

На правах рукописи



Яковлев Сергей Александрович

**ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ГИБРИДНЫЕ СТРУКТУРЫ  
ОПАЛ/Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub>: ПОЛУЧЕНИЕ, СТРУКТУРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ  
СВОЙСТВА**

01.04.10 – физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург - 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

**Научный руководитель:** кандидат физико-математических наук,  
Певцов Александр Борисович

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук,  
профессор, заведующий лабораторией  
Физико-технического института  
им. А. Ф. Иоффе,  
Шадрин Евгений Борисович

доктор физико-математических наук,  
профессор, профессор Санкт-  
Петербургского государственного  
университета,  
Вербин Сергей Юрьевич

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования «Санкт-  
Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И.Ульянова (Ленина)».

Защита состоится «21» ноября 2013г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д002.205.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая д. 26, ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А. Ф. Иоффе

Автореферат разослан «10» октября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, д. ф.-м. н.



Л. М. Сорокин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

**Актуальность темы.** Тематика фотонных кристаллов – интенсивно развивающееся направление современной физики конденсированного состояния, оптики и физического материаловедения. Общее количество публикаций по этой теме (включая десятки статей в таких журналах как Nature, Science, Phys. Rev. Lett. и др.) приближается к 20000. Основное свойство фотонных кристаллов – существование энергетических запрещенных зон для фотонов. Наличие фотонно-кристаллической зонной структуры позволяет осуществить контроль, управление и модификацию световых потоков внутри фотонных кристаллов и открывает пути их возможных применений в оптоэлектронике и нанофотонике [1].

Одним из эффективных способов управления свойствами фотонного кристалла является использование для его создания материалов, обладающих фазовым переходом, например, сложных халькогенидов системы Ge-Sb-Te и их аналогов, уже широко применяемых в настоящее время для создания быстродействующих устройств энергонезависимой фазовой памяти и пороговых переключателей для современных компьютерных технологий [2]. Разработка принципов создания гибридных пленочных структур опал/халькогенидные стеклообразные полупроводники и их реализация даст уникальную возможность совместить в едином объекте пространственно-периодическую структуру опала (фотонный кристалл) со специфическими свойствами халькогенидов, такими как оптическая память, обратимая кристаллизация–аморфизация, фотоиндуцированные структурные трансформации, фотоиндуцированная анизотропия, фотолегирование, сильная оптическая нелинейность и т.д. С одной стороны, исследования подобных структур представляют несомненный интерес для решения фундаментальной проблемы – как необычные свойства сложных халькогенидных полупроводниковых сплавов, определяемые их составом, а также температурными и фотоиндуцированными изменениями структурных и оптических характеристик, влияют на специфику распространения света в фотонно-кристаллических гибридных структурах. С другой стороны, изучение подобных структур – путь к созданию новых устройств для управления световыми потоками, работающих по принципу “свет-свет” или “электрическое поле-свет” и характеризующихся высоким быстродействием и большой глубиной модуляции сигналов.

**Цель работы** – разработка лабораторной методики синтеза пространственно-периодических пленочных гибридных структур фотонный кристалл (опал)/халькогенидный стеклообразный полупроводник ( $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ ), экспериментальное и теоретическое исследование особенностей распространения света в таких структурах, а также изучение возможности управления оптическим откликом синтезированных гибридных структур с помощью внешних воздействий.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать методику синтеза фотонно-кристаллических гибридных структур опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , позволяющую создавать однородное по составу и равномерное по толщине покрытие опаловых шаров слоем  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ .

2. Исследовать геометрические (пространственный рельеф верхнего монослоя опала, покрытого  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ ) и структурные (фазовое состояние) свойства исходных и отожженных гибридных структур.

3. Исследовать оптический отклик гибридных структур. Изучить влияние толщины слоя  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , угла падения света и относительной ориентации плоскости падения света к кристаллографическим направлениям фотонного кристалла на спектры отражения гибридных структур.

4. Развить качественный феноменологический подход, описывающий экспериментальные данные.

5. Изучить возможности управления оптическим откликом фотонно-кристаллических гибридных структур за счет фазовых превращений в слое  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  при воздействии температуры и/или лазерного излучения.

#### **Научная новизна работы.**

1. Предложена и реализована оригинальная концепция управляемых фотонно-кристаллических гибридных структур, в которых в качестве управляемого элемента использовано сложное халькогенидное соединение ( $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ ), обладающее обратимым фазовым переходом аморфное-кристаллическое состояние.

2. Исследован оптический отклик фотонно-кристаллических гибридных структур опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , и продемонстрирована важная роль в его формировании дифракционных аномалий (аномалий Вуда), возникающих вследствие резонансной связи между падающим светом и квазиволноводными модами, возбуждающимися в поверхностном слое гибридной структуры.

3. В гибридных структурах опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  детально исследована зависимость спектрального положения аномалии Вуда от условий эксперимента (угла падения света; относительной ориентации плоскости падения света к кристаллографическим направлениям фотонного кристалла), геометрических параметров структур (толщины слоя  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ ) и диэлектрических констант слоя  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ .

4. Развита оригинальный феноменологический подход, учитывающий частотную дисперсию квазиволноводных мод, который дает возможность наглядно интерпретировать результаты эксперимента. Получено аналитическое выражение, позволяющее количественно описать зависимости положения аномалии Вуда от толщины слоя  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  и угла падения света.

5. Показана возможность управления оптическим откликом гибридных структур опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  с помощью стимулированного температурой и/или лазерным излучением изменения фазового состояния слоя  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ .

#### **Практическая значимость работы.**

Пленочные фотонно-кристаллические гибридные структуры опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , синтезированные и исследованные в настоящей работе, могут служить основой для создания прототипов элементов (ячеек памяти, мультиплексоров, модуляторов, коммутаторов) для нового поколения

оптических микрочипов, отличающихся высоким быстродействием, долговременной стабильностью характеристик, малым энергопотреблением.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Разработанный метод термического испарения в вакууме объемного халькогенидного соединения  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  позволяет создавать пленочные фотонно-кристаллические гибридные структуры опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , в которых слой  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  покрывает поверхность пленки опала однородно по составу и равномерно по толщине, повторяя рельеф верхнего монослоя гексагонально-упорядоченных шаров аморфного  $\text{SiO}_2$ , формирующих опаловую пленку.

2. Оптический отклик фотонно-кристаллической гибридной структуры опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  на воздействие электромагнитного излучения формируется комбинацией следующих процессов: 1) брэгговской дифракцией света на периодической системе плоскостей трехмерного фотонного кристалла; 2) брэгговской дифракцией света на двумерно-упорядоченной поверхности гибридной структуры; 3) аномалиями Вуда, возникающими при резонансе между падающим излучением и квазиволноводными модами в поверхностном слое гибридной структуры; 4) интерференцией Фабри-Перо на всей толщине пленочной гибридной структуры.

3. Наблюдаемые в эксперименте особенности спектрально-угловых зависимостей аномалии Вуда в фотонно-кристаллической гибридной структуре опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , а именно, сдвиг максимумов в длинноволновую сторону по мере увеличения угла падения света и толщины слоя  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  и выполаживание спектрально-угловой зависимости с ростом толщины слоя  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , адекватно описываются теоретической моделью, учитывающей вид дисперсии квазиволноводных мод и включающей два параметра (эффективный показатель преломления ( $n^*$ ) волноводного слоя гибридной структуры и величину поперечной компоненты волнового вектора ( $k_z$ ) квазиволноводной моды).

4. Индуцированный внешним воздействием фазовый переход аморфное-кристаллическое состояние в пленке  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  контролирует интенсивность и спектральное положение аномалии Вуда, превращая гибридную структуру опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  в элемент с высоким оптическим контрастом для управления световыми потоками.

**Апробация работы.** Основные результаты работы были представлены на следующих научных конференциях: VII Международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники», С.-Петербург, 2010; I Международного симпозиума «Физика межфазных границ и фазовые переходы», Ростов-на-Дону, 2011; Конференции по физике и астрономии для молодых ученых Санкт-Петербурга и Северо-запада “Физика. СПб”, С.-Петербург, 2011; Международной зимней школе по физике полупроводников, Зеленогорск, 2012; Всероссийской молодежной конференции «Опалоподобные структуры», С.-Петербург, 2012; VIII Международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники», С.-Петербург, 2012; Российской молодежной конференции по физике и астрономии “Физика. СПб”, С.-Петербург, 2012; 21th Int. Symp. «Nanostructures:Physics and Technology», С.-

Петербург, 2013; XI Российской конференции по физике полупроводников, С.-Петербург, 2013.

Победитель конкурса инновационных проектов по программе «У.М.Н.И.К.», С.-Петербург, 2012.

**Публикации.** Материалы диссертационной работы опубликованы в 4 статьях в журналах, рекомендованных ВАК, и 11 трудах конференций и тезисах докладов.

**Личный вклад автора.** Автор диссертации принимал участие в постановке целей и задач работы, конструировании экспериментальной установки и изготовлении образцов для исследований, проведении оптических исследований, обработке и интерпретации экспериментальных результатов, написании научных статей в составе авторского коллектива и подготовке их к опубликованию, представлял доклады по теме работы на конференциях.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 161 страницы машинописного текста, включая 82 рисунка и 1 таблицу. Список литературы содержит 140 ссылок.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

**Во введении** сформулированы актуальность темы, цель и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость работы. Приведены основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** носит обзорный характер. В ней приведены основные сведения о фотонных кристаллах, необходимые для изложения конкретных результатов диссертационной работы. Существенное внимание уделено обзору работ, посвященных фотонно-кристаллическим структурам на основе халькогенидных стеклообразных полупроводников. Рассмотрены основные свойства халькогенидов системы Ge-Sb-Te. На основании литературных данных сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

**Вторая глава** посвящена синтезу и характеристике свойств пленочных опалов, пленок  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  и гибридных структур опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ .

Пленки опала были получены методом жидкофазной коллоидной эпитаксии с самоупорядочением шаров  $\alpha\text{-SiO}_2$  под действием сил поверхностного натяжения на вертикально ориентированных кварцевых подложках [3]. Для изготовления гибридных структур опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  были синтезированы пленки опала с диаметром шаров  $\alpha\text{-SiO}_2 \sim 640$  нм и количеством опаловых монослоев 1 и 7.

Гибридная структура опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  представляет собой пленку опала, сверху которой напылен слой  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ . Для формирования гибридных структур был разработан метод термического испарения в вакууме, который позволил получить однородный по составу слой  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , равномерно покрывающий гофрированную поверхность опала и повторяющий при этом рельеф верхнего

монослоя гексагонально-упакованных опаловых шаров и их сферическую форму в пределах нескольких периодов.

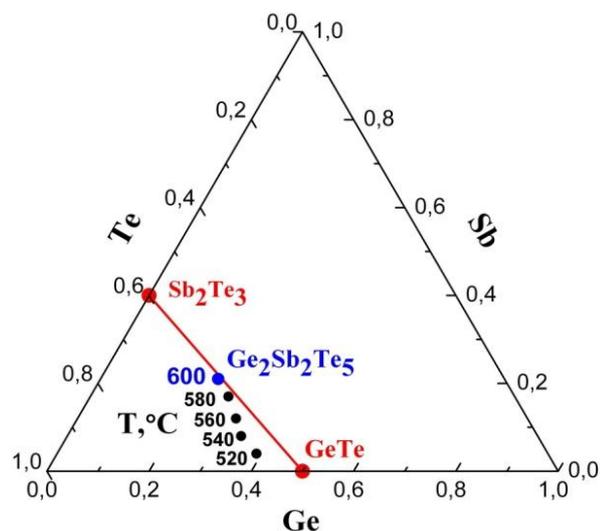


Рис. 1. Зависимость элементного состава пленок, синтезируемых из объемного вещества состава  $\text{Ge}_{22}\text{Sb}_{22}\text{Te}_{56}$ , от температуры испарения.

Для получения пленок  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , состав которых идентичен составу исходного объемного материала, был разработан специальный испаритель, позволяющий контролировать температуру испарения с точностью  $\pm 1$  °C. Оптимизация условий технологического процесса обеспечило медленное конгруэнтное испарение предварительно синтезированного объемного многокомпонентного халькогенида  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ . На рис. 1 представлена зависимость состава напыляемых пленок от температуры испарения. Видно, что при температуре 520 °C состав получаемых пленок был

далек от стехиометрического – наблюдался переизбыток атомов Ge и недостаток атомов Sb. При увеличении температуры испарения соотношение между атомами Ge и Sb приближалось к стехиометрическому составу, и при достижении температуры 600 °C состав пленок соответствовал составу исходного объемного вещества  $\text{Ge}_{22}\text{Sb}_{22}\text{Te}_{56}$  (атомные %) в пределах точности  $\pm 1$  ат%. Количество атомов Te у всех образцов оставалось примерно постоянным.

Структурная характеристика синтезированных пленок  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  и гибридных структур опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  была проведена методами рентгеновской дифракции, рамановского рассеяния, атомно-силовой микроскопии (АСМ) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Полученные данные свидетельствуют о том, что исходные пленки  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  имеют аморфную структуру. Для получения пленок  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  в кристаллическом состоянии был использован их отжиг в вакууме при температуре 170 °C в течение 1 часа.

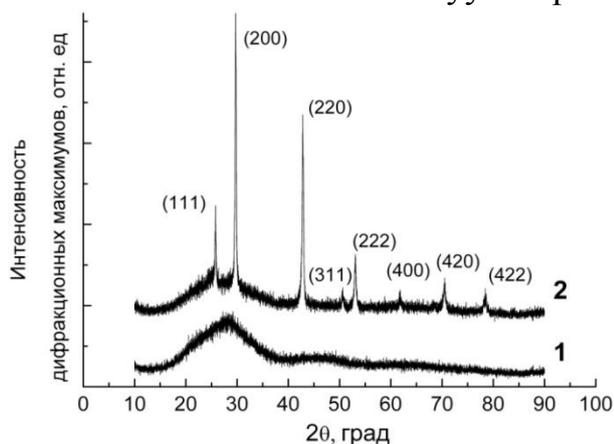


Рис. 2. Дифрактограммы пленок  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ : спектр 1 - исходный аморфный образец, спектр 2 – отожженный при 170°C образец (ГЦК фаза).

На рис. 2 представлены дифрактограммы исходной и отожженной пленки  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ . На дифрактограммах исходных пленок (рис. 2, спектр 1) присутствует широкая полоса в области углов  $2\theta=15-40^\circ$ , обусловленная совместным вкладом аморфной фазы  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  и подложки из плавленого кварца. Дифрактограммы отожженных пленок  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  показывают ГЦК фазу (рис. 2, спектр 2), что свидетельствует о переходе вещества из аморфного в

кристаллическое состояние. Фазовый переход пленки  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  из аморфного в кристаллическое состояние после отжига также зафиксирован для исследуемых образцов на рамановских спектрах.

Детальное исследование формы слоя  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , покрывающего поверхность опала, было проведено с помощью АСМ и СЭМ. На рис. 3(а) представлен фрагмент изображения, полученного с помощью АСМ, дефектного участка поверхности (плоскость (111)) гибридной структуры опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , на которой пленка  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  частично отсутствует и отчетливо видны шары  $\alpha\text{-SiO}_2$  (коричневый цвет). Видно, что пленка  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  повторяет рельеф, сформированный упорядоченным расположением опаловых шаров.

На рис. 3(б) представлено изображение, полученное с помощью СЭМ, со скола гибридной структуры, из которого следует, что слой  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  толщиной  $\sim 200$  нм равномерно покрывает верхнюю часть опаловых шаров, повторяя их форму. В некоторых областях небольшое количество  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  достигает второго монослоя, что, скорее всего, связано с наличием отдельных структурных дефектов в верхнем монослое опаловой пленки, через которые вещество халькогенида проникает вглубь образца.

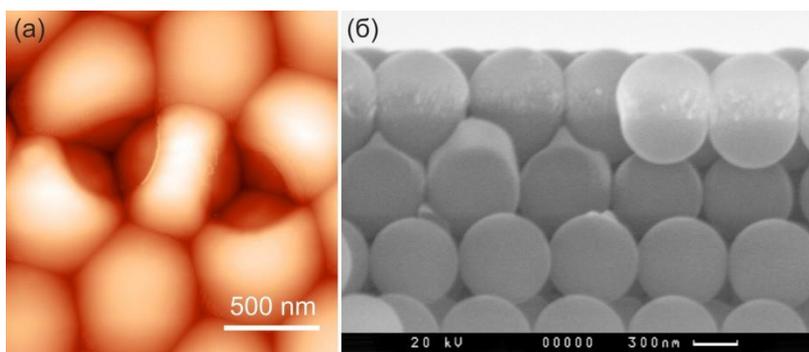


Рис.3. (а) Изображение, полученное с помощью АСМ, фрагмента поверхности гибридной структуры, где пленка  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (оранжевый цвет) частично удалена и видны шары  $\alpha\text{-SiO}_2$  (коричневый цвет); (б) Изображение, полученное с помощью СЭМ, со скола гибридной структуры.

Была проведена также оптическая характеристика пленок опала и  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ . Исследования спектров брэгговского отражения позволили определить основные параметры опала: диаметр шаров  $\alpha\text{-SiO}_2$   $\sim 640$  нм и среднюю диэлектрическую проницаемость шара  $\alpha\text{-SiO}_2$   $\sim 1.99$ . Определение оптических констант (показателя преломления и коэффициента экстинкции) исходных и отожженных пленок  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  было осуществлено с помощью метода спектроскопической эллипсометрии.

**Третья глава** посвящена исследованию оптического отклика гибридных структур опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  с разными толщинами слоя  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (10-150 нм) и количеством опаловых монослоев (1 и 7). В спектрах отражения гибридных структур (рис. 4) наблюдались “брэгговская полоса”, характерная для трехмерной пространственно-периодической структуры опала, и дифракционная аномалия (так называемая аномалия Вуда), обусловленная регулярной структурой поверхности исследуемых образцов [4]. Причиной появления аномалии Вуда является резонансное взаимодействие падающего на структуру света с квазиволноводными модами, возбуждаемыми в двухмерной

дифракционной решетке, образованной пленкой  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  и верхним монослоем шаров  $\alpha\text{-SiO}_2$ .

На рис. 4 представлена трансформация спектров отражения структуры от угла падения света. При увеличении угла падения брэгговский пик движется в коротковолновую область, а пик, обусловленный аномалией Вуда, смещается в длинноволновую область и при некотором угле падения света «накрывает» полосу брэгговского отражения.

Для экспериментального подтверждения предположения, что максимумы в спектре отражения, сдвигающиеся в длинноволновую сторону при изменении угла падения света, являются следствием возгорания аномалии Вуда, был изготовлен специальный образец гибридной структуры. Данный образец представлял собой монослой плотноупакованных шаров  $\alpha\text{-SiO}_2$  (двухмерную дифракционную решетку), покрытый 150-нанометровой пленкой  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ . В спектре отражения такой структуры брэгговский пик отсутствовал. На рис. 5 для сравнения приведены спектры гибридной структуры опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  с семью (кривая 1) и одним (кривая 2)

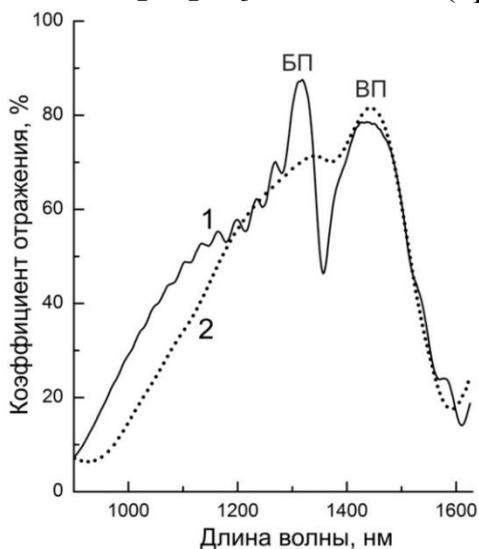


Рис. 5. Спектры отражения света от гибридных структур опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , содержащих 7 монослоев шаров  $\alpha\text{-SiO}_2$  (кривая 1) и 1 монослой (кривая 2). Толщина пленки  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  в обоих случаях равна 150 нм. ВП и БП обозначают максимумы, соответствующие аномалии Вуда и брэгговскому резонансу.

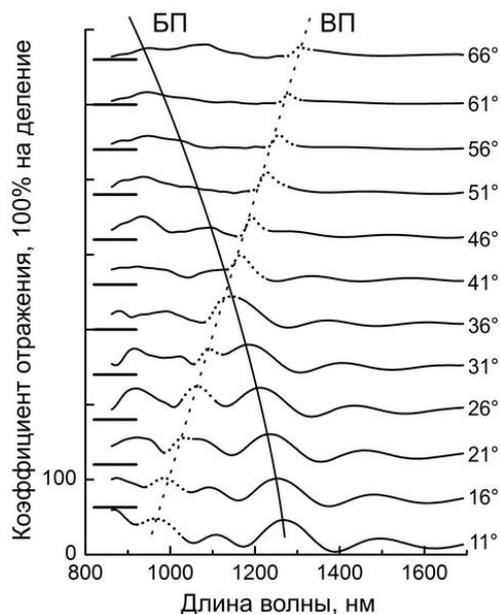


Рис. 4. Спектры отражения света от гибридной структуры опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , измеренные в диапазоне углов падения  $\theta=11^\circ\text{-}66^\circ$ . Сплошной линией отмечено спектрально-угловое поведение брэгговского резонанса (БП), возникающего вследствие трехмерной дифракции электромагнитных волн на регулярной решетке опаловой пленки. Пунктирная линия проведена через пики (ВП), обусловленные аномалией Вуда. Для удобства сопоставления спектры сдвинуты по вертикали. Длинные черточки вдоль оси ординат отмечают нулевой для каждого спектра.

опаловыми монослоями. В обоих случаях толщина пленки халькогенида 150 нм.

Из рисунка видно, что измеренные спектры как по форме, так и по интенсивности в основных чертах совпадают за исключением особенности в спектральной области  $\sim 1350$  нм, которую мы связываем с проявлением трехмерной брэгговской дифракцией света на системе плоскостей (111) многослойной опаловой пленки.

Таким образом, полученные результаты экспериментально подтверждают высказанное выше предположение об определяющей роли верхнего слоя шаров  $\alpha\text{-SiO}_2$ , покрытого пленкой  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , в появлении аномалии Вуда в спектрах отражения гибридных структур.

По мере увеличения толщины пленки  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  спектральное положение аномалии Вуда сдвигается в длинноволновую сторону

спектра (рис. 6) и пересечение с брэгговским пиком происходит при меньших углах падения света. Толщина слоя  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  может быть подобрана так, что аномалия Вуда полностью подавляет брэгговский пик при угле падения близком к нормальному (рис. 6б). Кроме того, рис. 6 демонстрирует, что угловая зависимость положения пика аномалии Вуда (ВП) становится более слабой (выполаживается) с увеличением толщины слоя  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ .

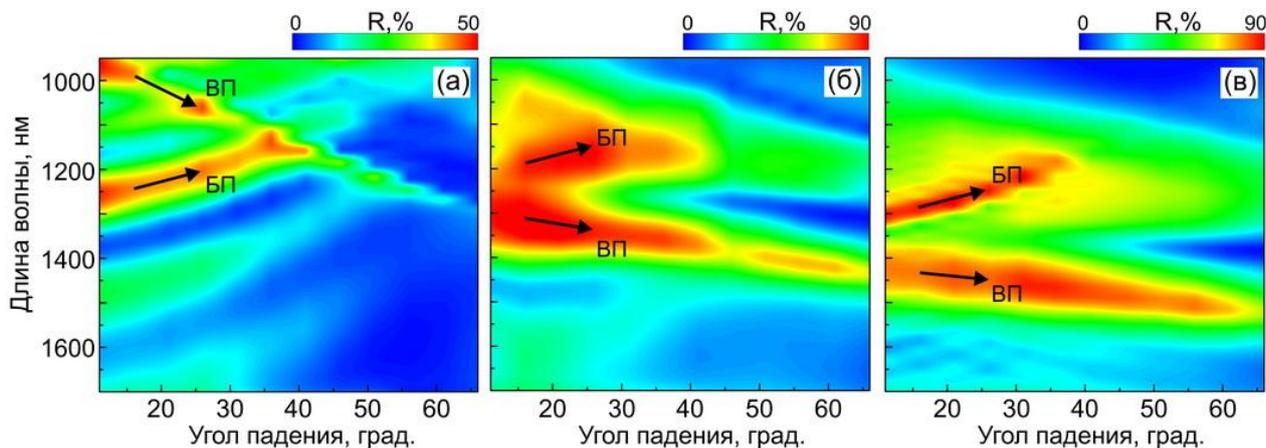


Рис. 6. Спектрально-угловые зависимости, измеренные для пленочных гибридных структур с разной толщиной слоя  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ : (а) – 25 нм, (б) – 100 нм, (в) – 150 нм; стрелки отмечают направления смещения брэгговского резонанса (БП) и аномалии Вуда (ВП) по мере увеличения угла падения света.

Для объяснения экспериментальных результатов была разработана качественная феноменологическая модель. Графическая схема условия возникновения аномалии Вуда приведена на рис. 7. Сплошная кривая 1 соответствует дисперсии света в воздухе

$$\omega_1(k_{\parallel}, k_z) = c\sqrt{k_{\parallel}^2 + k_z^2}. \quad (1)$$

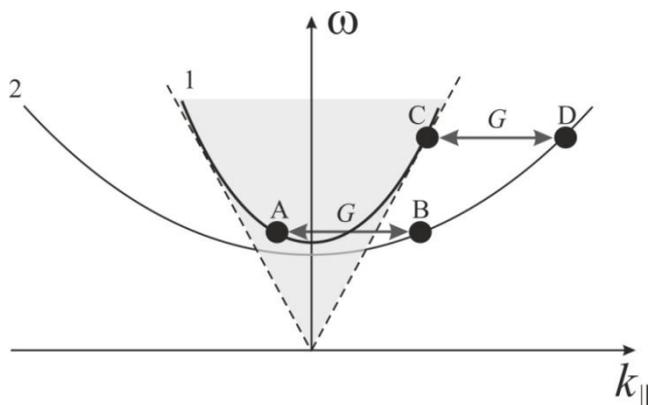


Рис. 7. Условие возникновения аномалии Вуда в оптическом спектре. По оси абсцисс отложен волновой вектор в плоскости структуры  $k_{\parallel}$ , по оси ординат – частота света  $\omega$ . Сплошной кривой 1 показана дисперсия световой волны в воздухе (1), серым цветом отмечена область светового конуса  $\omega < ck_{\parallel}$ . Кривая 2 соответствует дисперсии световой волны в слое  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , уравнение (2). Жирные точки А и В, С и D, соединенные стрелкой, иллюстрируют процесс брэгговской дифракции с изменением волнового вектора  $k_{\parallel}$  на величину вектора обратной решетки  $G$ .

Для простоты здесь будем рассматривать скалярную одномерную задачу, причем  $k_{\parallel} < 0$  и  $k_{\parallel} + G > 0$ . Кривая построена в зависимости от значений проекции волнового вектора в плоскости структуры  $k_{\parallel} = \omega \sin\theta / c$  при фиксированном значении нормальной компоненты волнового вектора  $k_z = \omega \cos\theta / c$ . Множество таких кривых при различных значениях  $k_z$  заполняют внутренность светового конуса,  $\omega < c/k_{\parallel}$ , отмеченную серым цветом на рис. 7. Положение точки на кривой 1 однозначно определяется частотой света и углом падения

$\theta = \arctan k_{\parallel}/k_z$  [см. формулу (1)]. Кривая 2 схематически воспроизводит дисперсию квазиволноводной моды, которая соответствует закону

$$\omega_2(k_{\parallel}) = \frac{c}{n^*} \sqrt{k_{\parallel}^2 + k_z^{*2}}. \quad (2)$$

В отличие от свободно распространяющихся в воздухе мод, квазиволноводная мода характеризуется фиксированным значением нормальной компоненты волнового вектора  $k_z^*$ , определяемого из условия возникновения стоячей волны. Кроме этого, в формуле (2) введен эффективный показатель преломления волноводного слоя  $n^*$ . Значение показателя преломления  $n^*$  и волнового вектора  $k_z^*$  может быть определено численно или в рамках моделей эффективной среды. Поскольку показатели преломления как опала, так и  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  существенно больше единицы, очевидно, что  $n^* > 1$ . Это означает, что дисперсия квазиволноводных мод может выходить за пределы светового конуса в воздухе, см. кривую 2 на рис. 7. Для пространственно-однородной в плоскости структуры смешивание между распространяющимися модами, дисперсия которых определяется формулой (1), и квазиволноводными модами, дисперсия которых подчиняется выражению (2), возможно лишь в случае, когда последние лежат внутри области светового конуса, так что их волновой вектор в плоскости мал,  $|k_{\parallel}| < \omega/c$ . Опаловая пленка, покрытая слоем халькогенида, обладает существенной пространственной неоднородностью в плоскости и характеризуется сильной периодической модуляцией диэлектрической проницаемости. Это делает возможным брэгговскую дифракцию света с изменением значения волнового вектора  $k_{\parallel}$  на вектор двумерной обратной решетки  $\mathbf{G}$ . Таким образом, возникает резонансное взаимодействие между распространяющимися модами в воздухе (точка А на рис. 7) и квазиволноводными модами (точка В на рис. 7). Условие резонанса определяется законами сохранения энергии и квазиимпульса,

$$\omega_1(k_z, k_{\parallel}) = \omega_2(k_{\parallel} + G). \quad (3)$$

В результате этого взаимодействия появляется радиационное затухание квазиволноводных мод, лежащих вне светового конуса, и возникают спектральные особенности – аномалии Вуда – в спектрах отражения [4].

Схема на рис. 7 позволяет делать качественные выводы, объясняющие результаты эксперимента. Во-первых, из графического решения уравнения (3) следует, что увеличение угла падения  $\theta$ , приводящее к росту волнового вектора в плоскости  $k_{\parallel}$ , смещает аномалию Вуда в длинноволновую спектральную область.

Действительно, из того факта, что расстояние между точками А и В по оси абсцисс задано величиной вектора двумерной дифракции  $\mathbf{G}$  и не зависит от угла падения, а положение точки В определяется кривой  $\omega_2(k_{\parallel})$ , следует, что нормальное падение ( $k_{\parallel}=0$ ) соответствует более высокой частоте, чем наклонное, в согласии с рис. 7.

Модель также позволяет понять экспериментально наблюдаемое ослабление угловой зависимости спектрального положения аномалии Вуда,

проявляющееся при больших толщинах пленки  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (см. рис. 7). Увеличение толщины пленки должно приводить к росту показателя преломления  $n^*$  эффективного волноводного слоя, сформированного верхним слоем опаловых сфер, покрытых  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ . В результате, зависимость (2) частоты квазिवолноводной моды от волнового вектора в плоскости становится менее резкой, величина  $|d\omega_2/dk_{||}|$  снижается, что обуславливает меньшую чувствительность положения аномалии Вуда к углу падения света  $\theta$ .

Отметим, что модель допускает также возникновение высокочастотных аномалий Вуда при тех же векторах обратной решетки  $\mathbf{G}$  (жирные точки С и D, соединенные стрелкой, на рис. 7). Их спектральное положение зависит от конкретного вида дисперсии квазिवолноводных мод. Чем кривая дисперсии более пологая, тем ниже по частоте можно наблюдать высокочастотную аномалию Вуда.

Для количественной оценки влияния параметров структуры опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  и условий эксперимента на спектральное положение аномалии Вуда, рассмотрим условие возникновения эффективной связи между падающим на структуру светом и квазिवолноводными модами (условие дифракции) в двухмерной гексагональной решетке:  $\mathbf{k}_2 = \mathbf{k} + \mathbf{G}$ , где  $\mathbf{k}_2 = \mathbf{k}_2 = \omega n^*/c$  – волновой вектор квазिवолноводной моды, а  $\mathbf{G} = m_1 \mathbf{b}_1 + m_2 \mathbf{b}_2$  ( $m_1$  и  $m_2$  – целые числа) – вектора обратной решетки опала в плоскости гофрированного интерфейса;  $\mathbf{b}_1$  и  $\mathbf{b}_2$  – это элементарные вектора решетки, для гексагональной решетки равные  $|\mathbf{b}_1| = |\mathbf{b}_2| = 4\pi/\sqrt{3}d$ . При этом величина  $\mathbf{k}$  может быть представлена в виде суммы  $\mathbf{k} = \mathbf{k}_{||} + \mathbf{k}_z$ , где  $\mathbf{k}_{||}$  – составляющая волнового вектора  $\mathbf{k}$  в плоскости волноводного слоя, а  $\mathbf{k}_z$  – его составляющая в перпендикулярном направлении.

После несложных математических преобразований вышеприведенных формул, можно получить выражение зависимости спектрального положения аномалии Вуда от геометрических параметров структуры и условий эксперимента:

$$\lambda_m = \frac{2\pi}{G} \frac{\sqrt{(\sin\theta \cos\varphi)^2 + (n^{*2} - \sin^2\theta)(1+a)} - \sin\theta \cos\varphi}{1+a}. \quad (4)$$

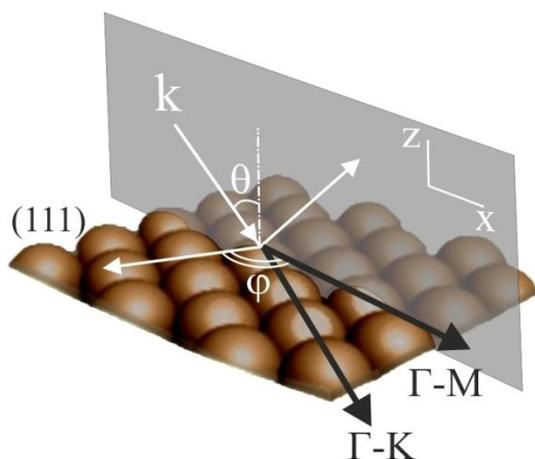


Рис. 8. Схематическое изображение поверхности гибридной структуры опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ .

Здесь  $\varphi$  – азимутальный угол, отсчитываемый от  $\Gamma$ -М направления в плоскости интерфейса структуры (см. рис. 8) и определяющий по отношению к нему возможные направления вектора обратной решетки  $\mathbf{G}$ , а  $a = (k_z/G)^2$ .

Формула (4) была использована для описания экспериментальных данных спектрально-угловых зависимостей гибридных структур опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  с различными толщинами слоя  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ . Подгонка осуществлялась методом наименьших квадратов. Величины  $n^*$  и  $k_z$

служили подгоночными параметрами.  $G$  и  $\varphi$  были константами. Для случая рассеяния на угол  $\varphi=180^\circ$  экспериментальные точки на рис. 9 наилучшим образом ложатся на кривые, описываемые с помощью (4). Полученные значения подгоночных параметров  $n^*$  и  $k_z$ , приведены в подписи к рис. 9.

Таким образом, исходя из классического дифракционного подхода, мы получили формулу, определяющую зависимость спектрального положения аномалии Вуда от геометрических параметров гибридной структуры и условий эксперимента, на основании которой были проделаны численные оценки применительно к полученным экспериментальным результатам.

**В четвертой главе** рассмотрены примеры использования различных конфигураций гибридных структур опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  для контроля и управления световыми потоками с помощью индуцированного внешними воздействиями фазового перехода аморфное-кристаллическое состояние в пленке  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ .

При соответствующем подборе условий внешнего воздействия (температура, лазерный импульс, приложение внешнего электрического поля) фазовый переход можно сделать обратимым в нано- и субнаносекундном масштабе времени. В этих условиях аномалия Вуда будет работать как сверхбыстрый затвор для световых потоков, который может “открывать” или “закрывать” проявление дифракционных эффектов в спектрах отражения, возникающих в результате конструктивной интерференции света в трехмерно-упорядоченной пленке опала.

На рис. 10 представлены результаты исследования управления оптическим откликом гибридной структуры с помощью воздействия импульсным лазером: кривая 1 - спектр чистой пленки опала; кривая 2 – спектр исходной аморфной гибридной структуры опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  с семью опаловыми монослоями и 100-нанометровой пленкой  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ ; кривая 3 – спектр, измеренный с кристаллической области, образовавшейся на поверхности гибридной структуры после лазерного воздействия.

Согласно выражению (4) при сильном изменении показателя преломления пленки  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  при фазовом переходе спектральное положение аномалии Вуда смещается в длинноволновую сторону (за пределы чувствительности экспериментальной установки) и спектр отражения кристаллической области гибридной структуры (кривая 3) определяется, так же

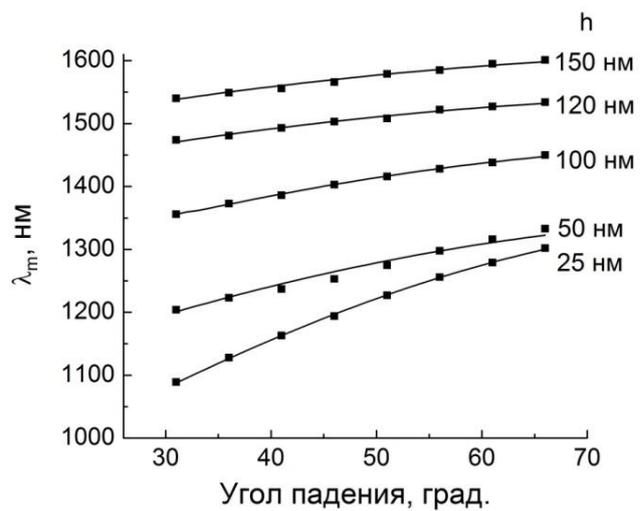


Рис. 9. Экспериментальные зависимости положения максимума аномалии Вуда  $\lambda_m$  от угла падения света (квадраты) и соответствующие подгонки по формуле (4) (сплошные кривые) для гибридных структур с различной толщиной слоя  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  ( $h$ ). Полученные подгоночные параметры ( $n^*$  и  $a$ ) следующие: ( $h=25$  нм,  $n^*=1.62$ ,  $a=0.12$ ;  $h=50$  нм,  $n^*=2.31$ ,  $a=0.56$ ;  $h=100$  нм,  $n^*=3.08$ ,  $a=0.97$ ;  $h=120$  нм,  $n^*=4.19$ ,  $a=1.87$ ;  $h=150$  нм,  $n^*=4.4$ ,  $a=1.9$ ).

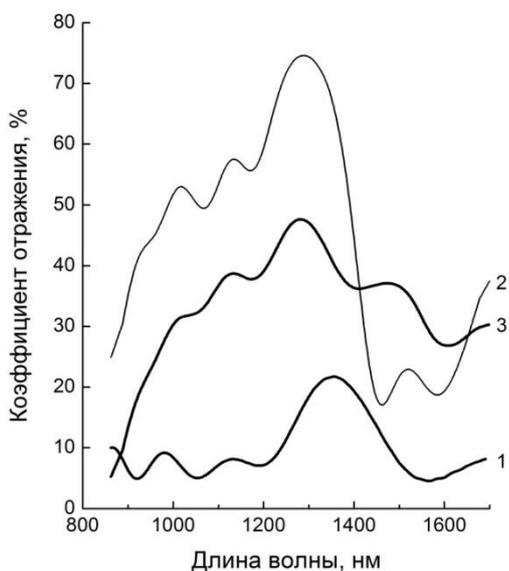


Рис. 10. Спектры отражения синтезированных образцов: 1 – спектр брэгговского отражения семислойной пленки опала; 2 – спектр отражения гибридной структуры со 100-нанометровой пленкой  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  в аморфной состоянии и семью слоями опала; 3 – спектр отражения гибридной структуры опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , измеренный с области, подвергнутой лазерному воздействию (пленка  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  в кристаллическом состоянии). Все спектры измерены при угле падения света  $\theta=11^\circ$ .

как и спектр 1, дифракцией света на трехмерно-упорядоченной решетке опаловой пленки.

Спектры 1 и 3 на рис. 10 заметно отличаются по форме. Для интерпретации этого факта необходимо учесть, что влияние верхнего слоя шаров  $\alpha\text{-SiO}_2$ , покрытого пленкой  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , на оптический отклик гибридной структуры опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  обусловлено сочетанием двух главных факторов: во-первых, пространственной периодичностью слоя в латеральном направлении (именно с этим свойством

связаны явление двумерной дифракции и возникновение аномалии Вуда); во-вторых, изменением фазы световой волны на границах пленки  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  и дополнительным набегом фазы на ее толщине. Последнее может приводить к существенному изменению формы контура отражения вплоть до его инвертирования.

Наблюдаемое нерезонансное увеличение коэффициента отражения в спектре отожженной структуры связано с

высоким значением показателя преломления пленки  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  в кристаллическом состоянии и увеличением дополнительного рассеяния на образовавшихся после отжига кристаллитах. Спад в области длин волн меньше 1000 нм обусловлен увеличением коэффициента поглощения.

Резонансный характер аномалии можно также использовать для получения на основе гибридной структуры опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  материала, оптический контраст которого в несколько раз больше, чем у чистых пленок  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ .

Рассмотрим гибридную структуру опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  следующей конфигурации: 1 монослой опала, пленка  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  толщиной 150 нм. В отличие от многослойной структуры, где пленка опала мешает проявлению аномалии Вуда при падении света со стороны подложки, в однослойной структуре таких проблем нет. Поэтому будем рассматривать оба случая: падение света со стороны пленки и подложки.

На рис. 11 представлены спектры отражения от монослоя шаров  $\alpha\text{-SiO}_2$ , покрытого пленкой  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  толщиной 150 нм, измеренные со стороны пленки (кривая 1) и со стороны подложки (кривая 2). Видно, что интенсивный пик аномалии Вуда с максимумом на длине волны 1500 нм наблюдается в обоих случаях. Для определения оптического контраста гибридная структура опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  была подвергнута воздействию лазерного излучения. Область

порядка диаметра лазерного пучка (200 мкм) была переведена в кристаллическое состояние. Кривые 3 и 4 – спектры отражения структуры, измеренные от закристаллизованной области образца со стороны пленки и подложки, соответственно. Как и для гибридной структуры с семью опаловыми монослоями, после лазерного воздействия спектральное положение аномалии Вуда смещается в длинноволновую сторону. Спектр отражения как со стороны пленки (кривая 3), так и со стороны подложки (кривая 4) определяется дифракцией света на двумерной решетке опалового монослоя.

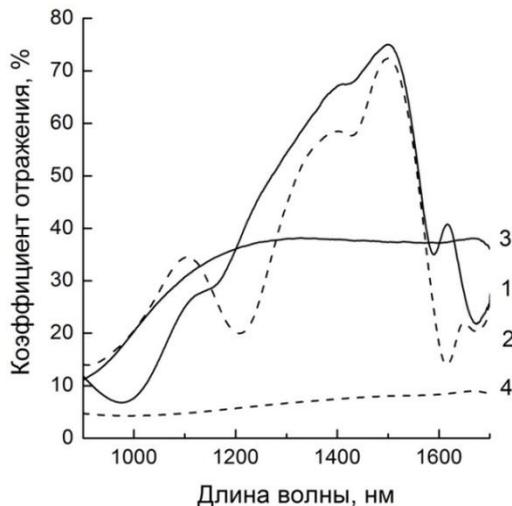


Рис. 11. Спектры отражения монослоя шаров  $\alpha\text{-SiO}_2$ , покрытого пленкой  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  толщиной 150 нм: 1 – спектр отражения исходного образца, измеренный со стороны пленки; 2 – спектр отражения исходного образца, измеренный со стороны подложки; 3 – спектр отражения, измеренный с кристаллического пятна образца после лазерного воздействия со стороны пленки; 4 – спектр отражения, измеренный с кристаллического пятна образца после лазерного воздействия со стороны подложки. Все спектры были измерены с одной точки образца при угле падения света  $\theta=11^\circ$ . Для удобства сравнения спектры, измеренные со стороны пленки, обозначены сплошными кривыми, со стороны подложки – пунктирными.

Сравнение кривых 3 и 4 показывает, что в спектре отражения гибридной структуры, измеренном со стороны подложки, отсутствует составляющая рассеяния на кристаллитах пленки  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , что значительно увеличивает оптический контраст между аморфным и кристаллическим состояниями структуры. Так, оптический контраст ( $C=1-R_c/R_a$ , где  $R_a$  – коэффициент отражения в аморфном состоянии,  $R_c$  – коэффициент отражения в кристаллическом состоянии [5]) рассматриваемой гибридной структуры опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  на длине волны 1500 нм со стороны пленки составил  $\sim 0.5$  (сплошные кривые), со стороны подложки  $\sim 0.9$  (пунктирные кривые), в то время как у чистых пленок  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  оптический контраст составляет  $\sim 0.3$ .

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ.

1. Показано, что метод термического напыления в вакууме успешно применим для создания однородных по составу и равномерных по толщине слоев  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  на поверхности шаров  $\alpha\text{-SiO}_2$ , формирующих опаловую пленку.

2. Методами атомно-силовой и сканирующей электронной микроскопии установлено, что поверхность гибридной структуры (пленка опала, покрытая слоем  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ ) гексагонально-упорядочена, т.е. представляет собой двумерную дифракционную решетку высокого качества. Этот вывод подтверждается наличием ярко-выраженных гексагонально-упорядоченных рефлексов в картине двумерной оптической дифракции от гибридной структуры.

3. Методами рентгеновской дифракции и рамановского рассеяния установлено, что исходные пленки  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  находятся в аморфном состоянии;

после отжига при температуре выше 170 °С пленки  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  переходят в кристаллическое состояние (структура ГЦК).

4. Экспериментально установлено, что спектры отражения фотонно-кристаллических гибридных структур опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  формируются, в основном, суперпозицией особенностей двух типов: брэгговской полосой, обусловленной 3D дифракцией света на периодической системе плоскостей [111] опаловой пленки, и дифракционной аномалией (аномалией Вуда), возникающей вследствие резонансного взаимодействия между падающим светом и квазиволноводными модами, возбуждающимися в поверхностном слое гибридной структуры.

5. Исследован оптический отклик гибридных структур опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  с различным количеством опаловых монослоев (1 и 7 слоев), и показана определяющая роль верхнего слоя шаров  $\alpha\text{-SiO}_2$  в многослойных пленках опала, покрытых  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , в формировании аномалии Вуда в спектрах отражения гибридных структур.

6. Экспериментально установлено, что спектральное положение аномалии Вуда в фотонно-кристаллической структуре опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  сдвигается в длинноволновую область при увеличении угла падения света.

7. Установлено, что с увеличением толщины слоя  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  положение аномалии Вуда в гибридной структуре сдвигается в длинноволновую область спектра. По мере увеличения толщины слоя  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  происходит выполаживание спектрально-угловой зависимости.

8. Исследованы азимутальные зависимости спектров отражения гибридных структур опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ . Показано, что форма контура отражения в окрестности аномалии Вуда сохраняется для эквивалентных направлений при повороте образца вокруг оси перпендикулярной плоскости (111) опала на угол  $60^\circ$ .

9. Анализ спектрально-угловых зависимостей аномалий Вуда основан на феноменологическом подходе, в котором свойства поверхностного волноводного слоя описываются эффективным показателем преломления. Определены эффективные показатели преломления ( $n^*$ ) волноводного слоя для структур с разной толщиной слоя  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ . Рассчитаны характеристики квазиволноводных мод: величина поперечной компоненты волнового вектора ( $k_z$ ), угол между волновым вектором квазиволноводной моды и вектором обратной решетки.

10. Исследовано управление оптическим откликом гибридной структуры опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (7 монослоев опала, пленка  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  толщиной 100 нм) с помощью температуры и лазерного излучения. Показано, что аномалия Вуда работает как затвор для световых потоков, который может “открывать” или “закрывать” проявление дифракционных эффектов в спектрах отражения, возникающих в результате конструктивной интерференции света в трехмерно-упорядоченной пленке опала.

11. Продемонстрировано, что оптический контраст гибридной структуры (1 монослой опала, пленка  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  толщиной 150 нм) на длине волны 1500 нм составляет  $\sim 0.9$ , что в несколько раз выше оптического контраста чистых пленок  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , которые используются в современных носителях информации (DVD и Blu-ray диски).

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах:

1. С.А. Грудинкин, Б.Т. Мелех, В.И. Бахарев, **С.А. Яковлев**, В.Г. Голубев. Оптические свойства халькогенидных стеклообразных полупроводников системы Ge-Se-Te // Сборник трудов VII Международной конференции “Аморфные и микрокристаллические полупроводники”, Санкт-Петербург. – 2010. – С.43-44.
2. С.А. Фефелов, Л.П. Казакова, **С.А. Яковлев**, С.А. Козюхин, К.Д. Цэндин. Напряжение переключения и напряжение поддержки, характеризующие эффекты переключения и памяти в тонких пленках халькогенидных стеклообразных полупроводников состава  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  // Труды 1-го Международного симпозиума "Физика межфазных границ и фазовые переходы" (МГФП-1), Ростов-на-Дону. – 2011. – Т.1. – С.155-157.
3. **С.А. Яковлев**. Структурные и оптические свойства пленок  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , полученных термическим испарением // Тезисы докладов конференции по физике и астрономии для молодых ученых Санкт-Петербурга и Северо-запада “Физика.СПб”, Санкт-Петербург. – 2011. – С.62-63.
4. **С.А. Яковлев**. Гибридные структуры опал- $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ : получение, структурные и фотонно-кристаллические свойства // Тезисы докладов молодых ученых ”Международная зимняя школа по физике полупроводников”, Санкт-Петербург. – 2012. – С.23-24.
5. **С.А. Яковлев**, А.Б. Певцов, П.Ф. Фомин, Б.Т. Мелех, Е.Ю. Трофимова, Д.А. Курдюков, В.Г. Голубев. Управление оптическим откликом пленочных гибридных структур опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  // Письма в журнал технической физики. – 2012. – Т.38, No.16. – С.78-86.
6. **С.А. Яковлев**, А.Б. Певцов, Б.Т. Мелех, Е.Ю. Трофимова, Д.А. Курдюков, В.Г. Голубев. Управление оптическим откликом пленочных гибридных структур опал/халькогенидный стеклообразный полупроводник // Сборник трудов всероссийской молодежной конференции “Опалоподобные структуры”, Санкт-Петербург. – 2012. – С.131-133.
7. Е.Ю. Трофимова, **С.А. Яковлев**, С.А. Грудинкин, А.В. Медведев, Д.А. Курдюков, В.Г. Голубев. Монодисперсные мезопористые сферы кремнезема, синтез, функционализация, применение в биомедицине и получение фотонных кристаллов с иерархической структурой пор // Сборник трудов всероссийской молодежной конференции “Опалоподобные структуры”, Санкт-Петербург. – 2012. – С.141-145.
8. С.А. Гуревич, Д.А. Явсин, В.М. Кожевин, **С.А. Яковлев**, М.А. Яговкина, Б.Т. Мелех, А.Б. Певцов. Получение аморфных пленок  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  методом лазерного электродиспергирования // Сборник трудов VIII Международной конференции “Аморфные и микрокристаллические полупроводники”, Санкт-Петербург. – 2012. – С.243-244.
9. **С.А. Яковлев**, А.Б. Певцов, Б.Т. Мелех, Е.Ю. Трофимова, Д.А. Курдюков, М.А. Яговкина, В.Г. Голубев. Синтез, структурные и оптические свойства пленочных гибридных структур опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  // Сборник трудов VIII

Международной конференции “Аморфные и микрокристаллические полупроводники”, Санкт-Петербург. – 2012. – С.296-297.

10. N. Almasov, N. Bogoslovskiy, N. Korobova, S. Kozyukhin, S. Fefelov, L. Kazakova, **S. Yakovlev**, K. Tsendin, N. Guseinov. Switching and memory effects in partly crystallized amorphous  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  films in a current controlled mode // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2012. – V.358, No.23. – P.3299-3303.

11. E. Yu. Trofimova, D.A. Kurdyukov, **S.A. Yakovlev**, D.A. Kirilenko, Yu.A. Kukushkina, A.V. Nashchekin, A.A. Sitnikova, M.A. Yagovkina, V.G. Golubev. Monodisperse spherical mesoporous silica particles: Fast synthesis procedure and fabrication of photonic-crystal films // Nanotechnology. – 2013. – V.24, No.15. – P.155601-1-11.

12. A.B. Pevtsov, A.N. Poddubny, **S.A. Yakovlev**, D.A. Kurdyukov, V.G. Golubev. Light control in  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ -coated opaline photonic crystals mediated by interplay of Wood anomalies and 3D Bragg diffraction // Journal of Applied Physics. – 2013. – V.113, No.14. – P.144311-1-7.

13. M.M. Voronov, **S.A. Yakovlev**, P.V. Fomin, A.B. Pevtsov, D.A. Kurdyukov, V.G. Golubev. Wood anomalies in hybrid structures based on chalcogenide-coated opal photonic crystals // Proc. 21th Int. Symp. “Nanostructures: Physics and Technology”, St.Petersburg. – 2013. – P.198-199.

14. А.Б. Певцов, **С.А. Яковлев**, А.Н. Поддубный, М.М. Воронов, Б.Т. Мелех, Д.А. Курдюков, В.Г. Голубев. Аномалии Вуда в пленочных гибридных фотонно-кристаллических структурах опал/ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  // Тезисы докладов XI Российской конференции по физике полупроводников, Санкт-Петербург. – 2013. – С.

15. M.M. Voronov, A.B. Pevtsov, **S.A. Yakovlev**, D.A. Kurdyukov, V.G. Golubev. Diffraction anomalies in hybrid structures based on chalcogenide-coated opal photonic crystals // arXiv:1306.3153

#### Цитируемая литература

1. J.D. Joannopoulos, S.G. Johnson, J.N. Winn, R.D. Meade. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. – Princeton, Princeton University Press, 2008, 304 p.

2. S. Raoux, W. Welnic, D. Ielmini. Phase change materials and their application to nonvolatile memories // Chemical Reviews. – 2010. – V.110, – P.240-267.

3. Е.Ю. Трофимова, А.Е. Алексенский, С.А. Грудинкин, И.В. Коркин, Д.А. Курдюков, В.Г. Голубев. Влияние предварительной обработки тетраэтоксисилана на синтез коллоидных частиц аморфного диоксида кремния // Коллоидный журнал. – 2011. – Т.73, No.4. – С.535-539.

4. A. Hessel, A.A. Oliner. A new theory of Wood’s anomalies on optical gratings // Applied Optics. – 1965. – V.4. – P.1275–1297.

5. E.R. Meinders, A.V. Mijiritskii, L. van Pieterse, M. Wutting. Optical Data Storage: Phase-change media and recording (Philips Research Book Series). – Springer, Dordrecht, Netherlands, 2006, 173 p.