

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

GENERAL QUESTIONS

УДК 620.22:544.03

ХИМИЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ. НАУЧНАЯ ШКОЛА АКАДЕМИКА Ф. А. КУЗНЕЦОВА

© 2014 г. М. Л. Косинова, И. Г. Васильева, Я. В. Васильев, Т. П. Смирнова
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН, Россия, Новосибирск

Рассмотрен широкий круг проблем, связанных со становлением, развитием и практической реализацией научных исследований в области материаловедения, выполненных коллективом сотрудников Института неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН под руководством академика Ф. А. Кузнецова. Показана плодотворность его идеи комплексного физико-химического изучения каждой стадии приготовления материала: от предшественника к готовому элементу конкретного устройства. Отмечено его безошибочное предвидение значимости выбираемых объектов исследования, его умение связывать проводимые исследования с такими насущными и глобальными проблемами, как электроника, информатика, энергетика, фотовольтаика, а также его способность сплачивать коллектив общей идеей и активное участие в развитии как российской, так и международной науки, оставаясь при этом локомотивом проводимых передовых работ. Статья написана в память о человеке, организаторе науки, ученом и патриоте, чья деятельность всегда была нацелена на прорывные технологии, обеспечивающие процветание и безопасность Родины.

Ключевые слова: материалы электронной техники, кремний, рост кристаллов, оксидные кристаллы, химическое осаждение из газовой фазы, термодинамическое моделирование.

Материаловедение является одной из самых древних наук. Отобранные из природы или созданные человеком материалы всегда определяли основные особенности образа жизни людей и основные вехи в историческом развитии человечества — каменный, бронзовый, железный века. Открытие и применение новых материалов каждый раз знаменовало собой значительный рывок в области технологий. Вторая половина XX в. отмечена открытием и взрывным развитием науки, производства и использования материалов, объединенных общим названием «функциональные». Мир, в котором мы живем сегодня, в начале XXI в., стал совершенно другим, прежде всего в результате освоения электронных, оптических и магнитных материалов. Именно этим материалам человечество обязано переходом в пятый технологический уклад.

Ниже речь пойдет об одном из российских коллективов, который занимается разработкой и изучением функциональных материалов — о научной школе академика

Федора Андреевича Кузнецова. Коллектив объединяет много высококвалифицированных специалистов, получивших известность благодаря своим оригинальным работам.

В России существует целый ряд замечательных материаловедческих школ. Каждая из них имеет свою специфику. Для Школы академика Ф. А. Кузнецова характерны следующие особенности.

1. Физико-химический подход к материаловедческим проблемам, стремление использовать всю имеющуюся информацию для количественного описания исследуемых веществ, материалов и процессов.

2. Системность в исследованиях. Работа включает все этапы создания материала:

- получение исходных веществ и разработку методов их очистки;
- синтез материалов;
- характеризацию материалов;
- создание элементов устройств;

Косинова Марина Леонидовна* — кандидат хим. наук, заведующая лабораторией, **Васильева Инга Григорьевна*** — доктор хим. наук, главный научный сотрудник, **Васильев Ян Владимирович*** — кандидат хим. наук, ведущий научный сотрудник, **Смирнова Тамара Павловна*** — доктор хим. наук, главный научный сотрудник, *ФГБУН Институт неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, д. 3.

– дизайн материалов, моделирование процессов синтеза и старения материалов.

3. Определение областей приложения материалов (самостоятельно или в контакте с партнерами).

4. Пропаганда принятых подходов к решению материаловедческих проблем осуществлена через организацию конференций, школ, материаловедческих проектов, международных организаций.

До 90-х годов XX в. большая часть работ участников Школы выполнялась в рамках сотрудничества с отечественной промышленностью. В последние два десятилетия в связи с кризисом в отечественной промышленности по целому ряду направлений работы ведутся с иностранными партнерами в рамках программ сотрудничества (Япония, Германия, Индия, Китай) или по контрактам (Япония, США). В настоящее время участники Школы проводят исследования, связанные с бурно развивающимся направлением – наноматериалами. Работы Школы по этой тематике докладываются на конференциях и публикуются в ведущих журналах. Все это подтверждает востребованность работ Школы.

Краткая история формирования Школы

В 1962 г. постановлениями Совета Министров СССР за № 2133 от 03.08.1962 г. и АН СССР за № 0105 от 15.08.62 г. Институту неорганической химии (ИНХ) было предписано: «В связи с введением в число основных задач ИНХ СО АН исследований по химии полупроводников и сверхчистых веществ — пересмотреть структуру института».

В связи с этим в Институте был организован отдел химии полупроводников, в составе которого находилась лаборатория пленочных полупроводников и покрытий, заведовать которой было поручено молодому ученому к. х. н. Федору Андреевичу Кузнецову.

Чуть позже была организована Сибирская секция материаловедения полупроводников и твердотельных структур под руководством Ф. А. Кузнецова, вошедшая в состав Научного Совета АН СССР по проблеме «Физико-химические основы полупроводникового материаловедения», возглавляемого выдающимся ученым-химиком академиком А. В. Новоселовой.

Это было организационное начало фундаментальных исследований в области электронного материаловедения не только в г. Новосибирске, но и на всем пространстве от Урала до Дальнего Востока. Это было началом работы Школы. Характерной чертой молодого коллектива был горячий энтузиазм. Работа лабо-

ратории не ограничивалась академической наукой. Сразу было организовано тесное взаимодействие с предприятиями, в первую очередь электронной промышленности и цветной металлургии г. Новосибирска, а также предприятиями Москвы, Ленинграда и Красноярска. Некоторые результаты работы участников Школы рассмотрены ниже.

Полупроводниковый кремний и технология приборов на основе кремния

Первым полупроводником, с использованием которого началось массовое производство приборов, был германий. Однако настоящая революция в электронике связана с освоением технологии производства кремния. Именно этому материалу человечество обязано появлением компьютеров, современных средств связи и систем автоматизации и, наконец, в последние годы силовой электроники — приборов и систем управления электрической энергией.

Участники Школы занимались решением различных материаловедческих проблем, связанных с кремнием и приборами на основе кремния на протяжении всего периода существования коллектива.

На рис. 1 схематично представлен так называемый кремниевый цикл — последовательность процессов получения материала и приборов, начиная с исходного сырья и кончая утилизацией отходов. В правой части рис. 1 показаны проблемы, в решении которых принимали участие члены коллектива. В рассматриваемом кремниевом цикле наиболее сложными для анализа являются процессы получения поликристаллического кремния. Не вдаваясь в детали, можно сказать, что исследования участников Школы позволили предложить модификацию



Рис. 1. Кремниевый цикл и проблемы, исследуемые участниками Школы

системы процессов на всех этапах технологии от металлургического до поликремния. Эта модификация привела к увеличению в несколько раз производительности процесса в целом, уменьшению количества отходов и повышению качества продукции. Изменения коснулись многих деталей системы процессов. В некоторых случаях введены принципиально новые процессы. Проиллюстрируем это одним примером. В производственном цикле поликремний получается в процессе водородного восстановления трихлорсилана (SiHCl_3). Эффективность этого процесса ~30 %, т. е. треть кремния, содержащегося в исходном веществе, превращается в целевой продукт — поликристаллический кремний. Остальной кремний уходит из реактора восстановления в форме хлорсиланов, в основном в форме тетрахлорида кремния (SiCl_4). До недавнего времени образующийся SiCl_4 был отходом производства. В последнее время разработаны процессы конверсии SiCl_4 в SiHCl_3 с использованием катализаторов. Этот процесс имеет два недостатка: эффективность конверсии невысока (чуть больше 30 %), а катализатор является источником загрязнений получаемого кремния.

Членами Школы предложен совершенно новый процесс, в котором реакция конверсии инициируется электронным пучком [1, 2]. Разработанные Институтом ядерной физики СО РАН мощные электронные ускорители позволяют вводить электронный пучок в реакторы, при этом полностью исключая загрязнение реакционной смеси. Процесс проводится при пониженной температуре, что позволяет в соответствии с термодинамикой реакции конверсии достичь высокой эффективности.

Еще большей эффективностью обладает технологический прием, предложенный академиком Ф. А. Кузнецовым и д. х. н. В. А. Титовым [3]. На основании результатов термодинамического моделирования, было предложено весь образующийся тетрахлорид кремния использовать в качестве хлорирующего агента в реакторе получения хлорсиланов из металлургического кремния. В настоящее время этот технологический прием применяют на всех использующих Сименс-процесс вновь создаваемых производствах поликристаллического кремния.

Закljučая разговор о поликристаллическом кремнии, необходимо подчеркнуть, что технология этого материала относится к разряду тонких химических технологий. Сегодня лишь несколько стран в мире оказались способными разработать и поддерживать эту технологию. Кремний по полному циклу производили в Советском Союзе. Будем надеяться, что Россия располагает достаточным научным и технологическим потенциалом, чтобы быть в числе малого количества «кремниевых держав».

Множество сложных химических задач возникает в технологии приборов на основе кремния. Следует отметить, что такие технологии являются

сплавом достижений многих направлений техники. Необходимо обеспечить очень высокую точность построения твердотельных приборов, высокое совершенство структуры материала, высокую точность в задании состава и изменении состава по объему прибора и т. д. Материаловедческая часть разработки технологии требует использования последних достижений химии, физики, механики и, кроме того, часто стимулирует развитие приемов препарирования и средств исследований, до сих пор не существовавших. Следует напомнить, что многие современные средства исследования состава, структуры, свойств поверхности появились именно в связи с разработкой электронных приборов и прежде всего приборов кремниевой электроники.

Много новых подходов было разработано в связи с проблемой регулировки свойств слоев оксида и нитрида кремния, без которых невозможно было создание выпускаемых сегодня разнообразных приборов на основе кремния.

Членами Школы внесено много нового в понимание связи свойств этих веществ с их структурой и составом. Так, в течение долгого времени было принято считать, что слои диэлектрика, получаемые, например, при взаимодействии силана с аммиаком, широко используемые в технологии интегральных схем, представляют собой нитрид кремния Si_3N_4 . О том, что природа этих слоев не столь проста, свидетельствовало значительное изменение их свойств в зависимости от условий синтеза и термообработки. Изменялась их реакционная способность, в широком интервале менялись электрические и оптические свойства. Технологи находили условия, соответствующие образованию «нитрида кремния» с нужными им свойствами, и это было важным элементом ноу-хау, которое хранилось как важный технический секрет. Понять же природу этих вариаций свойств было непросто, так как толщина слоев часто составляла всего ~1000 нм. Учениками Ф. А. Кузнецова были разработаны новые оригинальные оптические методы определения состава слоев «нитрида кремния». Оказалось, что при используемых в технологии условиях образуется вещество, которое способно содержать до нескольких десятков атомных процентов водорода. Образование групп $\equiv\text{Si}-\text{H}$ и $=\text{N}-\text{H}$ [4, 5] и было причиной наблюдаемого и по началу необъяснимого изменения свойств. Эти работы коллектива получили широкую известность и внесли вклад в развитие общей методологии изучения состава особо тонких слоев.

Другой показательный пример важности использования количественных химических подходов в технологии электронных приборов — это разработка подхода к анализу стабильности многокомпонентных твердотельных структур. Суть подхода состояла в рассмотрении термодинамической совместимости разнородных веществ, из которых состоят используемые в электронике твердотельные структуры.

В настоящее время при изготовлении твердотельных структур используют сложные комбинации веществ. Выбор материалов и последовательности их размещения продиктованы набором их физических и химических свойств, обеспечивающих выполнение требуемой функции построенного прибора. Часто приборы после создания в течение некоторого времени меняют свои свойства. Иногда после некоторого времени параметры прибора стабилизируются. Многие приборы имеют конечный срок службы, хотя если бы при работе прибора протекали лишь процессы, связанные с перемещением электронов, они должны были бы работать вечно. Следовательно, происходит изменение состояния материала. И часто начинается оно на границах раздела разнородных веществ.

В работах Школы рассмотрена стабильность комбинаций многих пар веществ, применяемых в твердотельных электронных структурах, что позволило сделать очень полезные рекомендации по увеличению сроков службы приборов. Проиллюстрируем это некоторыми примерами. Участниками Школы было показано, что для очень многих металлов граница «металл — диоксид кремния» ($Me-SiO_2$) нестабильна: металл не сосуществует с диоксидом кремния. Это справедливо, в частности, для алюминия — металла очень широко применяемого в электронике. Рассмотрение термодинамики процессов взаимодействия металла с диоксидом кремния позволяет найти и решение проблемы увеличения долговечности: следует заменить алюминий на металл, сосуществующий с SiO_2 , например на молибден, или поместить между слоем алюминия и оксидом промежуточный слой, состоящий из продуктов их взаимодействия. Аналогичные заключения были сделаны, в частности, для случая контакта никеля и арсенида галлия. Нестабильность этой пары веществ послужила причиной введения в технологию особой операции «формовки», состоящей в специальной термообработке изготовленного прибора. Расчеты показали, что на границе $Ni-GaAs$ в результате взаимодействия соседствующих несосуществующих веществ должен образовываться промежуточный слой очень сложного состава. Последующие эксперименты подтвердили, что в результате операции «формовки» действительно образуются фазы, предсказанные расчетом.

И, наконец, еще один пример. Долгое время многие исследователи делали попытки создать на поверхности соединений $A^{III}B^V$ изолирующие слои путем окисления части вещества. Эти слои планировали далее использовать как части прибора (аналогично тому, как это делается в технологии приборов на основе кремния). Применяли различные способы окисления, но достичь необходимых параметров для поверхности раздела не удавалось: на границе всегда создавался значительный заряд, препятствующий использованию получаемых структур для создания полевых приборов. Расчеты, проведенные участниками Школы, показали, что при окислении всех соеди-

нений этого типа на границе раздела окисляемого полупроводника с продуктами всегда будет в каком-то количестве находиться в свободном состоянии элемент V группы (мышьяк или сурьма). Проведенный в работах [6, 7] специальный высокоточный послойный анализ образуемых структур подтвердил количественно выводы термодинамического анализа.

Процессы осаждения из газовой фазы

Синтез слоев и структур с использованием процессов осаждения из газовой фазы является предметом исследований участников Школы с самого начала ее формирования. Объектами исследования были слои полупроводников, диэлектрики, многослойные структуры. Применение физико-химического количественного подхода к исследованию этих процессов позволило найти целый ряд оригинальных решений, интересных сами по себе и имеющих общее значение для развития методов приготовления материалов. Примером таких решений является разработка принципа метода комбинированной газожидкостной эпитаксии. Совместное рассмотрение термодинамики газовой и конденсированных фаз позволило рассчитать режимы процессов, когда возможно последовательно осуществить следующие этапы:

– формирование на подложке слоя жидкого насыщенного раствора осаждаемого вещества (одно- или многокомпонентного);

– дополнительный переход осаждаемых компонентов из газовой в жидкую фазу в стехиометрических количествах, что приводит к осаждению твердой фазы и сохранению слоя раствора, и процесс кристаллизации в таком случае происходит, как в методе жидкостной эпитаксии;

– растворение травлением жидкой фазы в газовой до полного ее удаления.

Рассмотрим еще один пример развития процессов осаждения из газовой фазы. Серьезной проблемой в регулировке свойств слоев полупроводниковых соединений ($A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$, $A^{IV}B^{VI}$) оказался факт, что при использовании таких транспортных агентов, как галогены, вследствие сильно различающейся прочности галогидных соединений элементов A и B не удается получить все составы внутри области гомогенности соединения. Иными словами, эффективные растворимости осаждаемых элементов в газовой фазе оказались сильно различающимися. Выход из положения предложили участники Школы: использовать наряду с галогидными соединениями летучие элементоорганические соединения всех или некоторых из осаждаемых элементов. Таким образом, можно регулировать по желанию эффективную растворимость элементов и подобрать условия осаждения многокомпонентных соединений по составу, соответствующему любой точке области их гомогенности.

Значительным вкладом в развитие методов осаждения из газовой фазы явилось введение в каче-

стве исходных веществ молекул летучих соединений (элементорганических и комплексных соединений), содержащих все осаждаемые элементы.

В работах коллектива Школы было показано, что при правильно выбранных режимах активации удается сохранить фрагменты исходных молекул и построить из них новое соединение с необходимым составом и структурой. В последнее время исследуются процессы синтеза диэлектрических слоев с низким и высоким значением диэлектрической постоянной, барьерного слоя, препятствующего диффузии меди, прозрачных пленок. В этих процессах с использованием комплексных и элементорганических соединений получают тонкие слои новых материалов: бинарных Al_2O_3 , HfO_2 , сложных оксидов HfO_2 с редкими и редкоземельными металлами $(HfO_2) \times (M_2O_3)$, где $M = Al, La, Sc$ [8, 9], карбонитридов кремния SiC_xN_y и бора BC_xN_y [10—17]. В материалах этих тройных систем $Si-N-C$ и $B-N-C$ можно ожидать реализации комбинации свойств, характерных для бинарных фаз этих систем: SiC , Si_3N_4 , BN , B_4C . К настоящему времени показано, что, изменяя условия синтеза, можно варьировать в широких пределах состояние и свойства карбонитридных слоев. Получены однородные нанокристаллические и аморфные слои и пленки, в которых наночастицы распределены в аморфной матрице, а также слои с изменяющимися по толщине составом или степенью кристалличности, так называемые градиентные материалы.

Оксидные материалы

Важную роль в системе функциональных материалов играют материалы на основе оксидных фаз. Это ферроэлектрические, нелинейно-оптические, лазерные и сверхпроводящие вещества. Доведение этих веществ до состояния материала с заданными и воспроизводимыми свойствами потребовало очень большой и разнообразной работы:

- исследования кристаллической структуры, характера дефектов, фазовых равновесий в системах, где реализуются требуемые фазы;
- изучение механизма формирования материала при фазообразовании в различных процессах: кристаллизации из газовой фазы, из высокотемпературных многокомпонентных расплавов, из собственного расплава.

В ИИХ СО РАН в результате многолетней работы сложилось направление комплексного исследования оксидных фаз, включающее все перечисленные выше процессы. Особое значение в работах Института имеет развитие и доведение до высоко уровня метода роста оксидных монокристаллов в условиях низких температурных градиентов.

Низкоградиентный метод был предложен А. А. Павлюком в середине 70-х годов XX в. [18] при решении задачи выращивания кристаллов двойных щелочно-редкоземельных молибдатов и вольфрама-

тов, имеющих общую формулу $M^+R^{3+}[Mo(W)O_4]_2$, где $M = Li, Na, K, Rb, Cs, Cu, Ag, Au, Tl$; $R = Ln, Bi, In, Sc, Y, Al, Gd, Fe, Cr...$

Ряд кристаллов соединений указанного класса, например $KGd(WO_4)_2 : Nd^{3+}$ (КТВ), оказался перспективным для создания новых высокоэффективных сред для лазерной техники. Разработка этого метода означала существенное изменение широко распространенного метода Чохральского. В этом методе кристаллы вытягивают из расплава на вращающуюся монокристаллическую затравку. Для традиционного варианта метода Чохральского характерны большие градиенты температуры в расплаве, доходящие до сотен градусов Кельвина на сантиметр. В таких условиях форма фронта кристаллизации целиком определяется тепловым полем, задаваемым тепловыми потоками от перегретого расплава к затравке, закрепленной на водоохлаждаемом штоке. При этом рост кристалла происходит по нормали к поверхности раздела. Стабилизируя макроформу, высокие градиенты являются источником термоупругих напряжений в кристалле и крайне осложняют картину гидродинамических течений в расплаве. Поскольку соединения $M^+R^{3+}[Mo(W)O_4]_2$, как правило, плавятся с разложением и имеют полиморфные модификации, получить качественные однородные кристаллы с размерами, достаточными для изготовления рабочих элементов, традиционными методами не удавалось.

В варианте метода, разработанном в ИИХ СО РАН, температурный градиент в зоне кристаллизации удалось снизить до 0,1—1 К/см. Изменения в характере протекания процесса кристаллизации, обусловленные снижением температурных градиентов на порядки, оказались столь кардинальными, что можно говорить о появлении отдельной разновидности метода Чохральского.

Наиболее существенные особенности процесса выращивания в условиях таких малых градиентов температур следующие:

- колебания температуры в расплаве, приводящие к неоднородности кристалла, становятся пренебрежимо малыми;
- термические напряжения снижаются до уровня, при котором они не приводят к образованию дефектов в кристаллах;
- ввод штока затравки через патрубков, играющий роль «диффузного затвора», а также уменьшение максимальной температуры расплава подавляют процессы разложения и испарения расплава;
- для ряда кристаллов преобладающим становится слоевой механизм роста, причем фронт кристаллизации при росте из расплава оказывается полностью ограниченным.

Автоматический весовой контроль, применяемый для стабилизации поперечного сечения кристалла, в низкоградиентном методе Чохральского (LTG Cz) играет особую роль. Во-первых, тепловой узел не имеет окон для наблюдения, поскольку они

искажали бы тепловое поле. Оператор может судить о происходящем в зоне кристаллизации только по показанию весового датчика. В частности, наблюдая за показаниями датчика, оператор проводит затравку кристалла. Во-вторых, снижение градиентов при росте кристаллов из расплава сопровождается резким ухудшением динамической устойчивости процесса. Практически это означает, что становится невозможным поддерживать поперечное сечение кристалла ни при фиксированных параметрах режима, ни при параметрах, изменяющихся по заданной программе. Стабилизация процесса в этих условиях осуществляется только за счет сигнала обратной связи по изменению массы. Можно сказать, что без обратной связи по геометрии кристалла низкоградиентный метод выращивания кристаллов вытягиванием из расплава нереализуем. Следует отметить, что упоминания о возможных преимуществах применения предельно низких градиентов в методе Чохральского встречались в литературе и ранее, однако они не получили надлежащего развития. По-видимому, исследователям не удалось получить воспроизводимых результатов в силу динамической неустойчивости, присущей методу.

Благодаря специализированной аппаратуре, которая постоянно совершенствовалась, и системе специальных методических приемов в ИНХ СО РАН метод LTG Cz доведен до «рутинного» уровня. Это позволило использовать его в повседневной практике исследовательских работ по росту оксидных кристаллов и далее на основе полученных результатов ввести низкоградиентный метод выращивания кристаллов в производственный обиход. Разработанным методом выращено более двадцати соединений двойных щелочно-редкоземельных молибдатов и вольфраматов состава: $M^+M^{3+}(M^{6+}O_4)_2$ (где $M^+ = \text{Li, Na, K, Rb, Cs}$; $M^{3+} = \text{РЗМ}$; $M^{6+} = \text{Mo, W}$). Позднее низкоградиентный метод был успешно использован для роста из расплава ряда оксидных кристаллов, которые ранее выращивали традиционной техникой Чохральского — PbMoO_4 , LiNbO_3 , $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (**BGO**), CdWO_4 (**CWO**), ZnWO_4 , ZnMoO_4 и др., причем во всех этих случаях удалось повысить качество кристаллов и увеличить их размеры [19–24].

В советский период технологии выращивания лазерных кристаллов калий-гадолиниевого вольфрамата и сцинтилляционных кристаллов BGO были внедрены на промышленные предприятия. В новых экономических условиях удалось не только сохранить и развить научно-технический потенциал, накопленный за годы существования Сибирского отделения РАН, но и достигнуть новых результатов, организовав в 1997–1998 гг. в ИНХ СО РАН опытное производство кристаллов при финансовой поддержке Российского фонда технологического развития в рамках проекта ГРАНЬ-4 (рис. 2, см. третью стр. обложки).

Наиболее продвинутыми в практическом отношении являются технологии выращивания сцинтил-

ляционных кристаллов BGO и CWO, широко применяемых для регистрации ионизирующего излучения в ядерной физике, астрофизике, промышленной и медицинской томографии и системах обеспечения безопасности. Выращиваемые кристаллы имеют размеры до 135 мм в поперечнике и до 450 мм по длине. Вес кристаллов BGO составляет более 55 кг, кристаллов CWO — более 10 кг. Кристаллы BGO обладают высоким структурным совершенством, радиационной стойкостью, выдерживая дозу радиации до 10^6 рад, и имеют уникальное оптическое пропускание на длине волны λ сцинтилляции (длина поглощения для $\lambda = 480$ нм составляет от 7–15 м). По размерам и качеству эти кристаллы не имеют в настоящее время конкурентов в мире. О научно-техническом уровне этих работ можно судить по участию ИНХ СО РАН в поставках кристаллов BGO для крупных научно-технических проектов, например для антикомптоновского экрана спектрометра IBIS — одного из двух главных инструментов международной аэрокосмической лаборатории INTEGRAL (ESA), запущенной в космос в октябре 2002 г. В свою очередь, кристаллы CWO по своим характеристикам были признаны наилучшими при испытаниях образцов для аэрокосмического проекта GODDARD (NASA).

Моделирование и развитие информационной системы

Важной частью материаловедческой программы научной Школы является термодинамическое моделирование. Созданную на основе современных функциональных материалов вычислительную технику здесь используют для нужд материаловедения. Как и в других областях, применение вычислительной техники и информационных технологий не только сильно сокращает и удешевляет цикл поиска и разработки материалов, но и часто приводит к решениям, не достижимым эмпирическим путем. Выше уже приводились результаты моделирования на основе использования сведений о термодинамических свойствах веществ и процессов. Основная деятельность по моделированию связана с развитием и использованием информационной системы, которая имеет название «Банк данных по свойствам материалов электронной техники» (БД СМЭТ). Эта система включает базы численных данных по термодинамике большого числа соединений, участвующих в процессах синтеза материалов, и данных по кристаллической структуре. Второй частью информационной системы является пакет служебных программ, решающих задачи по согласованию данных, генерированию данных для произвольного значения параметров и т. д. И, наконец, третья часть системы — набор прикладных программ для решения различных материаловедческих задач [25, 26]. К настоящему времени накоплен опыт решения трех классов задач: выбор материала для осуществления заданной функции, выбор и оптими-

зация процесса синтеза нужного материала, анализ возможных причин старения материалов и твердотельных структур, нахождение способов замедления или устранения процессов старения.

Ф. А. Кузнецов в составе авторского коллектива получил Государственную премию СССР за вклад в развитие электронного материаловедения.

Направления, развиваемые Школой, получили признание научного сообщества в стране и за рубежом. Об этом свидетельствует популярность многочисленных конференций, школ и семинаров, которые были организованы и проведены участниками Школы под руководством Ф. А. Кузнецова. Ниже приведен краткий список основных научных собраний:

– 1969—1980 гг. — десять Симпозиумов по процессам синтеза и роста кристаллов и пленок полупроводников и школ «Математические методы в химии», проводимых всегда в Новосибирске;

– 1970—1990 гг. — шесть Школ по проблемам электронного материаловедения;

– 2001—2014 гг. — девять Сибирско–Уральских семинаров «Термодинамика и материаловедение» (Новосибирск, Екатеринбург);

– 1992—2013 гг. — более 30 научных мероприятий с общим названием «Азиатские приоритеты в материаловедении» и научные конференции в рамках деятельности Азиатско–Тихоокеанской академии материалов (АРАМ), одним из главных организаторов которой являлся академик Ф. А. Кузнецов.

Работая в течение многих лет в международном комитете CODATA, академик Ф. А. Кузнецов развивал методологию моделирования материалов, создания и поддержки материаловедческих баз данных. В рамках комитета КЕМРОН Международного союза теоретической и прикладной химии Ф. А. Кузнецов инициировал и принимал участие в организации конференций «Химия и устойчивое развитие: путь к чистой окружающей среде» (Москва, 1992 г.) и «Материалы для устойчивого развития» (Сеул, 1996 г.) и т. д.

Работы, о которых рассказано выше, проводились в ИНХ СО РАН с начала 60–х годов XX в. К настоящему времени можно говорить уже о четырех или пяти поколениях материаловедов, объединяемых работами Школы. Следует также напомнить, что в методологии и подходах, развиваемых участниками Школы, прослеживается ее предыстория. Первые сотрудники, образовавшие впоследствии этот стабильный коллектив, — это выпускники химических факультетов Ленинградского и Московского государственных университетов. Их научные интересы сформировались под влиянием замечательных профессоров ЛГУ и МГУ С. А. Щукарева, С. М. Ария, Я. И. Герасимова, Б. П. Никольского и А. В. Новоселовой. В дальнейшем основным источником научного пополнения стал Новосибирский государственный университет.

У Школы хорошие связи с другими коллективами из институтов Сибирского отделения РАН: Ин-

ститута физики полупроводников, Института ядерной физики, Института катализа, Института химии твердого тела, Института теплофизики, Иркутского института химии; а также из Томского государственного и политехнического университетов, НГУ, ЛГУ и НИТУ МИСиС. Расширяется круг зарубежных организаций, взаимодействие с которыми идет на постоянной основе. В связи с этим необходимо упомянуть Университет Тохоку (г. Сендай), Муроранский технологический институт, Национальный институт материаловедения (г. Цукуба) в Японии; Институт физики, Институт полупроводников, Институт керамики Китайской академии наук; Национальную физическую лабораторию и Центр передовых исследований в Индии; Технологические университеты в Дармштадте и Дрездене в Германии и др.

У членов Школы много планов, касающихся новых объектов, новых подходов и путей исследования, а также областей приложения результатов. Есть уверенность в том, что участники Школы смогут внести заметный вклад в развитие производства высокотехнологической продукции в стране.

Заключение

Академик Федор Андреевич Кузнецов был ведущим специалистом в России и за рубежом в области разработки научных основ создания новых материалов электронной техники. Основными направлениями его научных исследований являлись разработка физико–химических основ создания материалов и структур с заданными свойствами, экспериментальное и теоретико–расчетное изучение процессов синтеза и деградации материалов и структур, разработка новых процессов синтеза и аппаратуры, материаловедческая информатика.

Итогом этих исследований стало развитие наиболее используемого в микроэлектронной технологии процесса химического осаждения из газовой фазы. Были проведены обширные исследования взаимосвязи структуры и состава вещества многослойных структур, составляющих основу элементной базы вычислительной техники с физическими параметрами. Заслугой академика Ф. А. Кузнецова было развитие в стране исследований по информационному обеспечению работ по материаловедению и структурной химии. Под его руководством в ИНХ СО РАН создан банк данных свойств материалов электронной техники (СМЭТ), включающий базу термодинамических и кристаллоструктурных данных и комплекс оригинальных программ. К наиболее ярким достижениям Школы следует отнести создание технологии роста оксидных кристаллов высокого качества, рекордные характеристики которых обеспечивают мировое лидерство. Результаты фундаментальных и прикладных исследований, полученные Школой Ф. А. Кузнецова по ряду других материалов (полупроводниковые кристаллы и пленки, особо чистые

соединения, оптические редкоземельные и углеродные материалы) известны научной общественности в нашей стране и за рубежом.

Ф. А. Кузнецов был лидером и генератором идей и объединял многих своим энтузиазмом, отношением к работе и науке.. Каждый, кто общался с ним, ощущал гигантский ум, обширные познания, нестандартность мышления и неизменную интеллигентность и доброжелательность этого человека. Он запомнился нам как целеустремленный и неутомимый человек. Своей компетентностью, благородством и бескорыстием он заслужил уважение и любовь своих коллег и друзей. И уже то, что результаты работы созданной им Школы имеют фундаментальное и прикладное значение сегодня и будут востребованы в будущем, есть огромная заслуга и научное и человеческое наследие Ф. А. Кузнецова. Мы помним, любим его и гордимся тем, что нам выпала честь работать вместе с Федором Андреевичем.

Библиографический список

1. Резниченко, М. Ф. Способ получения трихлорсилана / М. Ф. Резниченко, Б. М. Кучумов, Ф. А. Кузнецов, Н. К. Куксанов, С. А. Муравицкий, А. В. Лаврухин, А. И. Корчагин, Л. А. Борисова // Пат. RU (11) 2147292(13) С1. 18.02.1999.
2. Резниченко, М. Ф. Использование промышленных ускорителей электронов для активации процессов в технологии кремния / М. Ф. Резниченко, Ф. А. Кузнецов, Н. К. Куксанов, Б. М. Кучумов // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. – 2001. – № 4. – С. 28–31.
3. Титов, В. А. Термодинамическое моделирование процесса водородного восстановления трихлорсилана при повышенных давлениях / В. А. Титов, С. В. Сысоев, А. А. Титов, Л. А. Борисова // Тез. докл. семинара СО РАН–УрО РАН. «Термодинамика и неорганические материалы». – Новосибирск, – 2001. – С. 164.
4. Belyi, V. I. Chemical non-uniformity of thin dielectric films produced by ammonolysis of monosilane / V. I. Belyi, F. A. Kuznetsov, T. P. Smirnova, L. V. Chramova, L. Kh. Kravchenko // Thin Solid Films. – 1976. – V. 37. – P. L39–L42.
5. Smirnova, T. P. The mechanism of dehydrogenation of Si_nx:H films / T. P. Smirnova, L. V. Yakovkina // Ibid. – 1997. – V. 293. – P. 6–10.
6. Belyi, V. I. Phase composition and structure of native oxides on Al^{III}B^V semiconductors / V. I. Belyi, T. P. Smirnova, N. F. Zakhar-chuk // Appl. Surf. Sci. – 1989. – V. 39. – P. 161–167.
7. Смирнова, Т. П. Фазовый состав и структура пленок собственного оксида на GaAs / Т. П. Смирнова, Н. Д. Захарчук, В. И. Белый // Неорган. материалы. – 1991. – Т. 26. – С. 492–499.
8. Smirnova, T. P. Chemical vapor deposition and characterization of hafnium oxide films / T. P. Smirnova, L. V. Yakovkina, V. N. Kitchai, V. V. Kaichev, Yu. V. Shubin, N. V. Morozova, K. V. Zherikova // J. Phys. Chem. Sol. – 2008. – V. 69, N 2–3. – P. 685–687.
9. Smirnova, T. P. Phase formation in double oxide films of Hf–La–O system / T. P. Smirnova, L. V. Yakovkina, V. O. Borisov // J. Crystal Growth. – 2013. – V. 377. – P. 212–216.
10. Smirnova, T. P. SiCN Alloys obtained by remote plasma chemical vapor deposition from novel precursors / T. P. Smirnova, A. M. Badalian, L. V. Yakovkina, V. V. Kaichev, V. I. Bukhtiyarov, A. N. Shmakov, I. P. Asanov, V. I. Rachlin, A. N. Fomina // Thin Solid Films. – 2003. – V. 429. – P. 144–151.
11. Кузнецов, Ф. А. Новые металлорганические прекурсоры и процессы химического осаждения из газовой фазы в технологиях наноматериалов / Ф. А. Кузнецов, Т. П. Смирнова, Н. И. Файнер, Н. Б. Морозова, И. К. Игуменов // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. – 2012. – № 2. – С. 4–12.
12. Кузнецов, Ф. А. Фундаментальные основы процессов химического осаждения пленок и структур для нанoeлектроники / Ф. А. Кузнецов, М. Г. Воронков, В. О. Борисов, И. К. Игуменов, В. В. Каичев, В. Г. Кеслер, В. В. Кириенко, В. Н. Кичай, М. Л. Косинова, В. В. Кривенцев, М. С. Лебедев, А. В. Лис, Н. Б. Морозова, Л. Д. Никулина, В. И. Рахлин, Ю. М. Румянцев, Т. П. Смирнова, В. С. Суляева, С. В. Сысоев, А. А. Титов, Н. И. Файнер, И. П. Цырендоржиева, Л. И. Чернявский, Л. В. Яковкина // Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2013. – 175 с.
13. Файнер, Н. И. От кремнийорганических соединений–предшественников — к многофункциональному карбонитриду кремния / Н. И. Файнер // ЖОХ. – 2012. – Т. 82, № 1. – С. 47–56.
14. Fainer, N. I. Thin silicon carbonitride films are perspective low-k materials / N. I. Fainer, M. L. Kosinova, Yu. M. Romyantsev, E. A. Maximovskii, F. A. Kuznetsov // J. Phys. Chem. Solids. – 2008. – V. 69. – P. 661–668.
15. Akkerman, Z. L. Chemical stability of hydrogen-containing boron nitride films obtained by plasma enhanced chemical vapour deposition / Z. L. Akkerman, M. L. Kosinova, N. I. Fainer, Yu. M. Romyantsev, N. P. Syssoeva // Thin Solid Films. – 1995. – V. 260. – P. 156–161.
16. Sulyaeva, V. S. PECVD synthesis and optical properties of BC_xN_y films obtained from N-triethylborazine as a single-source precursor / V. S. Sulyaeva, M. L. Kosinova, Yu. M. Romyantsev, V. G. Kesler, F. A. Kuznetsov // Surf. Coat. Tech. – 2013. – V. 230. – P. 145–151.
17. Голубенко, А. Н. Термодинамическое моделирование процесса химического осаждения фаз различного состава в системе В–С–N из смеси N–триметилборазина и аммиака // А. Н. Голубенко, М. Л. Косинова, А. А. Титов, Ф. А. Кузнецов / Неорган. материалы. – 2012. – Т. 48, № 7. – С. 792–795.
18. Pavlyuk, A. A. Low thermal gradient technique and method for large oxide crystals growth from melt and flux / A. A. Pavlyuk, Ya. V. Vasiliev, L. Yu. Kharchenko, F. A. Kuznetsov // Proc. of APSAM–92 (Asia Pacific Society for Advanced Materials). – Shanghai, China, 1992. P. 164–171.
19. Васильев, Я. В. Экспортно ориентированное производство сцинтилляционных элементов ВГО / Я. В. Васильев, Г. Н. Кузнецов, Ю. Г. Стенин, В. Н. Шлегель // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. – 2001. – № 3. – С. 18–22.
20. Borovlev, Yu. A. Progress in growth of large sized BGO crystals by the low-thermal-gradient Czochralski technique / Yu. A. Borovlev, N. V. Ivannikova, V. N. Shlegel, Ya. V. Vasiliev, V. A. Gusev // J. Cryst. Growth. – 2001. – V. 229, Iss. 1–4. – P. 305–311.
21. Mamedov, V. M. Control of multi-zone resistive heater in low temperature gradient BGO Czochralski growth with a weighing feedback, based on the global dynamic heat transfer model / V. M. Mamedov, M. G. Vasiliev, V. S. Yuferev, D. Pantsurkin, V. N. Shlegel, Ya. V. Vasiliev // Ibid. – 2010. – V. 312. – P. 2814–2822.
22. Васильев, Я. В. Низкоградиентная технология роста сцинтилляционных оксидных кристаллов / Я. В. Васильев, Ю. А. Боровлев, Е. Н. Галашов, Н. В. Иванникова, Ф. А. Кузнецов, А. А. Павлюк, Ю. Г. Стенин, В. Н. Шлегель // Сцинтилляционные материалы. Инженерия, устройства, применение. – Харьков: ИСМА, 2011. – С. 119–180.
23. Beeman, J. W. A next-generation neutrinoless double beta decay experiment based on ZnMoO₄ scintillating bolometers / J. W. Beeman, F. A. Danevich, V. Ya. Degoda, E. N. Galashov, A. Giuliani, V. V. Kobychov, M. Mancuso, S. Marnieros, C. Nonese, E. Olivieri, G. Pessina, C. Rusconi, V. N. Shlegel, V. I. Tretyak, Ya. V. Vasiliev // Phys. Lett. B. – 2012. – V. 710. – P. 318–323.
24. Kasimkin, P. V. A new approach to the CZ crystal growth weighing control / P. V. Kasimkin, V. A. Moskovskikh, Y. V. Vasiliev, V. N. Shlegel, V. S. Yuferev, M. G. Vasiliev, V. N. Zhdankov // J. Cryst. Growth. – 2014. – V. 390. – P. 67–70.
25. Кузнецов, Ф. А. Термодинамическое моделирование в электронном материаловедении / Ф. А. Кузнецов // Процессы роста полупроводниковых кристаллов и пленок. – Новосибирск : Наука, 1988. – 198 с.
26. Kuznetsov, F. A. Data bank of properties of microelectronic materials / F. A. Kuznetsov, V. A. Titov, A. A. Titov, L. I. Chernyavskii // Proc. Int. Sump. on Adv. Mater. – Jap., 1995. – P. 16–32.

Работы выполнены в рамках интеграционных проектов СО РАН, проектов по программам Президиума РАН, Минобрнауки РФ, ИНТАС, МФТИ и грантов РФФИ.

Статья поступила в редакцию 03 апреля 2014 года.

Chemistry and Functional Materials. School of Sciences of Academician F. A. Kuznetsov

Kosinova Marina Leonidovna* — Head of Laboratory, PhD; **Vasil'eva Inga Grigor'evna*** — Chief Researcher, DrSc; **Vasil'ev Yan Vladimirovich*** — Leading Researcher, PhD, **Smirnova Tamara Pavlovna*** — Chief Researcher, DrSc.

*Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Acad. Lavrentjev Pr., 3

Abstracts. The paper presents a wide range of problems associated with the formation, development and practical implementation of research in materials science, carried out under direct leadership of Academician F. A. Kuznetsov by the team of researchers from the Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry SB RAS. It shows the fruitfulness of his ideas of complex physicochemical research into each stage of the preparation of material from the precursor to the finished specific device element. Attention is drawn to his accurate prediction of the importance of selectable objects of study, his ability to correlate ongoing research with urgent global issues such as electronics, computer science, energy and photovoltaics and his skill to rally the team with a common idea and encourage active participation in the development of science both in Russia and internationally while remaining the main driving force of conducted advanced work. The paper is written in the memory of the eminent person, organizer of science, scientist and patriot whose work has always been focused on breakthrough technologies that ensure the prosperity and security of the Motherland.

Keywords: materials of electronic technics, silicon, growth of crystals, oxidic crystals, chemical sedimentation from a gas phase, thermodynamic modelling.

References

1. Reznichenko M. F., Kuchumov B. M., Kuznetsov F. A., Kuskhanov N. K., Muravitskii S. A., Lavrukhin A. V., Korchagin A. I., Borisova L. A. Sposob polucheniya trihlorsilana // Pat. RU (11) 2147292(13) Cl. 18.02.1999. (In Russ.).
2. Reznichenko M. F., Kuznetsov F. A., Kuskhanov N. K., Kuchumov B. M. Use of industrial accelerators of electrons for activation of processes in technology of silicon. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronic Technics. 2001, no. 4, pp. 28–31.* (In Russ.).
3. Titov V. A., Sysoev S. V., Titov A. A., Borisova L. A. Termodinamicheskoe modelirovanie processa vodorodnogo vosstanovleniya trihlorsilana pri povyshennykh davleniyah [Thermodynamic modeling of the hydrogen reduction of trichlorosilane at elevated pressures]. *Tez. dokl. seminarov SO RAN–UrO RAN. «Termodinamika i neorganicheskie materialy».* Novosibirsk, 2001. P. 164. (In Russ.).
4. Belyi V. I., Kuznetsov F. A., Smirnova T. P., Chramova L. V., Kravchenko L. Kh. Chemical non-uniformity of thin dielectric films produced by ammonolysis of monosilane. *Thin Solid Films. 1976, vol. 37, pp. L39–L42.*
5. Smirnova T. P., Yakovkina L. V. The mechanism of dehydrogenation of $\text{SiN}_x : \text{H}$ films. *Thin Solid Films. 1997, vol. 293, pp. 6–10.*
6. Belyi V. I., Smirnova T. P., Zakharchuk N. F. Phase composition and structure of native oxides on $A^{III}B^V$ semiconductors. *Appl. Surf. Sci. 1989, vol. 39, pp. 161–167.*
7. Smirnova T. P., Zakharchuk N. D., Belyi V. I. Phase structure and structure of films of own oxide on GaAs. *Neorganicheskie materialy. 1991, vol. 26, pp. 492–499.* (In Russ.).
8. Smirnova T. P., Yakovkina L. V., Kitchai V. N., Kaichev V. V., Shubin Yu. V., Morozova N. V., Zherikova K. V. Chemical vapor deposition and characterization of hafnium oxide films. *J. Phys. Chem. Sol. 2008, vol. 69, no. 2–3, pp. 685–687.*
9. Smirnova T. P., Yakovkina L. V., Borisov V. O. Phase formation in double oxide films of Hf–La–O system. *J. Crystal Growth. 2013, vol. 377, pp. 212–216.*
10. Smirnova T. P., Badalian A. M., Yakovkina L. V., Kaichev V. V., Bukhtiyarov V. I., A. N. Shmakov, I. P. Asanov. V. I. Rachlin, A. N. Fomina SiCN Alloys obtained by remote plasma chemical vapor deposition from novel precursors. *Thin Solid Films. 2003, vol. 429, pp. 144–151.*
11. Kuznetsov F. A., Smirnova T. P., Fainer N. I., Morozova N. B., Igumenov I. K. New metallorganichesky precursors and processes of chemical sedimentation of a gas phase in technologies of nanomaterials. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronic Technics. 2012, no. 2, pp. 4–12.* (In Russ.).
12. Kuznetsov F. A., Voronkov M. G., Borisov V. O., Igumenov I. K., Kaichev V. V., Kesler V. G., Kirienko V. V., Kichai V. N., Kosinova M. L., Kriventsev V. V., Lebedev M. S., Lis A. V., Morozova N. B., Nikulina L. D., Rakhlin V. I., Rumyantsev Yu. M., Smirnova T. P., Sulyaeva V. S., Sysoev S. V., Titov A. A., Fainer N. I., Tsyrendorzhieva I. P., Chernyavskii L. I., Yakovkina L. V. Fundamental'nye osnovy protsessov khimicheskogo osazhdeniya plenok i struktur dlya nanoelektroniki [Fundamental bases of processes of chemical sedimentation of films and structures for a nanoelectronics]. *Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2013. 175 p.* (In Russ.).
13. Fainer N. I. From organosilicon precursors — the multifunctional silicon carbonitride. *Zhurnal obshchei khimii, 2012, vol. 82, no. 1, pp. 47–56.* (In Russ.).
14. Fainer N. I., Kosinova M. L., Rumyantsev Yu. M., Maximovskii E. A., Kuznetsov F. A. Thin silicon carbonitride films are perspective low-k materials. *J. Phys. Chem. Solids. 2008, vol. 69, pp. 661–668.*
15. Akkerman Z. L., Kosinova M. L., Fainer N. I., Rumyantsev Yu. M., Sysoeva N. P. Chemical stability of hydrogen-containing boron nitride films obtained by plasma enhanced chemical vapour deposition. *Thin Solid Films. 1995, vol. 260, pp. 156–161.*
16. Sulyaeva V. S., Kosinova M. L., Rumyantsev Yu. M., Kesler V. G., Kuznetsov F. A. PECVD synthesis and optical properties of BC_xN_y films obtained from N-triethylborazine as a single-source precursor. *Surf. Coat. Tech. 2013, vol. 230, pp. 145–151.*
17. Golubenko A. N., Kosinova M. L., Titov A. A., Kuznetsov F. A. Thermodynamic modeling of BCN chemical vapor deposition from N-trimethylborazine + ammonia mixtures. *Neorganicheskie materialy. 2012, vol. 48, no. 7, pp. 792–795.* (In Russ.).
18. Pavlyuk A. A., Vasiliev Ya. V., Kharchenko L. Yu., Kuznetsov F. A. Low thermal gradient technique and method for large oxide crystals growth from melt and flux. *Proc. of APSAM-92 (Asia Pacific Society for Advanced Materials).* Shanghai, China, 1992. Pp. 164–171.
19. Vasil'ev Ya. V., Kuznetsov G. N., Stenin Yu. G., Shlegel V. N. Exportion of the focused production of the scintillation elements BGO. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronic Technics. 2001, no. 3, pp. 18–22.* (In Russ.).
20. Borovlev Yu. A., Ivannikova N. V., Shlegel V. N., Vasiliev Ya. V., Gusev V. A. Progress in growth of large sized BGO crystals by the low-thermal-gradient Czochralski technique. *J. Cryst. Growth. 2001, vol. 229, iss. 1–4, pp. 305–311.*
21. Mamedov V. M., Vasiliev M. G., Yuferev V. S., Pantsurkin D., Shlegel V. N., Vasiliev Ya. V. Control of multi-zone resistive heater in low temperature gradient BGO Czochralski growth with a weighing feedback, based on the global dynamic heat transfer model. *J. Cryst. Growth. 2010, vol. 312, pp. 2814–2822.*
22. Vasiliev Ya. V., Borovlev Yu. A., Galashov E. N., Ivannikova N. V., Kuznetsov F. A., Pavlyuk A. A., Stenin Yu. G., Shlegel V. N. Nizkogradientnaya tekhnologiya rosta stintillyatsionnykh oksidnykh kristallov [Low-gradient technology of growth of scintillation oxide crystals] *Stintillyatsionnyye materialy. Inzheneriya, ustroystva, primeniye.* – Khar'kov: ISMA, 2011. P. 119–180. (In Russ.).
23. Beeman, J. W., Danevich F. A., Degoda V. Ya., Galashov E. N., Giuliani A., Kobaychev V. V., Mancuso M., Marnieros S., Nonese C., Olivieri E., Pessina G., Rusconi C., Shlegel V. N., Tretyak V. I., Vasiliev Ya. V. A next-generation neutrinoless double beta decay experiment based on ZnMoO_4 scintillating bolometers. *Phys. Lett. B. 2012, vol. 710, pp. 318–323.*
24. Kasimkin P. V., Moskovskii V. A., Vasiliev Y. V., Shlegel V. N., Yuferev V. S., Vasiliev M. G., Zhdankov V. N. A new approach to the CZ crystal growth weighing control. *J. Cryst. Growth. 2014, vol. 390, pp. 67–70.*
25. Kuznetsov F. A. Termodinamicheskoe modelirovanie v elektronnom materialovedenii [Thermodynamic modeling in electronic materials science]. *Processy rosta poluprovodnikovyykh kristallov i plenok.* Novosibirsk: Nauka, 1988. 198 pp. (In Russ.).
26. Kuznetsov F. A., Titov V. A., Titov A. A., Chernyavskii L. I. Data bank of properties of microelectronic materials. *Proc. Int. Sump. on Adv. Mater. Jap., 1995. Pp. 16–32.*

Acknowledgements: The works have been performed within integration projects of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, projects under programs of the Presidium of the Russian Academy of Sciences, the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, INTAS, MFTI and grants of the Russian Federal Property Fund.