

**В Е С Т Н И К
ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

ОБЩЕНАУЧНЫЙ ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№ 285

Январь

2005

Серия «Физика»

Свидетельства о регистрации: бумажный вариант № 018694, электронный вариант № 018693
выданы Госкомпечати РФ 14 апреля 1999 г.

ISSN: печатный вариант – 1561-7793; электронный вариант – 1561-803X
от 20 апреля 1999 г. Международного Центра ISSN (Париж)

**СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК,
посвященный 50-летию организации в ТГУ научного и образовательного направлений
по физике полупроводников**

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	2
--------------------------	----------

**ИСТОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ
НАУЧНОГО И ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО НАПРАВЛЕНИЙ**

Вяткин А.П., Кривов М.А., Лаврентьева Л.Г. История организации и становления научного направления по физике полупроводников в Томском университете и Сибирском физико-техническом институте	3
Романова И.Д. Научно-исследовательскому институту полупроводниковых приборов 40 лет	13
Лаврентьева Л.Г., Ивонин И.В. Основные этапы развития научного направления по эпитаксии полупроводников в СФТИ	17
Воеводин В.Г. Лаборатория полупроводникового материаловедения СФТИ	24
Хлудков С.С. Становление и развитие лаборатории физики полупроводников	28
Вяткин А.П., Вилисов А.А. Развитие физико-технологических основ создания полупроводниковых приборов	33
Войцеховский А.В., Коханенко А.П. Высокочувствительные приемники оптического излучения	39
Мокроусов Г.М. Физико-химические аспекты электронного материаловедения	43
Войцеховский А.В., Гаман В.И., Гермогенов В.П., Ивонин И.В., Лаврентьева Л.Г., Мокроусов Г.М. Подготовка специалистов в области физики и техники полупроводников в Томском госуниверситете	47

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ (ОБЗОРЫ)

Караваев Г.Ф., Гриняев С.Н., Чернышов В.Н. Исследование электронных процессов в наноструктурах	53
Воеводин В.Г., Чалдышев В.А. Исследование тройных полупроводников $A^2B^4C_2^5$	63
Лаврентьева Л.Г., Вилисова М.Д., Ивонин И.В. Газофазовая эпитаксия арсенида галлия	74
Хлудков С.С. Диффузия примесей в арсениде галлия, диффузионные структуры и приборы	84
Брудный В.Н. Радиационные эффекты в полупроводниках	95
Гермогенов В.П. От сплавных контактов к эпитаксиальным гетероструктурам	103
Гаман В.И. Электронные процессы в полупроводниковых диодах и структурах металл – диэлектрик – полупроводник	112
Вяткин А.П., Максимова Н.К., Филонов Н.Г. Электрофизические свойства структур с барьером Шоттки на GaAs	121
Божков В.Г., Лукаш В.С. Полупроводниковые СВЧ-приборы	129
Криворотов Н.П., Изаак Т.И., Ромась Л.М., Свинолупов Ю.Г., Щеголь С.С. Микроэлектронные сенсоры давления	139
Вилисов А.А. Светоизлучающие диоды	148
Толбанов О.П. Детекторы ионизирующих излучений на основе компенсированного арсенида галлия	155
Войцеховский А.В., Несмелов С.Н. Фотоэлектрические инфракрасные детекторы с управляемой спектральной характеристикой	164

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	172
--	------------

РЕФЕРАТЫ СТАТЕЙ НА РУССКОМ И АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКАХ	174
---	------------

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ НАУЧНОГО НАПРАВЛЕНИЯ ПО ЭПИТАКСИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ В СФТИ

1. ВВЕДЕНИЕ: ФОРМИРОВАНИЕ НАУЧНОГО НАПРАВЛЕНИЯ И КОЛЛЕКТИВА

В 1950-е гг. было установлено, что оптимальные параметры полупроводниковых приборов с $p-n$ -переходами реализуются на монокристаллическом материале, причем p - и n -слои в приборах, как правило, должны быть микронной толщины. Были начаты разработки технологий выращивания монокристаллических слоев полупроводников на таких же подложках (автоэпитаксия или гомоэпитаксия) либо на подложках из другого полупроводникового материала (гетероэпитаксия). Развитие эпитаксиальных технологий шло по трем основным направлениям: газофазовая, жидкофазовая, молекулярно-лучевая эпитаксия (ГФЭ, ЖФЭ, МЛЭ соответственно).

Возможности газофазового транспорта [1] применительно к полупроводникам, по-видимому, впервые были продемонстрированы на германии и кремнии в работе Н.Н. Шефтеля с соавторами [2], а затем в публикациях сотрудников IBM [3] и RCA [4].

В СФТИ исследования по ГФЭ были начаты по инициативе и под непосредственным руководством В.А. Преснова в 1960 г. Уже в 1961 г. в рамках лаборатории полупроводников СФТИ сформировалась научная группа, проводившая исследования эпитаксии арсенида галлия и германия (Л.Г. Лаврентьева – руководитель, М.Д. Вилисова, Ю.Г. Катаев, И.К. Ковалев, Н.К. Курындина, В.А. Московкин, В.С. Мурашко). Изучение структуры пленок выполнялось в группе структурных методов (М.П. Якубеня – руководитель, О.М. Ивлева, Б.Г. Захаров).



Зав. лабораторией эпитаксиальных структур (1974 – 1994) Л.Г. Лаврентьева

К началу работ сведений по термодинамике и кинетике газового переноса и свойствам пленок арсенида галлия в доступной нам литературе не было. Однако в группе А.П. Изергина, занимавшейся в СФТИ синтезом и выращиванием монокристаллов GaAs, бы-

ло замечено, что в технологической вакуумированной системе происходит перенос вещества из горячей зоны в холодную с образованием тонкой пленки арсенида галлия на поверхности кварца. В.А. Преснов предложил использовать это явление в технологии выращивания слоев GaAs. Эксперименты (М.Д. Вилисова, В.С. Мурашко) проводились в вакуумированных кварцевых ампулах, размещаемых в печи с градиентом температуры. Испаряемым материалом (источником) служил поликристаллический GaAs, синтезированный в группе А.П. Изергина. Поскольку целенаправленное введение транспортного агента в ампулу не производилось, предполагали, что основой процесса является сублимация GaAs [5,6]. Позднее было установлено, что в ампуле имеет место химический транспорт GaAs с участием паров воды [7]. На первых поликристаллических пленках GaAs, осажденных на радиокерамике и легированных цинком в процессе роста, оценивались возможности создания матриц туннельных диодов для ЭВМ [8]. Заказчиком данной работы выступал Ленинградский КБ-2 (директор Ф.Г. Старос). В это же время были начаты работы по выращиванию слоев GaAs с помощью йода в закрытых, а затем в открытых системах [9]. На 1-й конференции по арсениду галлия (Томск, сентябрь 1965) была представлена серия докладов по влиянию условий выращивания эпитаксиальных слоев GaAs на их структуру, электрические свойства и параметры диодов на их основе [10 – 12].

В 1960-е гг. были выполнены исследования анизотропии скорости роста GaAs и захвата примеси в условиях ГФЭ при плавном изменении ориентаций подложек в кристаллографическом интервале (111)Ga – (001) – (111)As [13 – 15]. Результаты были представлены на 2-м Всесоюзном совещании по арсениду галлия (Томск, сентябрь 1968). Как нам стало известно позднее, практически одновременно с нами данные по анизотропии скорости роста GaAs в хлоридной системе опубликовал Д. Шоу (D. Shaw) [16]. Отметим, что наши данные были значительно более полными. Они содержали сведения: для двух газотранспортных систем (йодидной и хлоридной), по анизотропии легирования GaAs, а также изложение основ теоретической модели, объясняющей механизмы эффектов анизотропии. Модель, которая базировалась на теории послынного роста кристаллов Бартон – Кабреры – Франка (БКФ), была впервые применена нами к описанию процессов захвата примеси [15, 17]. Результаты по анизотропии роста и легирования GaAs в системах ГФЭ привлекли внимание многих исследователей как в СССР, так и за рубежом. К сожалению, опубликовать эти результаты в зарубежных научных журналах в то время было невозможно из-за значимости технологии GaAs для военной техники. В результате СФТИ фактически потерял научный приоритет по данной тематике, в научных публикациях преобладали ссылки на работы Д. Шоу. При личной встрече, которая состоялась лишь в 1996 г. в Санкт-Петербурге на 23-м

Международном симпозиуме по арсениду галлия, Д. Шоу отметил, что его всегда очень интересовали наши публикации.

Успехи в изучении и практическом освоении ГФЭ GaAs привели к расширению фронта работ. Увеличивался и коллектив, объединяющий группу пленок и группу структурных исследований. Частично он пополнялся за счет специалистов из вне, но, главным образом, за счет выпускников ТГУ и ТУСУРа (тогда ТИРиЭТ). В группу пленок вошли аспирант ТГУ В.Я. Дворкович (будущий шахматный судья международной категории), к.ф.-м.н. Г.М. Иконникова, Л.Е. Эпиктетова, а также выпускники ТГУ (Л.Г. Нестерюк (1965), Е.Г. Сироткин (1966), В.А. Московкин (1965), С.П. Гайдарева (1968), В.В. Романов (1969), В.М. Сенникова (1970), Н.Г. Зеленская, С.Е. Торопов

(1971), А.Д. Шумков (1971, будущий чемпион Европы и мира по плаванию в ластах), М.П. Рузайкин (1972)) и ТИРиЭТа (И.С. Захаров (в 1965 – 1967 – студент ТИРиЭТа, в 1967 – 1970 – аспирант ТГУ, ныне – ректор Курского политехнического университета), В.В. Складенко (1965), Л.П. Пороховниченко (1971), Н.А. Чернов (1975)). Структурную группу дополнили Б.Г. Захаров (1962, ЛГУ), к.ф.-м.н. Л.М. Красильникова (1950, ТГУ), И.В. Ивонин (1969, ТГУ), И.А. Вяткина (Бобровникова, 1974, ТГУ), Н.Н. Криволапов (1975, ТГУ). В коллектив пришли талантливые инженеры и техники Ю.С. Мельченко, П.И. Кучерук, С.М. Долгих (студенты-вечерники томских технических вузов), Ю.Н. Мясников (студент-вечерник, будущий филолог), выпускники Томского приборного техникума Т.В. Костянова, Л.П. Яковлева, Н.Н. Путилова.



Научный семинар в группе эпитаксиальных пленок, 1971 г. Первый ряд слева направо: В.А. Московкин, В.Д. Романов, Л.Г. Нестерюк, Л.Г. Лаврентьева, М.Д. Вилисова; второй ряд: Е.Г. Сироткин, Л.Е. Эпиктетова, С.П. Гайдарева

По мере количественного роста в коллективе формировались группы сотрудников по специализациям: технологическая группа, группа электрофизических измерений, теоретическая группа, группа структурных исследований. В 1973 г. эти группы объединились в лабораторию эпитаксиальных структур (ЛЭС). В 1983 – 1985 гг. численность коллектива ЛЭС отдела физики полупроводников СФТИ доходила до 30 человек.

С целью повышения квалификации коллектива в области физики роста кристаллов и химической термодинамики был организован научный семинар, на котором сотрудники выступали с лекциями по соответствующим разделам. Для чтения лекций приглашали также ведущих специалистов из АН СССР. В 1966 г. Ф.А. Кузнецов (канд. хим. наук, зав. лабораторией в Институте неорганической химии СО АН СССР, ныне – директор этого института, академик РАН) по приглашению ТГУ прочел курс лекций по термодинамике транспортных реакций для студентов

и сотрудников. Лекции по теории роста кристаллов (1978) читал проф. А.А. Чернов (зав. лаб. Института кристаллографии АН СССР, ныне – чл.-корр. РАН), завершавший подготовку к изданию 3-го тома академического четырехтомника «Современная кристаллография» [18]. В конечном счете, лекции и семинары способствовали повышению уровня исследований, более точной и квалифицированной постановке научных задач, а также организации научных контактов с академическими институтами. Совместные работы по эпитаксии германия и арсенида галлия в йодидных системах с ИНХ СО АН [19, 20] позволили продвинуться в изучении механизма роста авто- и гетероэпитаксиальных слоев Ge и свойств гетеропереходов Ge/GaAs, что явилось основой кандидатской диссертации И.С. Захарова. С ИК АН были выполнены работы по теории процессов кристаллизации, результаты которых были представлены в диссертации М.П. Рузайкина [21, 22].

В развитии исследований по эпитаксии положи- тельную роль сыграло открытие в Томске в 1964 г. НИИ полупроводниковых приборов (ныне ОАО «НИИПП»), где ГФЭ GaAs сразу же стала и до сих пор является одной из основных технологий произ- водства материалов для создания СВЧ-приборов. Ес- ли до 1964 г. в СФТИ исследования в области эпита- ксии выполнялись по заказам московских и ленинград- ских НИИ, то после 1964 г. НИИПП стал основным заказчиком и потребителем научных результатов по данной тематике. В отдел материалов НИИПП при- шли работать специалисты из СФТИ и ТГУ, а также молодые выпускники ТГУ и ТИРиЭТа (Л.Н. Возми- лова, к.х.н. – зав. химической лабораторией, Б.Г. За- харов, к.ф.-м.н. – зав. рентгеноспектральной лабора- торией, Л.П. Пороховниченко, Н.Н. Бакин, Н.Н. Ива- нова, В.А. Дворкович, П.Н. Тымчишин – лаборатория ГФЭ). В последующие годы Л.П. Пороховниченко обучалась в аспирантуре ТГУ, на базе ЛЭС СФТИ выполнила цикл исследований по кинетике роста и легирования GaAs в условиях ГФЭ, а после защиты кандидатской диссертации возвратилась в НИИПП и стала ведущим специалистом-технологом, зав. лаб. ГФЭ. Позднее из СФТИ в НИИПП перешел Н.А. Чер- нов – молодой, но перспективный инженер-технолог, в последующем – зав. лаб. МОС-гидридной эпита- ксии. Уровень технологии в НИИПП был выше, чем в СФТИ. Там имелись возможности для организации технологических помещений высокой степени чистоты, приобретения чистых химических реактивов, утили- зации технологических отходов, проведения хими- ческих анализов и рентгеноспектральных измерений. Эти возможности использовались при выполнении совместных работ по ГФЭ.

После организации отдела материалов в НИИПП наступил период наиболее активного и эффективного развития исследований в области эпитаксии полупро- водников в Томске.

2. ИЗУЧЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ГФЭ GaAs и InAs

В 1970-е гг. были выполнены детальные исследо- вания кинетики роста и кинетики легирования арсе- нидом галлия в газотранспортных системах и получены данные по зависимости скорости роста и скорости за- хвата примеси от всех основных параметров процесса ГФЭ (давления паров транспортного агента, пересы- щения, температуры, концентрации примеси, кри- сталлографических индексов поверхности подложки). В эти же годы были поставлены электронномикро- скопические исследования рельефа поверхности эпи- таксиальных слоев Ge и GaAs (Л.М. Красильникова – руководитель, И.В. Ивонин, Л.В. Масарновский) и был подтвержден ступенчато-слоевой механизм роста полупроводниковых материалов в условиях ГФЭ [23]. Тем самым впервые было доказано, что использование гетерогенной химической реакции не изменяет основной механизм роста кристалла.

В 1970-е гг. было начато детальное изучение влияния состояния поверхности подложки на рост эпитаксиального GaAs. [20, 24]. Было обнаружено

сильное влияние фоновых примесей на механизм рос- та, дефектообразование и профили фонового легиро- вания. Выяснилось, что центры торможения ступеней роста (ЦТС) возникают в результате взаимодействия ступеней с микрокаплями жидкой фазы, образующи- мися за счет локальной химической диссоциации GaAs-подложки до начала роста, и фоновых примесей с ее поверхности. Были выполнены детальные иссле- дования процессов формирования микрочастиц вто- рой фазы, их оттеснения фронтом кристаллизации, захвата в кристалл и возникновения вторичных де- фектов структуры. Было установлено, что дефекты типа ЦТС приводят к ускоренной деградации полу- проводниковых приборов [25]. Такого типа дефекты позднее были обнаружены нами при ГФЭ InAs, а так- же при МЛЭ GaAs (С.И. Стенин с сотр. ИФП СО АН СССР).

Исследования кинетики роста и кинетики легиро- вания InAs в хлоридной газотранспортной системе, выполненные совместно с сотрудниками НИИ «Пуль- сар» (Москва), выявили много общего в анизотропии скорости роста, анизотропии захвата примеси, форми- ровании микродефектов типа ЦТС для GaAs и InAs [26]. Таким образом, было показано, что закономер- ности эпитаксиального роста, изученные на примере GaAs, имеют общий характер и справедливы для дру- гих полупроводников этого класса.

В 1970-е гг. по инициативе Г.М. Иконниковой бы- ли проведены уникальные исследования по влиянию электрического поля, параллельного и нормального к поверхности, на рост слоев GaAs в хлоридной газо- транспортной системе. Удалось выявить влияние поля на скорость роста, рельеф ростовой поверхности и дефектообразование [27].

Результаты исследований были представлены на ряде всесоюзных научных конференций (научные со- вещения по арсениду галлия: Томск, 1965, 1968, 1972; симпозиумы по росту кристаллов и пленок полупро- водников: Новосибирск, 1967, 1969, 1972, 1975, 1978; совещания и конференции по росту кристаллов: Мо- сква, 1963, Цахкадзор, 1972, Тбилиси, 1977, Москва, 1980; конференции по микроэлектронике: Москва, 1970, 1972). Ряд ведущих сотрудников коллектива защитил кандидатские диссертации (Б.Г. Захаров (1966), И.С. Захаров (1970), М.Д. Вилисова (1972), Ю.Г. Катаев (1972), И.В. Ивонин (1978), Л.П. Поро- ховниченко (1979)).

В эти же годы по заказу НИИПП были начаты де- тальные исследования процессов легирования GaAs примесями, дающими глубокие акцепторные уровни (Fe, Cr, Mn) [28 – 30]. Была показана перспективность использования этих материалов в технологии изго- товления быстродействующих S-диодов, на основе которых создавалась метрика нового поколения для анализа жестких излучений.

Детальное изучение процесса легирования GaAs в условиях ГФЭ обнаружило ряд особенностей в кине- тике захвата примесей. В частности, обнаружилось, что в процессе легирования GaAs, наряду с образова- нием обычных твердых растворов замещения, форми- руются сложные дефекты (комплексы), включающие примесный атом и собственный точечный дефект (ва- кансию, междоузельный атом или антиструктурный

дефект). Комплексы, как правило, оптически активны и ответственны за появление полос в спектрах фотолюминесценции GaAs [31]. Детальные исследования, выполненные в условиях ГФЭ в присутствии ряда примесей (Te, S, Zn, Cd, Ge, Sn и др), выявили закономерности формирования сложных комплексов и их влияние на свойства эпитаксиального материала [32]. На основе этих данных была создана модель комплексобразования в условиях ГФЭ GaAs, учитывающая возможность неравновесного захвата бинарных молекул (As_2 , Te_2 , S_2 , Si_2 , Ge_2 , Sn_2) из адсорбционного слоя в кристалл с последующей их диссоциацией [33]. Расчеты равновесных составов газовой фазы и адсорбционных слоев подтвердили возможность реализации данного механизма [34].

В эти же годы в отделе физики полупроводников СФТИ разворачивались работы по синтезу тройных полупроводников $A^2B^4C^5_2$. В лаборатории эпитакси-

альных структур были выполнены эксперименты (Л.Г. Нестерюк) по выращиванию эпитаксиальных слоев $ZnGeP_2$ на подложках GaP в закрытой хлоридной системе с $ZnCl_2$ в качестве транспортного агента. Проведены термодинамические расчеты состава газовой фазы в таких системах (Е. Дриголенко), исследованы структура и свойства пленок [35].

Таким образом, в 1970 – 80-х гг. в лаборатории эпитаксиальных структур был получен большой объем экспериментальных данных и заложены основы модельных представлений о кинетике роста и легирования GaAs и других полупроводников в газофазовых системах. Полученный экспериментальный материал требовал серьезной теоретической проработки. В 1969 г. выпускник РФФ ТГУ В.В. Романов выполнил и защитил дипломную работу по моделированию процессов кристаллизации и затем успешно работал в качестве сотрудника лаборатории [36].



Лаборатория эпитаксиальных структур отдела физики полупроводников СФТИ, 1985 г. Первый ряд слева направо: Л.П. Яковлева, М.П. Якубеня, Л.Г. Лаврентьева, В.С. Мурашко, Л.М. Красильникова; второй ряд: М.В. Туршатова, О.М. Ивлева, Г.М. Иконникова, Ю.Г. Катаев, А.К. Серикова, М.Д. Вилисова, И.А. Бобровникова; третий ряд: В.А. Московкин, В.Б. Ябжанов, Н.Н. Криворотов, Ю.Ю. Эрвье, И.В. Ивонин, М.П. Рузайкин, С.В. Кривяков

Далее теоретические исследования были продолжены М.П. Рузайкиным. В 1974 г. он был направлен на стажировку в Институт кристаллографии АН СССР к профессору А.А. Чернову. Последующие расчеты по теоретическому анализу процессов ГФЭ выполнялись М.П. Рузайкиным совместно с А.А. Черновым, он же был научным руководителем кандидатской диссертации М.П. Рузайкина. Были выполнены расчеты равновесных составов газовой фазы и ад-

сорбционных слоев [21, 37], равновесных коэффициентов распределения примесей в системах ГФЭ [38], показана возможность фазовых переходов в плотных адсорбционных слоях [39, 40], рассмотрена кинетика захвата примеси в изломы на ступенях роста, в том числе с учетом асимметрии процессов на ступенях роста [22, 41], а также особенности зародышеобразования на сингулярных гранях в условиях ГФЭ [42]. В процессе выполнения этих расчетов сформировалась

группа теоретиков, в состав которой вошли выпускники ФФ ТГУ Ю.Ю. Эрвье (1983) и А.Б. Свечников (1984). Проводилось детальное квантово-химическое моделирование сложных адсорбционных процессов на поверхности полупроводников [43], теоретическое моделирование процессов роста и захвата примеси на сингулярных и вицинальных поверхностях применительно к молекулярно-лучевой эпитаксии [44]. Эти исследования продолжаются и в настоящее время.

Обобщенные результаты экспериментальных исследований кинетики роста и легирования, а также основы моделирования процессов роста и захвата примеси были представлены в докторской диссертации Л.Г. Лаврентьевой, защита которой состоялась в мае 1982 г. в Институте физики полупроводников СО АН СССР. В это же десятилетие защитили кандидатские диссертации М.П. Рузайкин (1982), С.Е. Торопов (1988), А.Б. Свечников (1988), И.А. Бобровникова (1989), Ю.Ю. Эрвье (1989). Позднее (1998) И.В. Ивоным была защищена докторская диссертация, в которой детально рассмотрены процессы формирования ростового рельефа и элементарные стадии поверхностных процессов при ГФЭ A^3B^5 .

3. ИЗУЧЕНИЕ ЛАТЕРАЛЬНОЙ ГФЭ GaAs и LT-МЛЭ GaAs

Новый этап в развитии исследований по эпитаксии GaAs наступил в 1990-е гг. В связи с перестройкой социально-экономической системы резко снизилось финансирование военно-промышленного комплекса и соответственно уменьшился фронт работ в области традиционной ГФЭ полупроводников. Появилась необходимость поиска научной тематики, финансируемой из других источников (программы, гранты).

Первоначально были предприняты попытки использовать имеющийся научный задел в практических целях. На основе данных по анизотропии скорости роста ГФЭ GaAs были выполнены разработки технологии латеральной эпитаксии, позволяющей получать структуры GaAs со встроенными металлическими и диэлектрическими фрагментами, которые могут быть использованы в СВЧ-приборах, оптоэлектронике и солнечной энергетике. Проведенные исследования показали возможность осуществления латеральной эпитаксии арсенида галлия поверх различных маскирующих покрытий [45]. К сожалению, финансирование этих разработок довольно быстро прекратилось.

Другим источником финансирования явилась государственная программа «Высокотемпературная сверхпроводимость», которая была посвящена поиску новых материалов, обладающих высокой критической температурой начала сверхпроводимости, изучению свойств таких материалов и областей их применения. Определенные надежды возлагались и на полупроводниковые материалы, в частности на LT-GaAs (Low Temperature GaAs, выращенный методом МЛЭ при низких температурах).

В России был создан творческий коллектив из сотрудников ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ИФП СО РАН и СФТИ при ТГУ. Научный проект «Исследование сверхпроводниковых аномалий в соединениях A^3B^5 , имеющих развитую кластерную структуру», пред-

ставленный коллективом, получил поддержку и был включен в программу «Высокотемпературная сверхпроводимость» (шифр «Арсеникум», рук. Л.Г. Лаврентьева). В ИФП СО РАН решалась задача выращивания слоев LT-GaAs. Сотрудники СФТИ исследовали их структуру, состав и электрофизические свойства, а сотрудники ФТИ им. А.Ф. Иоффе измеряли проводимость материала и его оптические спектры при гелиевых температурах, выполняли анализ состава пленок с целью определения возможных отклонений от стехиометрии и их влияния на эффект сверхпроводимости. Исследования, выполненные коллективом, показали, что появление эффекта сверхпроводимости в LT-GaAs обусловлено микровключениями галлия, либо индий-галлиевого сплава и связано с особенностями технологического процесса приготовления LT-GaAs [46].

Оказалось, что слои LT-GaAs, выращенные в условиях обогащения мышьяком, имеют ряд интересных и практически важных особенностей [47, 48]. В частности, понижение температуры МЛЭ от обычных 500 – 600 до 150 – 250 °С сопровождается аномально высоким захватом избыточного мышьяка в кристаллическую решетку LT-GaAs. Прецизионный микроанализ показал, что реальная концентрация сверхстехиометрического мышьяка в LT-GaAs может достигать 1,5 ат.%, что на 6 порядков превышает равновесную. Как следствие, кубическая решетка GaAs деформируется в тетрагональную. При отжиге в LT-GaAs формируются As-кластеры нанометровых размеров, статистически равномерно распределенные по объему GaAs-слоя. На границе кластер/матрица происходит закрепление уровня Ферми. В результате GaAs приобретает высокое удельное сопротивление (10^6 Ом·см). Такой материал находит применение в полупроводниковой СВЧ-электронике.

При исследовании влияния легирующей примеси Si на свойства слоев LT-GaAs было найдено, что в адсорбционном слое имеет место конкуренция между мышьяком и кремнием, вследствие чего Si влияет на захват избыточного As [49]. Были обнаружены явления образования примесно-вакансионных комплексов, аналогичные наблюдавшимся в GaAs, выращенном ГФЭ. Оказалось, что захват избыточного мышьяка и его взаимодействие с легирующей примесью кремния зависит от молекулярной формы мышьяка в потоке (As_4 или As_2). Аналогичные явления наблюдались на твердых растворах LT-InGaAs [50 – 52]. Результаты исследований структуры поверхности и объема LT-GaAs и LT-InGaAs были обобщены и представлены в коллективной монографии [53]. Данные по структуре поверхности и объема LT-GaAs и LT-InGaAs явились основой кандидатской диссертации С.В. Субача (2002).

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПРОЦЕССОВ И ФОРМИРОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР ПРИ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ

1990-е гг. стали годами расцвета молекулярно-лучевой эпитаксии. Развитие высоковакуумной техники и прорыв в создании высокоточных неразрушающих методов исследования поверхности (ДБЭ,

СВВ-ОЭМ, СТМ и др.) сделали реальным контролируемое формирование полупроводниковых структур нанометрового масштаба непосредственно в процессе роста. В России одним из лидеров в данном направлении являлся (и является) Институт физики полупроводников СО РАН.

В 1989 г. по инициативе заведующего отделом молекулярно-лучевой эпитаксии ИФП С.И. Стенина был заключен договор между ИФП и СФТИ на разработку теоретических моделей процессов роста и легирования в системах МЛЭ. Основными исполнителями стали М.П. Рузайкин и Ю.Ю. Эрвье (А.Б. Свечников к тому времени уже работал в Москве в Курчатовском институте). В рамках работы по договору удалось продвинуться в понимании роста пленки по механизму образования и разрастания двумерных (2D) островков, формирования структурных единиц на ступенях сложных полупроводников и начальной (нестационарной) стадии легирования. Однако в 1991 г., после безвременной кончины С.И. Стенина и последовавшего в 1992 г. катастрофического ухудшения финансирования данная деятельность существенно затормозилась. Многие результаты остались неопубликованными. Тем не менее к 1996 г. была завершена разработка модели нестационарного легирования и образования переходных примесных областей в условиях МЛЭ [54,55]. В рамках данной модели удалось самосогласованным образом описать особенности захвата примеси в изломах на ступенях, поверхностную диффузию примесных атомов и эффект оттеснения примеси движущейся ступенью.

В 1996 г. М.П. Рузайкин эмигрирует в Германию. Однако теоретическое исследование процессов эпитаксии продолжилось благодаря плодотворному сотрудничеству Ю.Ю. Эрвье и аспиранта кафедры физики полупроводников С.Н. Филимонова. Ими была разработана оригинальная комбинированная модель, сочетающая аналитическое описание роста двумерных островков и компьютерную имитацию случайного процесса образования зародышей островков [56]. Модель была применена к исследованию кинетики поверхностной сегрегации и захвата примеси при дельта-легировании [57, 58] и эволюции поверхности при росте, в том числе с участием поверхностно-активных веществ (сурфактантов) [59]. Полученные результаты обобщены в кандидатской диссертации С.Н. Филимонова (2000).

Одновременно развивалась теория элементарных процессов роста на ступенях, допускающих переходы адатомов между соседними террасами без предварительного встраивания в изломы на торце ступени (так называемые проницаемые ступени [60]). Было показа-

но [61 – 63], что эффект проницаемости ступени может играть важную роль в кинетике формирования когерентных 3D островков (квантовых точек) в условиях относительно низких температур кристаллизации.

Данные исследования проводятся при поддержке РФФИ (гранты 1996, 1998, 2000, 2003 гг.) и INTAS (с 2004 г.). В 2003 г. С.Н. Филимонов получил стипендию фонда Гумбольдта и в настоящее время работает в Исследовательском центре Юлих (Германия) в группе доктора Б. Фойхтлендера [64].

Таким образом, за прошедшее 50-летие развитие исследований в области эпитаксии полупроводников в СФТИ шло достаточно успешно. Это стало возможным благодаря дружному коллективу лаборатории эпитаксиальных структур ОФП. Сотрудники ЛЭС создали технологическую аппаратуру и методы получения и исследования свойств эпитаксиальных слоев, выполнили систематические исследования кинетики роста и легирования слоев GaAs, InAs и твердых растворов на их основе, изучили структуру поверхности и объема, создали теоретические модели процессов роста. Они активно сотрудничали с научными коллективами Академии наук и отраслевых предприятий, а также с другими лабораториями отдела физики полупроводников.

За период с 1960 по 2004 г. в лаборатории эпитаксиальных структур СФТИ было подготовлено 12 кандидатов ф.-м. наук, защищено 2 докторских диссертации, опубликовано более 250 работ в рецензируемых периодических отечественных и зарубежных журналах, в изданиях АН СССР и РАН, в трудах всесоюзных конференций по исследованию арсенида галлия, сделано более 200 докладов на международных, всесоюзных и российских конференциях.

В завершение обзора развития научного направления следует отметить, что коллектив ЛЭС отличался активностью не только в постановке и проведении научных исследований, но и в организации других мероприятий в отделе физики полупроводников: научных конференций по физике полупроводников, в том числе всесоюзных научных совещаний по исследованию арсенида галлия. Сотрудники ЛЭС внесли свой вклад в строительные и сельскохозяйственные работы, которые выполнялись по решению областных властей. И.В. Ивонин и Н.Н. Криволапов входили в число руководителей этих работ. Отметим также, что в период с 1974 по 1987 г. в ОФП систематически проводились зимние и летние спортивные состязания между лабораториями. ЛЭС всегда активно участвовала в соревнованиях: 9 раз завоевывала кубок по лыжам и 6 раз – по легкой атлетике. Одним из организаторов этих соревнований был С.Е. Торопов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шефер Г. Химические транспортные реакции. М.: Мир, 1964.
2. Шефталъ Н.Н., Кокориш Н.П., Красилов А.В. // Изв. АН СССР, сер. физ. 1957. Т. 21. № 1. С. 146 – 152; / А.с. СССР №107450 от 1955 г., БИ. № 7, 1957.
3. IBM. J. Res. a. Dev. 1960. V. 4. No. 3.
4. RCA Review. 1963. V. 24. No. 40.
5. Вилисова М.Д., Лаврентьева Л.Г., Мурашко В.С., Преснов В.А. // Всес. совещ. Томск, сентябрь 1962 / Поверхностные и контактные явления в полупроводниках: Сб. ст. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1964. С. 422 – 431.
6. Лаврентьева Л.Г., Вилисова М.Д. // Тез. докл. 3-го Всес. совещ. по росту кристаллов. М., 1963; // Рост кристаллов. Т. 6. М.: Наука, 1965. С. 340 – 347.
7. Лаврентьева Л.Г. // Итоги исследований по физике (1917 – 1967): Сб. ст. / Под ред. К.В. Савицкого. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1971. С. 50 – 71.

8. Лаврентьева Л.Г., Вяткин А.П., Преснов В.А. // Изв. вузов. Физика. 1963. № 5. С. 174 – 176.
9. Преснов В.А., Лаврентьева Л.Г., Вилисова М.Д. / А.с. № 161707 от 17.07.1962.
10. Захаров Б.Г., Лаврентьева Л.Г., Якубеня М.П. // Арсенид галлия / Сб. ст. под ред. М.А. Кривога и др. Томск.: Изд-во Том. ун-та, 1968. С. 367 – 376.
11. Катаев Ю.Г., Лаврентьева Л.Г. // Там же. С. 377 – 385.
12. Вилисова М.Д., Лаврентьева Л.Г. // Там же. С. 386 – 394.
13. Процессы роста и структура монокристаллических слоев полупроводников / Сб. ст. под ред. Л.Н. Александрова. Новосибирск: Наука, 1968.
14. Лаврентьева Л.Г., Якубеня М.П. // Арсенид галлия // Труды 2-го совещ. по арсениду галлия, сент. 1968. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1970. С. 40 – 45.
15. Лаврентьева Л.Г., Катаев Ю.Г. // Там же. С. 46 – 50.
16. Shaw D.W. // Proc. 1968 Intern. Symp. on GaAs. Inst. of Phys. and Phys. Soc. London, 1969. P. 50.
17. Lavrentieva L.G. // Thin Sol. Films. 1980. V. 66. No. 1. P. 71 – 84.
18. Чернов А.А. Современная кристаллография. Т. 3. М.: Наука, 1980.
19. Лаврентьева Л.Г., Захаров И.С., Румянцев Ю.М. // Кристаллография. 1970. Т. 15. № 4. С. 854 – 857.
20. Лаврентьева Л.Г., Вилисова М.Д., Зеленская Н.Е. и др. // Изв. вузов. Физика. 1971. № 12. С. 144 – 146.
21. Чернов А.А., Рузайкин М.П. // Рост кристаллов. Т. 13. М.: Наука, 1979. С. 20 – 27.
22. Чернов А.А., Рузайкин М.П. // Процессы роста полупроводниковых кристаллов и пленок. Новосибирск: Наука, 1981. С. 5 – 9.
23. Лаврентьева Л.Г., Захаров И.С., Ивонин И.В., Красильникова Л.М. // IV Всес. совещ. по росту кристаллов: Тез. докл. Ереван, 1972. С. 70 – 73.
24. Лаврентьева Л.Г., Вилисова М.Д., Красильникова Л.М. и др. // Изв. вузов. Физика. 1973. № 2. С. 69 – 75.
25. Лаврентьева Л.Г., Пороховниченко Л.П., Кауль Б.В. // Генерация СВЧ-колебаний с использованием эффекта Ганна: Сб. ст. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1974. С. 269 – 277.
26. Александрова Г.А., Ивонин И.В., Красильникова Л.М. и др. // Изв. вузов. Физика. 1980. № 9. С. 71 – 75.
27. Lavrentieva L.G., Ikonnikova G.M., Krasilnikova L.M. // Crystal Research and Technology. 1981. V. 16. No. 8. P. 893 – 898.
28. Вилисова М.Д., Иконникова Г.М., Толбанов О.П., Худков С.С. // Изв. вузов. Физика. 1981. № 11. С. 3 – 6.
29. Вилисова М.Д., Лаврентьева Л.Г. // Обзоры по электронной технике, сер. 6 (материалы), вып. 3 (1132). М.: ЦНИИ «Электроника», 1985. 33 с.
30. Вилисова М.Д., Иконникова Г.М., Московкин В.А. и др. // Изв. АН СССР. Неорг. материалы. 1986. Т. 22. № 3. С. 363 – 366.
31. Бобровникова И.А., Лаврентьева Л.Г., Торопов С.Е. // Изв. вузов. Физика. 1985. № 2. С. 96 – 100.
32. Бобровникова И.А., Лаврентьева Л.Г., Торопов С.Е. // Физика и техника полупроводников. 1986. Т. 20. № 9. С. 1701 – 1704.
33. Лаврентьева Л.Г., Вилисова М.Д. // Изв. вузов. Физика. 1986. № 5. С. 3 – 13.
34. Бобровникова И.А., Вилисова М.Д., Лаврентьева Л.Г., Рузайкин М.П. // Препринт № 9. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1990. 31с. / J. Cryst. Growth. 1992. V. 123. No. 3/4. P. 529 – 536.
35. Бобровникова И.А., Нестерук Л.Г., Катаев Ю.Г. и др. // Изв. вузов. Физика. 1982. № 4. С. 119 – 121.
36. Лаврентьева Л.Г., Романов В.В. // Докл. 19-й науч.-техн. конф., посвященной Дню радио. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1972. С. 16 – 24.
37. Рузайкин М.П. // Математические методы химической термодинамики: Сб. ст. Новосибирск: Наука, 1982. С. 63 – 70.
38. Торопов С.Е., Рузайкин М.П. // Изв. АН СССР. Неорг. материалы. 1981. Т. 17. № 12. С. 2122 – 2125.
39. Chernov A.A., Ruzaikin M.P. // J. Cryst. Growth. 1981. V. 52. P. 185 – 193.
40. Чернов А.А., Рузайкин М.П. // ДАН СССР. 1981. Т. 258. № 1. С. 82 – 85.
41. Чернов А.А., Рузайкин М.П. // Процессы роста полупроводниковых кристаллов и пленок: Сб. ст. Новосибирск: Наука, 1981. С. 5 – 9.
42. Рузайкин М.П. // Рост полупроводниковых кристаллов и пленок: Сб. ст. Новосибирск: Наука, 1984. С. 21 – 34.
43. Рузайкин М.П., Свечников А.Б., Либедицев О.Г. // Поверхность. 1988. № 2. С. 65 – 68.
44. Рузайкин М.П., Эрвье Ю.Ю. // Кристаллография. 1989. Т. 34. № 4. С. 812 – 817.
45. Владимиров С.Ю., Ивонин И.В., Катаев Ю.Г. и др. // Кристаллография. 1995. Т. 40. № 5. С. 916 – 919.
46. Bert N.A., Chaldyshev V.V., Goloshchapov S.I., et al. // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 1994. V. 325. P. 401 – 406.
47. Вейнгер А.И., Козырев С.В., Чалдышев В.В. и др. // ФТТ. 1996. Т. 38. № 10. С. 2897 – 2904.
48. Берт Н.А., Вейнгер А.И., Вилисова М.Д. и др. // ФТТ. 1993. Т. 35. № 10. С. 2609 – 2625.
49. Лаврентьева Л.Г., Вилисова М.Д., Преображенский В.В., Чалдышев В.В. // Изв. вузов. Физика. 2002. № 8. С. 3 – 19.
50. Вилисова М.Д., Куницын А.Е., Лаврентьева Л.Г. и др. // ФТП. 2002. Т. 36. № 9. С. 1025 – 1030.
51. Вилисова М.Д., Ивонин И.В., Лаврентьева Л.Г. и др. // ФТП. 1999. Т. 33. № 8. С. 900 – 905.
52. Лаврентьева Л.Г., Вилисова М.Д., Бобровникова И.А. и др. // Изв. вузов. Материалы электронной техники. 2004 (в печати).
53. Нанотехнологии в полупроводниковой электронике / Отв. ред. А.Л. Асеев. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 368 с.
54. Рузайкин М.П., Эрвье Ю.Ю. // Кристаллография. 1996. Т. 41. № 4. С. 597 – 601.
55. Hervieu Yu.Yu., Ruzaikin M.P. // Surf. Science. 1998. V. 408. P. 57 – 71.
56. Рузайкин М.П., Филимонов С.Н., Эрвье Ю.Ю. // Изв. вузов. Физика. 1997. № 8. С. 103 – 109.
57. Filimonov S.N., Hervieu Yu.Yu. // Phys. Low-Dim. Struct. 1998. No. 7/8. P. 91 – 100.
58. Filimonov S.N., Hervieu Yu.Yu. // Phys. Low-Dim. Struct. 1998. No. 9/10. P. 141 – 151.
59. Filimonov S.N., Hervieu Yu.Yu. // Phys. Low-Dim. Struct. 2000. No. 1/2. P. 81 – 92.
60. Filimonov S.N., Hervieu Yu.Yu. // Surf. Science. 2004. V. 553. P. 133 – 144.
61. Filimonov, S.N. and Hervieu, Yu.Yu. // Surf. Science. 2002. V. 507 – 510C. P. 270 – 275.
62. Filimonov, S.N. and Hervieu, Yu.Yu. // Phys. Low-Dim. Struct. 2002. No. 7/8. P. 15 – 25.
63. Filimonov, S.N. and Hervieu, Yu.Yu. // Mater. Sci. Semicond. Process. 2004 (in press).
64. Filimonov S.N., Voigtlaender B. // Surface Science. 2002. V. 512. P. L335 – L340.