

На правах рукописи

ТЕТЕРИН ПЕТР ЕВГЕНЬЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ
СТРУКТУРНЫХ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ
ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СЛОЕВ МОНОХАЛЬКОГЕНИДОВ
РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ,
ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ
ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ОСАЖДЕНИЯ**

01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор



Москва 2013

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете
«МИФИ»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Неволин Владимир Николаевич,
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Яковлев Виктор Борисович, Национальный
исследовательский университет «МИЭТ»

доктор технических наук, профессор
Шляпин Анатолий Дмитриевич, Московский
государственный индустриальный университет

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт
ядерной физики им. Д.В. Скобельцына
Московского государственного университета
им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Защита диссертации состоится «22» мая 2013 года в 16 часов 30 минут на
заседании Диссертационного совета Д212.130.04 при Национальном
исследовательском ядерном университете МИФИ по адресу:
115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ «МИФИ»

Автореферат разослан «__» апреля 2013 года

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном
экземпляре, заверенном печатью организации.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор



И.И. Чернов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Требования, предъявляемые к быстродействию, энергопотреблению, информационной емкости современных электронных устройств неуклонно растут. Эти показатели непосредственно зависят как от физико-химических свойств материалов, используемых в электронной промышленности, так и от технологических процессов, используемых для их получения. Поэтому в последние десятилетия круг химических элементов, задействованных в электронной промышленности, расширился почти на всю периодическую систему элементов.

Исследования редкоземельных полупроводников ведутся интенсивно в течение нескольких десятилетий. Это связано с особенностями электронной структуры редкоземельных полупроводников. При образовании соединений *f*-оболочки редкоземельных металлов образуют примесную зону с концентрацией $\sim 10^{26} \text{ м}^{-3}$. Такие уровни могут попасть в запрещенную зону полупроводника и выступать в качестве “примесных” уровней. Этот факт является уникальным, поскольку в редкоземельных полупроводниках создать столь большую концентрацию локальных примесных уровней не представляется возможным. Именно благодаря этой особенности электронной структуры редкоземельные полупроводники обладают уникальными оптическими и кинетическими свойствами, а также способны претерпевать различные фазовые переходы. С появлением новых экспериментальных возможностей круг задач по исследованию этих материалов становится все шире.

Большой интерес у исследователей вызывают магнитные полупроводниковые соединения, обладающие при определенных условиях ферромагнитной упорядоченной структурой, что приводит к спиновой поляризации носителей тока. Такие материалы являются перспективными для источников спин-поляризованных электронов и спиновых фильтров в устройствах микроэлектроники и спинтроники. Монохалькогениды европия и соединение EuS, в частности, хотя и обладают упорядочением при низких температурах, тем не менее

пригодны для создания модельных сред для совершенствования устройств спинтроники, таких, как спиновые фильтры.

Самарий – элемент, наиболее химически близкий к европию, поэтому его халькогениды обладают близкими к халькогенидам европия физическими свойствами, имея при этом коренные отличия. Например, монохалькогениды самария обладают фазовым переходом полупроводник – металл под действием давления. Такой фазовый переход мог бы лечь в основу различных быстродействующих переключающих устройств. В этой связи актуальной является задача получения халькогенидов самария и европия с заданными свойствами.

Целью настоящей работы явилось определение физических условий формирования тонкопленочных слоев моносulfидов европия и самария с заданными физическими свойствами.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- исследованы эффекты вакуумного и термического отжига на физические свойства тонкопленочных слоев;
- проведена оптимизация параметров процессов формирования структур с необходимыми функциональными свойствами для создания переключающих (логических, запоминающих) устройств, а также устройств спинтроники.

Научная новизна

- Впервые продемонстрирован непрерывный фазовый переход в тонкопленочных слоях моносulfида самария в зависимости от температуры отжига пленки.
- Обнаружен эффект переключения проводимости в зависимости от давления в тонкопленочных слоях SmS.
- Установлены условия формирования металлической фазы в тонкопленочных слоях моносulfида самария.

- Предложена оригинальная методика формирования тонкопленочных слоев EuS, позволившая получать стехиометрические слои высокого качества.
- Предложена методика формирования роста тонкопленочных слоев SmS, впервые позволяющая получить пленки в металлической фазе непосредственно в результате осаждения.

Практическая значимость

Проведенные исследования условий формирования тонкопленочных слоев EuS могут существенно облегчить создание модельных устройств спинтроники для отработки физических принципов функционирования этих систем.

Полученные результаты исследований фазового перехода в тонкопленочных слоях SmS могут помочь в создании новых переключающих устройств – устройств памяти, тензодатчиков, транзисторов на фазовых переходах. Разработанная методика роста металлических пленок и результаты оптимизации схем лазерного отжига может помочь в создании технологического процесса записи структур на SmS. Часть результатов, полученных в ходе выполнения работ, была защищена патентами Российской Федерации.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработанная методика выращивания EuS в атмосфере серы, которая позволяет получать поликристаллические пленки с избытком серы, при этом термический и лазерный отжиги приводят к формированию строго стехиометрических пленок высокого качества.
2. Установленная зависимость относительного количества серы в пленке сульфида европия от плотности энергии лазерного излучения, полученной при лазерном отжиге насыщенных серой слоев.
3. Предложенная методика выращивания SmS, позволяющая получить тонкопленочные слои материала в металлической фазе на различных подложках непосредственно в результате осаждения, а также слои материала в полупроводниковой фазе.

4. Результаты исследования напряженного состояния пленок, формирующегося за счет высокой энергии частиц в процессе импульсного лазерного осаждения
5. Физическая модель переключающего устройства на основе SmS и экспериментально продемонстрированный эффект переключения проводимости в образце SmS/Si(100).

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов и выводов обеспечена использованием современных экспериментальных методов исследований, детальным рассмотрением физических явлений и процессов, определяющих формирование свойств тонкопленочных слоев сульфидов редкоземельных металлов, а также подтверждением ряда полученных результатов данными, известными из литературы.

Личный вклад соискателя

Соискатель участвовал в создании вакуумной установки по росту сульфидов методом импульсного лазерного осаждения, участвовал в разработке способов и методик роста тонкопленочных слоев. Проводил полный цикл работ по подготовке, осаждению и отжигу пленок. Осуществлял планирование экспериментов с использованием описанных в работе методик, производил обработку и обсчет результатов измерений. Проводил измерения и расчет напряженного состояния пленок.

По материалам диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 4 статьи в научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, получено 2 патента РФ.

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы. Работа изложена на 123 страницах, содержит 52 рисунка, 5 таблиц и список цитируемой литературы из 108 наименований.

Апробация результатов работы

Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных семинарах и конференциях: научная сессия НИЯУ МИФИ - 2009, 2010, 2011 гг.); 8-ой и 9-ой Курчатовская молодежная школа (Москва, Россия, 2010 и 2011 гг.); Национальная конференция по росту кристаллов (Москва, Россия, 2010 г.); Nano and Giga Challenges in Electronics, Photonics and Renewable Energy (Москва, Россия, 2011 г.); 54-я научная конференция МФТИ (Долгопрудный, Россия, 2011); E-MRS Spring Meeting 2012 (Страсбург, Франция, 2012 г.).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования структурных и функциональных свойств монокристаллов редкоземельных металлов; сформулированы цель работы и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор литературных источников и анализ состояния исследований монокристаллов редкоземельных металлов в Российской Федерации и за рубежом. Проанализированы методики выращивания тонкопленочных слоев EuS и SmS. Для SmS описаны способы осуществления фазового перехода полупроводник – металл. По результатам анализа литературы обоснована актуальность темы диссертационной работы.

Во второй главе приведено описание используемых в работе методик синтеза, модификации и анализа образцов: импульсного лазерного осаждения (ИЛО) из стехиометрических мишеней, а также реактивного ИЛО; рассмотрены основные физические и химические принципы этих методик, указаны их преимущества и недостатки, обосновано их применение для выращивания слоев халькогенидов редкоземельных металлов. Приведен обзор физических принципов используемых методик анализа исследуемых образцов: рентгеноструктурного анализа, просвечивающей электронной микроскопии, резерфордского обратного рассеяния, оптической спектрофотометрии, метода измерения тем-

пературных зависимостей электрофизических характеристик. Дано краткое описание использованных установок.

В третьей главе представлены результаты исследования кристаллической структуры, состава и оптического поглощения тонких пленок EuS на подложках Si(100) и SiO₂, полученных методом импульсного лазерного осаждения.

Результаты исследования пленок EuS, полученных методом ИЛО из стехиометрических мишеней в вакууме с помощью Резерфордского обратного рассеяния (РОР) свидетельствуют об отклонении состава исходных пленок от стехиометрического, а именно, о недостатке серы (Eu:S=1,15:1). Недостаток серы в образцах можно устранить, например, путем предварительного создания атмосферы паров серы в камере осаждения распылением мишени серы, чередованием импульсов по стехиометрической мишени EuS и мишени S, или с помощью напуска в камеру H₂S. Как показали проведенные эксперименты при создании атмосферы серы, а также при напуске сероводорода с парциальным давлением $\sim 10^{-2}$ Па, во время осаждения EuS в атмосфере паров серы в пленке образуется ее значительный избыток (Eu:S=1:1,5÷2).

В процессе вакуумного отжига происходит десорбция серы, при этом, согласно данным рентгеновской дифракции, улучшается качество слоев EuS. По данным РОР, стехиометрический состав пленки нормализуется после вакуумного отжига при $T = 600$ °С в течение 30–60 минут и соответствует Eu : S = 1 : 1 (рис. 1). В процессе вакуумного отжига наряду с десорбцией серы происходит рост кристаллитов. Оценка размера зерна по формуле Шеррера дает $D = 50$ нм, что по порядку величины сравнимо с толщиной пленки.

Управление фазовым составом пленок EuS также может быть осуществлено с помощью лазерного отжига. В процессе наносекундного импульсного лазерного отжига также происходит десорбция серы. На рис. 2 показано эффективное изменение количества серы относительно европия в зависимости от плотности энергии лазерного излучения, полученное по данным РОР. Из зависимости можно заключить, что при плотности энергии 8 кДж/м² стехиометри-

ческий состав пленок нормализуется и образуется стехиометрический моносульфид европия.

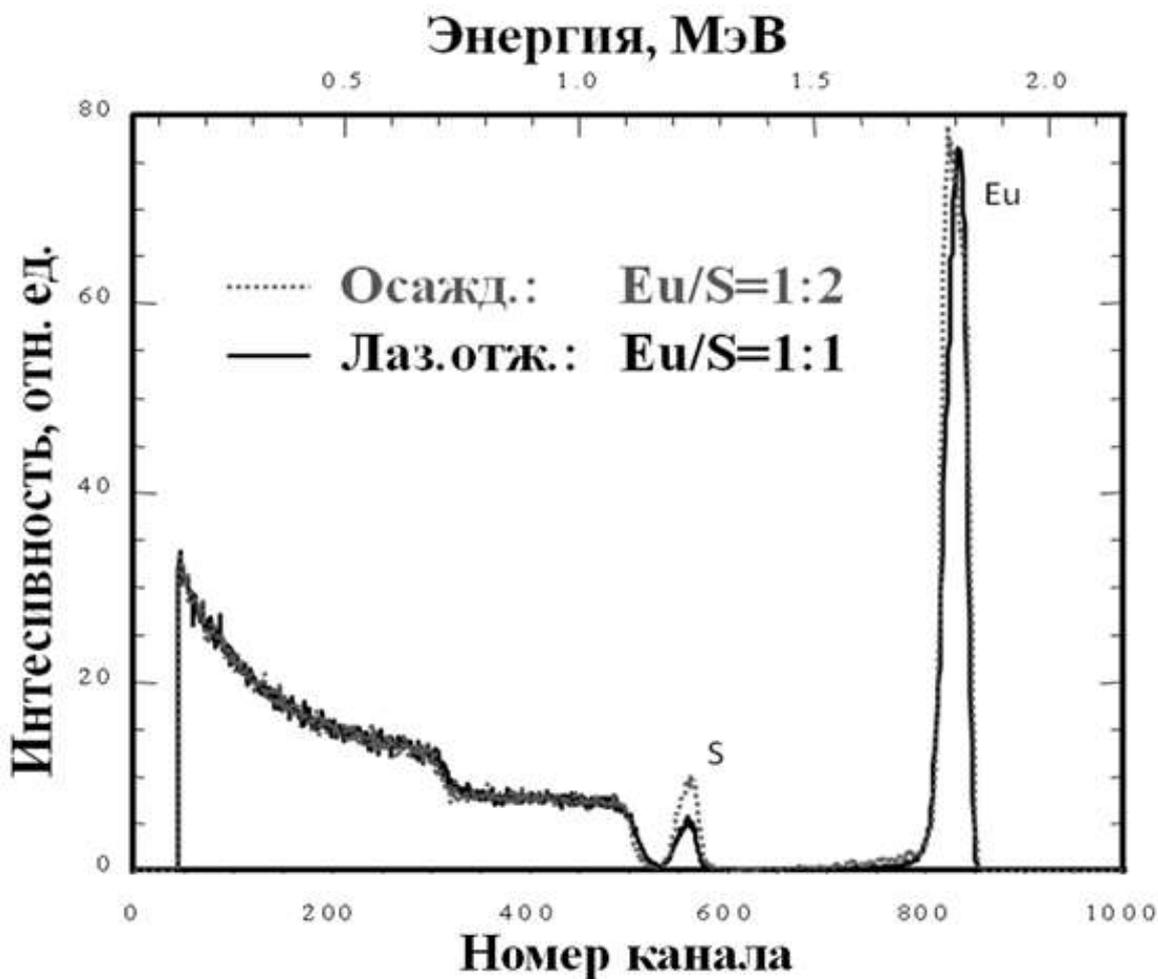


Рис. 1. Спектры РОР образцов EuS: осажденного (показан пунктирной линией) и отожженного лазером (показан сплошной линией)

На рис. 3 показаны спектры оптического поглощения в пленках EuS. Полученная из анализа оптических спектров поглощения оценка ширины запрещенной зоны $E_g \sim 3,4$ эВ для лазерно-отожженных слоев EuS совпадает с литературными данными для запрещенной зоны объемного материала, тогда как для термически отожженных слоев оценочная ширина запрещенной зоны составляет $E_g \sim 3,9$ эВ.

В четвертой главе приведены результаты исследования структурных, оптических, электрофизических и функциональных свойств лазерно-осажденных тонкопленочных слоев SmS на различных подложках.

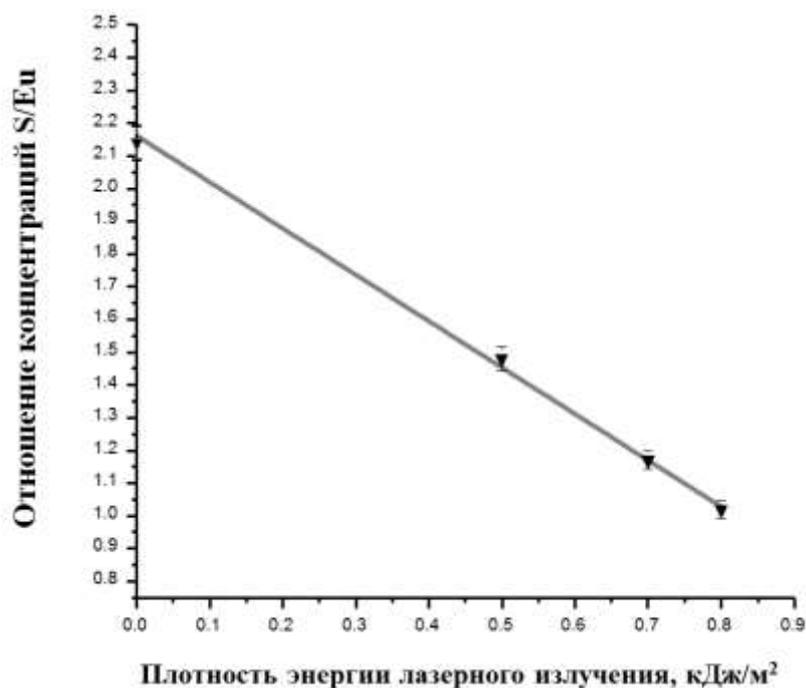


Рис. 2. Зависимость относительного количества серы к европию от плотности энергии лазерного излучения

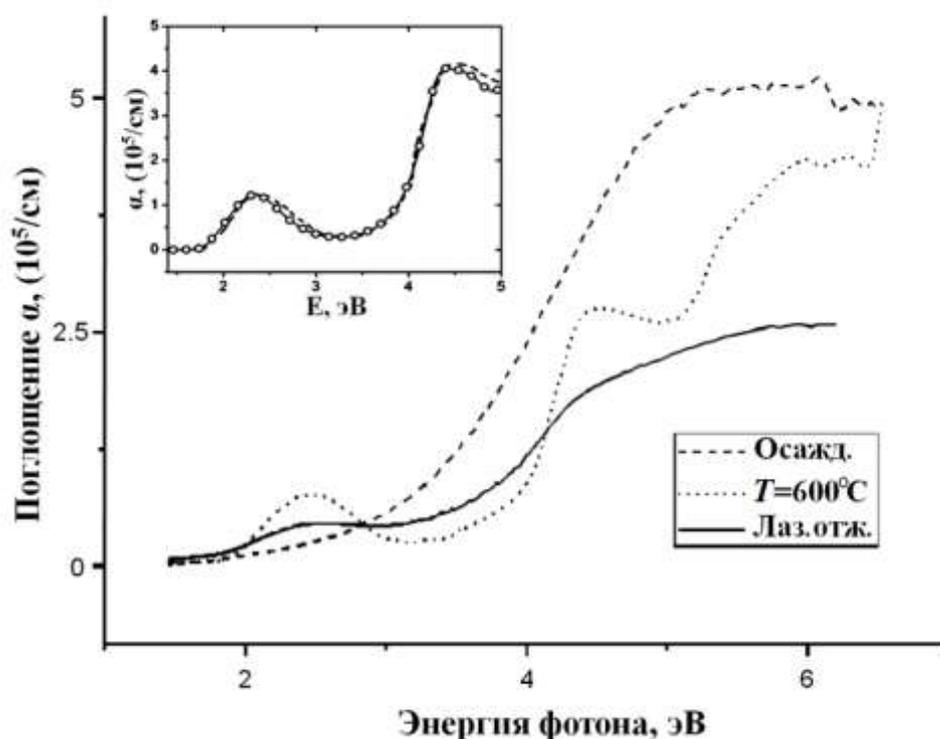


Рис. 3. Сравнительные данные по оптическому поглощению тонкопленочного образца EuS на кварце (прямые переходы): штриховой линией показан спектр осажденного образца без отжига, пунктирной линией – спектр термически отожженного образца (время отжига 30 мин), сплошной – лазерно-отожженного. На вставке показаны спектры пленок, описанных в [O'Mahony et al., Thin Solid Films. – 2005. – V. 488 – p. 200-203]

Выращенные методом ИЛО из стехиометрической мишени при комнатной температуре пленки SmS на подложках Si(100) представляли собой сильно текстурированные поликристаллические пленки в металлической фазе с параметром решетки $a = 0,5693$ нм. При повышении температуры подложки до $T = 150$ °C пленка представляет собой смесь металлической и полупроводниковой фазы. Отжиг пленок SmS, выращенных на Si, при $T = 600$ °C и $P \sim 10^{-5}$ Па приводит к значительному изменению параметров решетки до $a = 0,5926$ нм и переходу в полупроводниковую фазу (рис. 4), а также к уменьшению ширины брэгговских линий. На дифрактограммах исходного и отожженных при $T = 500$ °C и 600 °C образцов видны только фаза SmS и узкие рефлексы от Si подложки, в то время как переход к отжигу при 700 °C приводит к появлению новой фазы Sm₃S₄.

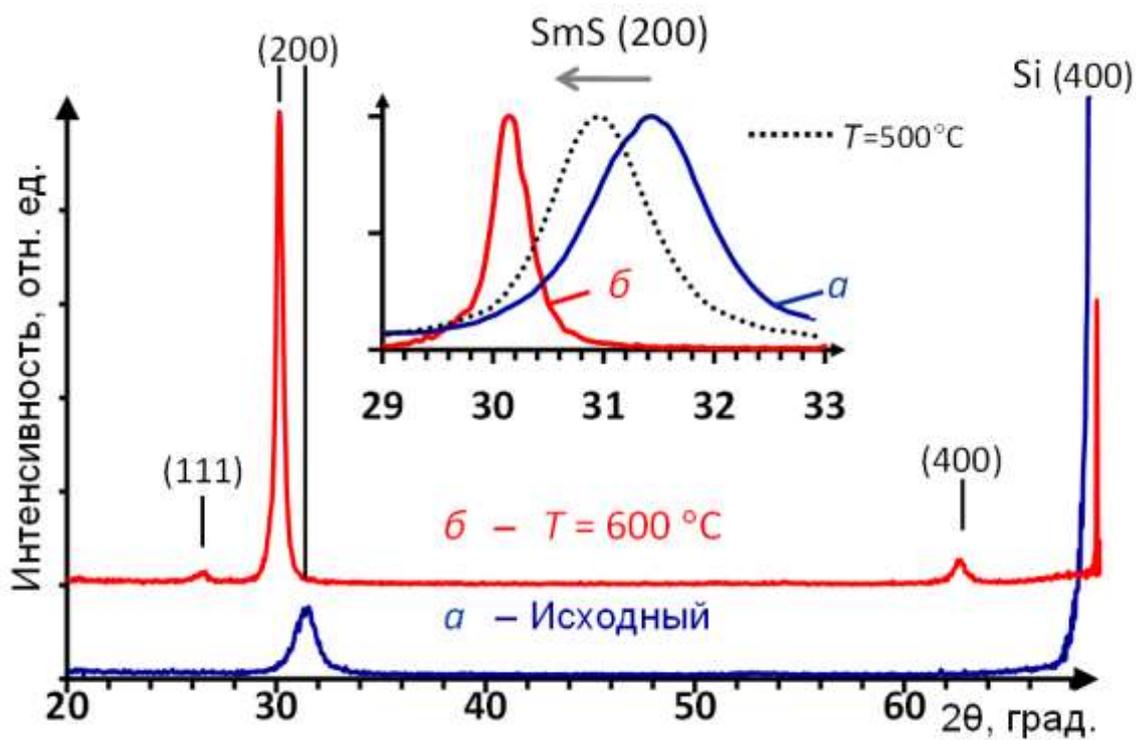


Рис. 4. Дифрактограммы тонкопленочных слоев SmS на подложке Si(100) толщиной 250 нм: *a* – исходного образца, выращенного при $T_{\text{комн}}$, *b* – образца после вакуумного отжига при $T = 600$ °C в течение 30 мин. На вставке – нормированные пики SmS(200) исходного (*a*) и отожженных при $T = 500$ °C (показан пунктиром) и $T = 600$ °C (*b*) образцов

Важно отметить, что релаксация напряжений в результате отжига происходит плавно с ростом температуры, поскольку в результате отжига при 500 °С дифракционный максимум, соответствующий SmS(200), смещается как целое, тогда как в случае скачкообразного фазового перехода изменилась бы интенсивность максимума наряду с появлением второго пика, соответствующего полупроводниковой фазе. Фазовый переход в пленках был подтвержден также данными оптической спектроскопии. Альтернативно, было показано, что фазовый переход может быть достигнут с помощью наносекундного импульсного лазерного отжига (рис. 5).

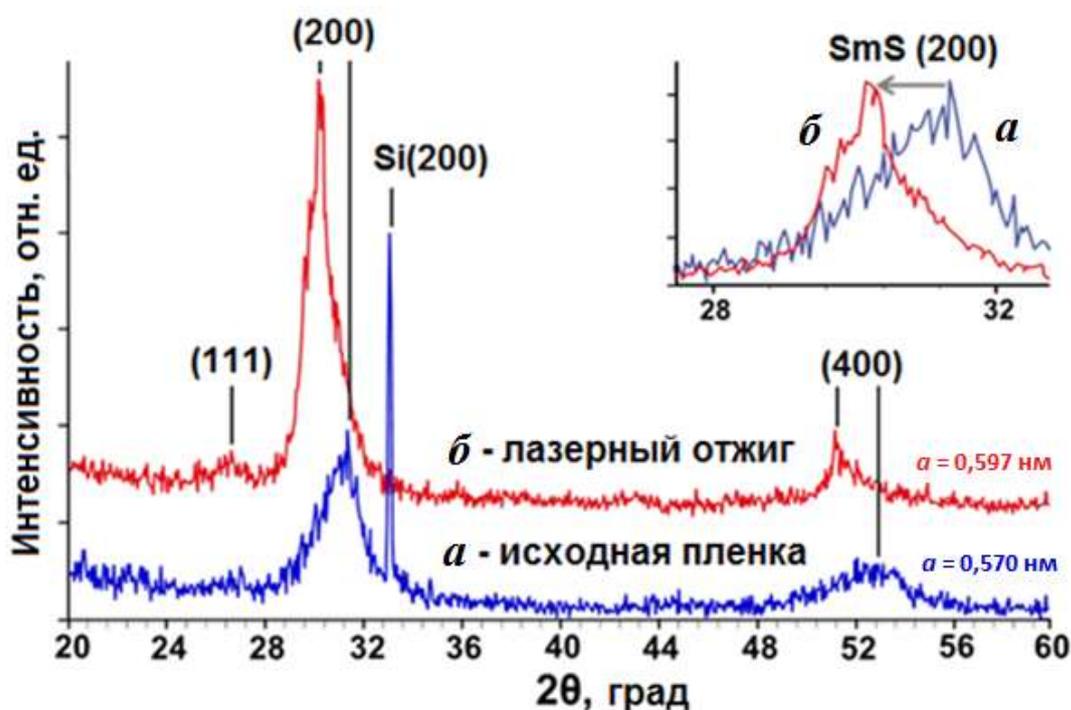


Рис. 5. Дифрактограммы образцов SmS/Si(100), выращенного методом импульсного лазерного осаждения: *a* – исходный; *b* – подвергнутый лазерному отжигу

Было обнаружено, что омическим контактом к SmS обладает Al, осажденный методом ИЛО на поверхность SmS при комнатной температуре. В диапазоне температур $T = 200\text{--}330$ К для тонких пленок SmS толщиной 250 нм на подложке Si(100) были получены кривые электросопротивления, показанные на рис. 6. Сопротивление исходной пленки SmS составляет $\rho \approx 1,1 \cdot 10^{-5}$ Ом·м, и имеет очень слабую зависимость от температуры, что свидетельствует о металлическом состоянии SmS. После отжига при $T = 600$ °С сопротивление слоя

SmS возрастает на три порядка (до $\rho \approx 0,014$ Ом·м при комнатной температуре) и имеет зависимость $\rho(T) = \rho_0 \cdot \exp(E_a/kT)$, где $E_a = E_g/2 \approx 0,25$ эВ.

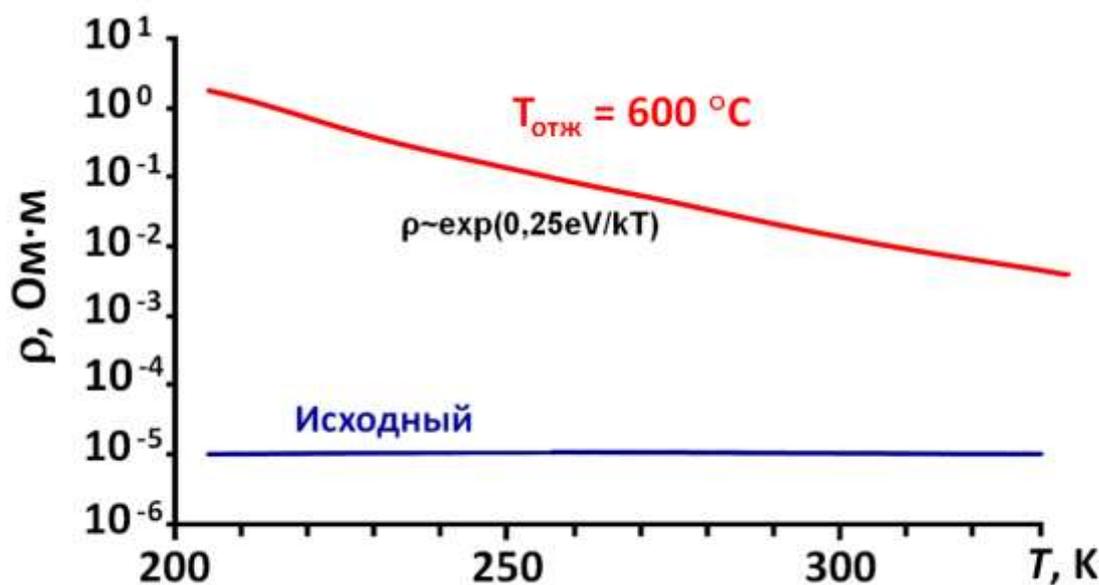


Рис. 6. Температурная зависимость электросопротивления SmS на подложке Si(100): исходного образца, выращенного при комнатной температуре и образца после вакуумного отжига при $T = 600$ °C

Металлическая фаза в SmS является фазой, формирующейся при высоком давлении (для осуществления фазового перехода необходимо приложить давление в $\sim 0,65$ ГПа). Поэтому существование пленки в металлической фазе может быть обусловлено формированием внутренних напряжений. Проведенные измерения и расчет с помощью формулы Стони показывают, что напряжения в металлической пленке SmS составляют $P \sim 0,9$ ГПа, что заметно превосходит пороговое давление в $P = 0,65$ ГПа для фазового перехода полупроводник-металл в монокристаллах SmS. В результате вакуумного отжига исходная кривизна образца восстанавливалась (рис. 7), что свидетельствует о релаксации напряжений в пленке. На основании этих данных предложена модель переключающего устройства на основе SmS (рис. 8).

Возникновение таких напряжений в пленке связано с взаимодействием частиц лазерной плазмы, энергия которых составляет до сотен электрон-вольт, и подложки, где образуются внедрения и замещения, обеспечивающие напряженное состояние пленки.

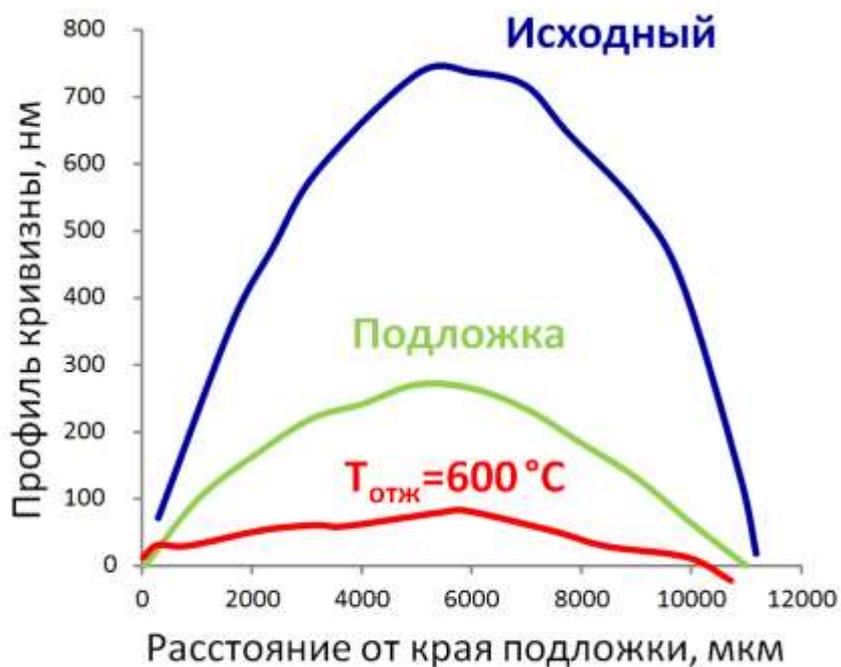


Рис. 7. Профили кривизны образцов SmS/Si(100): подложки, исходного образца и термически отожженного при $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ образцов

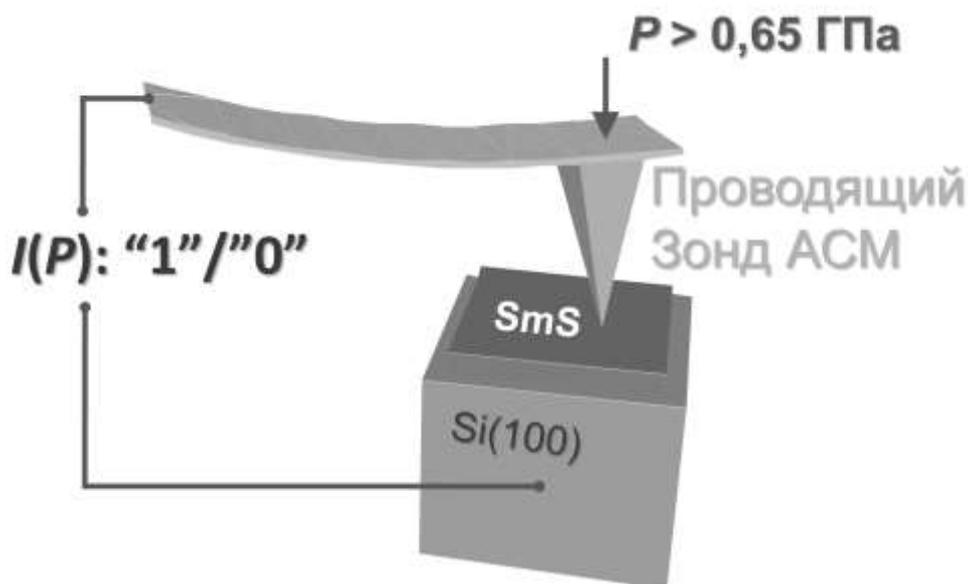


Рис. 8. Схема модельного эксперимента по переключению проводимости на структуре SmS/Si(100). В процессе эксперимента снимается зависимость тока через образец от приложенного давления. При достижении критического давления происходит переключение.

Для технологических применений представляет интерес возможность локального переключения проводимости в SmS, перехода как металл-полупроводник, так и полупроводник-металл, для записи проводящих дорожек в пленках. Одним из таких методов является лазерный отжиг. Согласно данным

рентгеновской дифракции, импульсный лазерный отжиг может быть использован для конвертации изначально металлической фазы пленки SmS на кремнии в полупроводниковую. Кроме того, происходит рост зерен и релаксация напряжений в пленке SmS, на что указывает уменьшение ширины пиков рентгеновской дифракции.

Для исследования переключения в образце SmS/Si(100) в наномасштабе использован проводящий зонд атомно-силового микроскопа (АСМ) с возможностью контролировать силу, приложенную к нему. На кончике зонда создается давление не меньше 0,65 ГПа, необходимое для осуществления фазового перехода кантилеверу (АСМ в режиме индентирования). Во время осуществления переключения одновременно снимается вольт-амперная характеристика, или зависимость тока через образец от приложенного давления. Нижний электрический контакт обеспечивался за счет подложки из сильнолегированного кремния, а на поверхность пленки наносились микроконтакты Cr(5 нм)/Pd(50 нм) диаметром ~500 нм. Схема эксперимента приведена на рис. 8, а результаты эксперимента – на рис. 9.

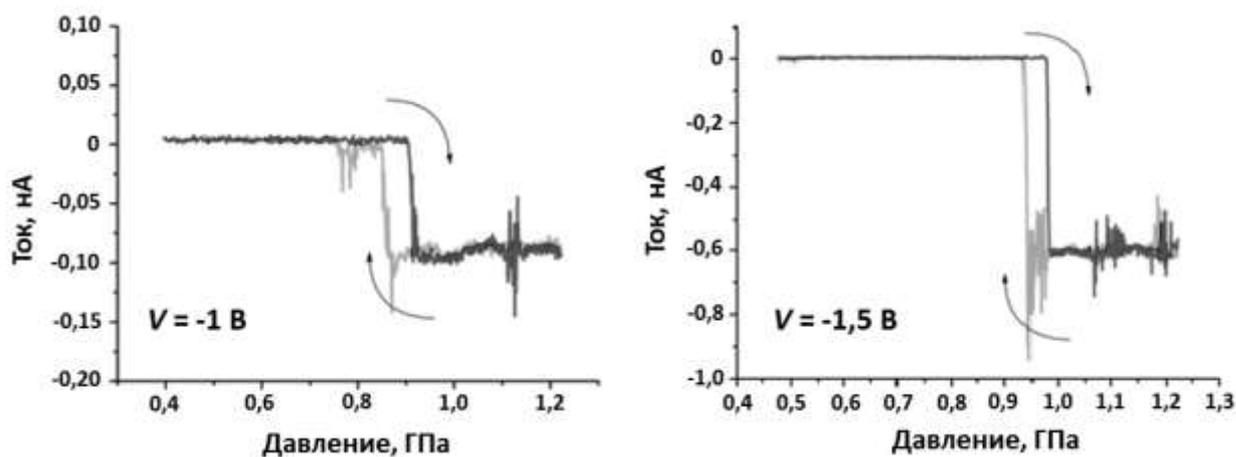


Рис. 9. Зависимость тока от давления при приложенных напряжениях -1 и -1,5 В на микроконтактах на поверхности SmS

Величина силы придавливания и необходимый радиус закругления зонда подбирались исходя из критического давления, обеспечивающего фазовый переход, и модулей упругости материалов зонда и SmS. Линейные размеры обла-

сти, на которой происходил фазовый переход, составляли 20 нм при радиусе закругления зонда 500 нм, и 10 нм при радиусе закругления зонда 250 нм. Расчетная критическая сила придавливания зонда, необходимая для осуществления фазового перехода, составляет 200 и 50 нН соответственно.

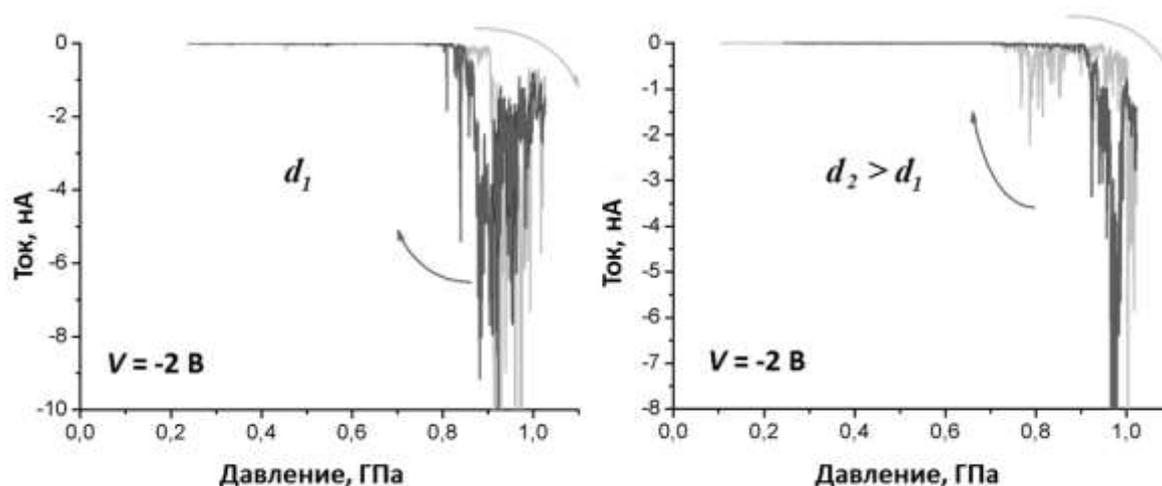


Рис. 10. Зависимость тока от давления при контакте зонда с тонкой пленкой SmS без микроконтактов при приложенном напряжении -2 В. Слева показана зависимость для области образца с тонким слоем SmS ($d_1 \sim 60$ нм), справа – для области образца с более толстым слоем SmS (d_2 на $\sim 30\%$)

Измерения проводились также на пленке SmS без микроконтактов, результаты которых представлены на рис. 10. В этом случае контакт токопроводящего зонда осуществлялся непосредственно с полупроводниковым SmS, при этом токовые характеристики были зашумлены. Для тонкой и толстой пленки наблюдалась хорошая повторяемость результатов, в частности, существует систематическая разница в давлении, при котором происходит скачок проводимости. Критическое давление для тонкой пленки составляет $\sim 0,8$ ГПа, а для толстой пленки – $\sim 0,9 \div 1,0$ ГПа. В обоих случаях наблюдался гистерезис. Величина критического давления, полученная в данном эксперименте, меньше величины, полученной в эксперименте по переключению на микроконтактах. Это может объясняться перераспределением давления в области микроконтакта.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработан оригинальный способ осаждения пленок EuS в атмосфере серы, позволяющий получать пленки с избытком серы, при этом различные виды отжига приводят к формированию пленок строго стехиометрического состава и высокого структурного качества.

2. Установлено, что для тонкопленочных слоев EuS_x , изначально содержащих избыток серы, импульсный лазерный отжиг на воздухе при оптимальной плотности энергии (8 кДж/м^2) приводит к формированию строго стехиометрических слоев моносульфида европия высокого качества с шириной запрещенной зоны, соответствующей величине для объемного материала.

3. Впервые получены металлические пленки SmS на различных подложках непосредственно в результате осаждения без дополнительной обработки, причем на подложках Si(100) получены текстурированные тонкопленочные слои SmS с ориентацией (100). В металлических тонкопленочных образцах SmS, выращенных на подложках Si(100) обнаружена возможность управления фазовым переходом "металл-полупроводник" путем вакуумного отжига, сопровождающимся непрерывным изменением параметра решетки от температуры.

4. Установлено, что формирование полупроводниковой фазы SmS наилучшего качества происходит при температуре вакуумного отжига $T = 600 \text{ }^\circ\text{C}$, а оптимальное время отжига составляет 0,5 часа. При температуре отжига $T = 700 \text{ }^\circ\text{C}$ и выше фаза SmS деградирует.

5. Показано возникновение фазового перехода металл-полупроводник в тонкопленочных слоях SmS в результате воздействия лазерного излучения, что может быть использовано для формирования проводящих дорожек на поверхности пленки.

6. Определена величина напряжений в осажденных и термически отожженных слоях SmS в структурах SmS/Si(100). Измерения и расчет показывают, что напряжения в пленке SmS составляют $P \sim 0,9 \text{ ГПа}$, что заметно превосходит пороговое давление в $P = 0,65 \text{ ГПа}$ для фазового перехода полупроводник–металл в моносульфиде самария. Указанные напряжения в пленке дости-

гаются за счет наличия высокоэнергетических частиц в потоке осаждаемого материала.

7. Впервые зарегистрирован эффект переключения проводимости на микроконтактах на поверхности SmS, а также непосредственно на пленке SmS с помощью атомно-силовой микроскопии с проводящим кантилевером.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Тетерин П.Е., Зенкевич А.В., Лебединский Ю.Ю., Парфенов О.Е. Исследование структурных и электрофизических свойств тонкопленочных слоев SmS и EuS // Труды научной сессии МИФИ. – 2010. – Т. 1. – С. 172.
2. Zenkevich A.V., Parfenov O.E., Storchak V.G., Teterin P.E., Lebedinskii Yu.Yu. Highly oriented metallic SmS films on Si(100) grown by pulsed laser deposition // Thin Solid Films. – 2011. – V. 519. – P. 6323–6325.
3. Тетерин П.Е. Неволин В.Н., Колосов Ю.Н., Сипайло И.П., Сургина Г.Д. / Влияние термического и лазерного отжигов на состав и свойства тонкопленочных слоев EuS // Перспективные материалы. – 2012. – 1. – С. 43–46.
4. Сургина Г.Д., Неволин В.Н., Сипайло И.П., Ершов П.А., Максимова К.Ю., Тетерин П.Е. Тонкопленочные поглощающие слои Cu₂ZnSnS₄, сформированные методом импульсного лазерного осаждения, для применения в солнечных элементах // Перспективные материалы. – 2012. – 2. – С. 28–32.
5. Surgina G.D., Zenkevich A.V., Sipaylo I.P., Nevolin V.N., Drube W., Teterin P.E., Minnekaev M.N. Reactive Pulsed Laser Deposition of Cu₂ZnSnS₄ Thin Films in H₂S // Thin Solid Films DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2012.11.072> (Доступна онлайн с 07.12.2012).
6. Тетерин П.Е., Зенкевич А.В., Чуприк А.А., Батурич А.С. Использование перехода полупроводник-металл в тонкопленочных слоях SmS для создания микро- и наноэлектромеханических переключающих устройств // В сб.: Труды 54-й научной конференции МФТИ. – М., 2011. – С. 58 – 59.

7. Пат. 2428505. Рос. Федерация: Способ получения тонких пленок на основе EuS : МПК С23С14/06 С23С14/24 В82В3/00, / Зенкевич А.В. Лебединский Ю.Ю., Парфенов О.Е., Тетерин П.Е.; заявитель и патентообладатель НИЯУ МИФИ. – 2009137618/02; заявл. 12.10.2010, опубл. 20.04.2011 (Бюл. «Изобретения. Полезные модели» № 25).
8. Пат. 2459012. Рос. Федерация: Способ изготовления тонких пленок на основе моносulfида самария: МПК С23С14/06, Н01L21/02 / Зенкевич А.В. Лебединский Ю.Ю., Парфенов О.Е., Тетерин П.Е.; заявитель и патентообладатель НИЯУ МИФИ. – 2010140379/02; заявл. 01.10.2010, опубл. 10.04.2012 (Бюл. «Изобретения. Полезные модели» № 23).