

## ОТЗЫВ

научного руководителя на диссертационную работу Кузнецова Юрия Михайловича «Особенности синтеза и электрофизические свойства высокотемпературных термоэлектрических материалов на основе нанопорошков Ge-Si и Mn-Si», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. – Физика полупроводников

Диссертационная работа Кузнецова Юрия Михайловича посвящена синтезу и исследованию характеристик высокотемпературных термоэлектрических материалов. Выбранное направление исследований относится к числу перспективных и актуальных научных тематик в области физики полупроводников, а его особенностью является использование методов и технологий, относящихся к другим научным направлениям: термодинамике, порошковой металлургии. Известно, что для обеспечения конкурентоспособности термоэлектрических материалов по сравнению с другими способами генерации энергии их показатель эффективности (коэффициент  $ZT$ ) должен принимать значения не ниже 1,5-2,0. Новые физико-технологические тенденции достижения таких высоких значений коэффициента  $ZT$  заключаются в создании композитных наноматериалов, в которых используется сразу несколько физических явлений, связанных с формированием наноразмерной структуры. При этом современные технологические методы и методы контроля позволяют с очень высокой точностью управлять параметрами наноструктур и буквально производить «тонкую настройку» термоэлектрических свойств. Это и обеспечивает искомое повышение в несколько раз коэффициента  $ZT$  и, соответственно, КПД преобразования.

К таким перспективным технологиям создания наноструктурированных термоэлектрических материалов можно отнести и исследованный в работе метод спекания нанопорошков. Это технология, дающая возможность получать в промышленных масштабах термоэлектрические материалы с КПД на 20-50 % выше аналогов. Однако, при очень быстром развитии технологий спекания полупроводниковых материалов, физические процессы, протекающие в ходе синтеза, а также, отчасти, и свойства новых синтезированных материалов в литературе описаны весьма ограниченно. Полноценное понимание этих вопросов – ключ к получению термоэлектриков с требуемыми высокими значениями добротности.

В диссертационной работе Кузнецова Ю.М. Впервые выполнен расчёт из первых принципов термоэлектрических характеристик твёрдых растворов  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  с  $0 \leq x \leq 0,3$ . На основании выполненных расчётов установлены основные параметры твёрдого раствора германий-кремний, оказывающие ключевое влияние на термоэлектрические характеристики. Подбор этих параметров позволяет прогнозировать термоэлектрические параметры материала различного уровня легирования и состава. Впервые исследованы физические процессы, протекающие в ходе синтеза твёрдого раствора германий-кремний из смеси нерастворённых порошков Ge и Si. Установлено, что формирование твёрдого раствора происходит за счёт твердофазной взаимной диффузии кремния и германия. Впервые исследованы физические процессы, протекающие в ходе синтеза высшего силицида марганца из порошков Mn и Si. Установлено, что формирование соединения происходит за счёт реактивной диффузии с последующей твердофазной химической реакцией. Впервые показана возможность легирования твёрдого раствора германий-кремний донорной примесью из твердофазного источника фосфида



кремния в процессе синтеза на установке электроимпульсного плазменного спекания.

Полученные научные и научно-технологические результаты соответствуют мировому уровню в области физики и технологии термоэлектричества, что подтверждается наличием у Ю.М. Кузнецова публикаций в ведущих российских научных изданиях, посвященных физике полупроводников. С практической точки зрения, результаты исследования Ю.М. Кузнецова показывают принципиальную возможность достижения высоких коэффициентов термоэлектрической эффективности путём спекания субмикронных порошков.

Большая часть экспериментальных результатов, приведенных в диссертации, получена непосредственно Кузнецовым Ю.М. Автор принимал участие в постановке, обсуждении и анализе всех экспериментов, которые не были выполнены лично им. Кузнецов Ю.М. также внес определяющий вклад в подготовку и написание ключевых статей по результатам исследований.

Диссертант проявил умение представлять результаты проведенных им исследований: он выступил с устными и стендовыми докладами на международных и Российских научных конференциях. Основные результаты работы докладывались на международном симпозиуме «Нанозлектроника и наноэлектроника» (Нижний Новгород 2018-2022 гг.), I Международной научно-практической конференции «Альтернативная и интеллектуальная энергетика» (TPCASE–2018) (Воронеж 2018 г., 2020 г.), XXII IEEE Международной конференции молодых специалистов в области электронных устройств и материалов (EDM – 2021) (Горно-Алтайск 2021 г.), IX Всероссийской конференции с международным участием «Физико-химические процессы в конденсированных средах и на межфазных границах», посвященной 100-летию со дня рождения Я.А. Угая (ФАГРАН–2021) (Воронеж, 2021 г.), IX Международной школы-конференции по

оптоэлектронике, фотонике и наноструктурам (SPB OPEN – 2022) (Санкт-Петербург 2022 г.), а также на семинарах физического факультета и НИФТИ ННГУ им. Н. И. Лобачевского. Результаты исследований Ю.М. Кузнецова по теме диссертации опубликованы в 10 статьях в российских и зарубежных рецензируемых журналах из списка ВАК.

В период выполнения исследований, результаты которых представлены в указанной диссертационной работе, Кузнецов Ю.М. проходил обучение в аспирантуре на кафедре Физики полупроводников, электроники и наноэлектроники физического факультета ННГУ им. Н.И. Лобачевского и по совместительству в Научно-исследовательском физико-техническом институте ННГУ им. Н.И. Лобачевского.

Считаю, что диссертационная работа Кузнецова Ю.М. является законченным научным исследованием и удовлетворяет требованиям ВАК. Ее автор при выполнении работы показал себя высококвалифицированным научным работником. Считаю, что Кузнецов Ю.М. заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. Физика полупроводников.

Научный руководитель:

в.н.с. НИФТИ ННГУ,

д.ф.-м.н., доцент Дорохин Михаил Владимирович

Адрес: 603022 г. Н. Новгород, пр. Гагарина, д. 23, корп. 3

Тел./факс: +7 9                     ; E-mail: dorokhin@nifti.unn.ru

26 января 2023 г.

