихся друг от друга на фиксированную величину рабочего параметра, к примеру, коэффициента экстинкции. Это позволит обеспечить надежное прогнозирование и воспроизведение результата операций программирования ячейки многоуровневой фазовой памяти.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследованы оптические свойства тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, а также их зависимости от режимов термообработки и различной

степени кристалличности. Определено, что оптическая ширина запрещенной зоны тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ при кристаллизации уменьшается с 0,72 эВ до 0,4 эВ, при этом существенно изменяются значения пропускания, отражения, показателя преломления и коэффициента экстинкции. Полученные результаты оценки зависимостей оптических параметров тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ от степени кристалличности свидетельствуют о возможности надежного формирования набора логических уровней. Это позволит осуществлять прогнозирование и воспроизведение промежуточных состояний в ячейках фазовой памяти на этапе разработки и создания многоуровневых запоминающих устройств нанофотоники.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта РФФИ в рамках научного проекта № 18-33-20237.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. Rios, M. Stegmaier, P. Hosseini, D. Wang, T. Scherer, C. D. Wright, H. Bhaskaran, W. H. P. Pernice, Integrated all-photonic non-volatile multi-level memory. // *Nature Photonics*, 2015, v. 9, p. 725-732.
2. X. Li, N. Youngblood, C. Rios, Z. Cheng, C. D. Wright, W. H. P. Pernice, H. Bhaskaran, Fast and reliable storage using a 5 bit, nonvolatile photonic memory cell. // *Optica*, 2019, v. 6, № 1, p. 1-6.
3. P. I. Lazarenko, Yu. V. Vorobiev, M. E. Fedyanina, A. A. Sherchenkov, S. A. Kozyukhin, A. O. Yakubov, A. V. Kukin, Yu. S. Sybina, I. V. Sagunova, Peculiarities of estimating the optical band gap of thin films of phase change memory materials. // *Inorganic Materials: Applied Research*, 2020, v. 11, № 2, p. 330-337.
4. М. Е. Федянина, П. И. Лазаренко, Ю. В. Воробьев, С. А. Козюхин, А. А. Дедкова, А. О. Якубов, В. С. Левицкий, И. В. Сагунова, А. А. Шерченков, Влияние степени кристалличности на дисперсию оптических параметров тонких пленок фазовой памяти $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$. // *Известия вузов. Электроника*, 2020, т. 25, № 3, с. 203-218.

INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON THE OPTICAL PROPERTIES OF $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ THIN FILMS FOR MULTI-LEVEL NANOPHOTONICS DEVICES

M.E. Fedyanina¹, A.A. Dedkova², A.O. Yakubov¹

*National Research University of Electronic Technology «MIET»
(Shokin sq., 1, Moscow, Zelenograd, Russia, 124498)
e-mail: mahamaha1996@gmail.com*

Changes in the optical parameters of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ thin films during the phase transition cause their use in non-volatile elements of nanophotonics. In this paper, the dependencies between the degree of crystallinity, optical properties, and the optical band gap of the $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ material are established. The features of the crystallization process are determined, and the possibility of multi-level changes in the optical signal is demonstrated, which can be applied in elements of neuromorphic computing systems.

Keywords: thin films, $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, crystallization, degree of crystallinity, optical properties.

**Самарский филиал федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Физического института им. П.Н. Лебедева
Российской академии наук**

**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С.П. Королева»**

**Самарский научно-образовательный центр
по оптике и лазерной физике**

**XVIII Всероссийский молодежный
Самарский конкурс – конференция
научных работ по оптике и лазерной
физике**

10-14 ноября 2020 года

Сборник трудов конференции

Москва 2020

УДК 535+535: 621.373.826

XVIII Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике: сборник трудов конференции, (Самара, 10–14 ноября 2020 г.). – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, 2020. – 440 с.

ISBN 978-5-902622-44-4

В сборнике представлены работы участников XVIII Всероссийского молодежного Самарского конкурса-конференции научных работ по оптике и лазерной физике, а также аннотации докладов и лекций ведущих ученых, сделанных в рамках Конкурса-конференции. Исследования конкурсантов охватывают широкий круг теоретических и прикладных вопросов когерентной и квантовой оптики, спектроскопии, биофотоники, лазерной физики, взаимодействия света с веществом и нанофотоники.

Для студентов, аспирантов, специализирующихся в области оптики, спектроскопии, лазерной физики, научных работников и преподавателей.

| | |
|---|-----|
| А.А. Першин, К.А. Романюк, А.П. Торбин Роль рекомбинационного процесса $O+O+M$ в гибели O_3 | 157 |
| А.А. Подлесных, О.Т. Каменев, Ю.С. Петров, В.А. Колчинский Испытание волоконно-оптического интерферометрического деформографа в условиях подземного рудника | 165 |
| Е.А. Рассолов, А.Б. Черепахин Расчет резонансных колебаний кантилеверов в воздушной и жидкой среде..... | 170 |
| А.А. Савельева, Е.С. Козлова Моделирование фокусировки оптического вихря зонной пластинкой Френеля..... | 177 |
| А.А. Советский, А.Л. Матвеев, Л.А. Матвеев, Г.В. Геликонов, А.А. Зыков, В.Ю. Зайцев Оценивание деформаций в компрессионной оптической когерентной эластографии с отслеживанием межпиксельных смещений рассеивателей..... | 185 |
| Г.И. Толстов, Я.А. Медведков, Д.П. Порфирьев, М.В. Загидуллин, А.М. Мебель, В.Н. Аязов Механизм разрушения фенил-радикала в условиях горения | 191 |
| С.О. Усталков, А.А. Скапцов, А.Х.М. Мохаммед, А.М. Захаревич, А.А. Козырев, Е.А. Сагайдачная, В.И. Кочубей Применение апконверсионных наночастиц $NaYF_4:Yb,Er$ для исследования процесса денатурации внутри биологических тканей | 198 |
| Я.В. Федотова, В.И. Кукушкин, Е.Н. Морозова, В.Е. Кирпичев, В.В. Соловьев, И.В. Кукушкин Гигантское усиление рамановского рассеяния света в ближней ИК-области спектра..... | 205 |
| М.Е. Федянина, А.А. Дедкова, А.О. Якубов Влияния термообработки на оптические свойства тонких пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ для многоуровневых устройств нанофотоники..... | 212 |