

комплексы для запусков космических аппаратов (КА) серии "Спектр", для бистатической радиолокации космического мусора и др.

Для более полного использования радиотелескопы модернизируются без остановки наблюдений. Модернизация предусматривает увеличение числа рабочих диапазонов на каждом инструменте до восьми в интервале длин волн 1–100 см для поочередной и совместной работы диапазонов; достижение предельной точности ЗС ($\sim 0,6$ мм), точности системы наведения (СН) ($5-7''$) и чувствительности радиотелескопа ($50-200$ Ян) во всех рабочих диапазонах; дальнейшее повышение уровня автоматизации; завершение отработки метрологического комплекса по точностям; дооснащение полномасштабными аппаратными комплексами.

Многодиапазонная схема радиотелескопов основана на едином большом ($6 \times \varnothing 2$ м) сильно расфазированном рупорном облучателе. Многодиапазонные наблюдения реализуются с незначительной потерей чувствительности и минимумом переделок на радиотелескопах. Возможно расширение диапазона радиотелескопов и до миллиметровых волн при планируемом повышении точностей ЗС и СН и некотором ограничении погодных условий. Экспериментальные наблюдения на волне 1,35 см при ширине луча менее $1'$ подтвердили высокую устойчивость СН и уточнили первоочередные меры по повышению чувствительности. Многодиапазонный облучатель с расширенным диапазоном разработан совместно с кафедрой "Антенны" МЭИ на основе численного решения строгой электродинамической задачи с учетом производственных допусков и полос частот.

При поэтапной радиологической юстировке ЗС в п. Медвежий озера (совместно с Научно-исследовательским радиофизическим институтом) достигнута суммарная точность измерений и регулировок $0,2-0,25$ мм. Ранее для юстировки при любых наклонах рефлектора был создан лазерный дальномерный профилометр (1980–1986 гг.). Для измерений на крупных антеннах в 1974–1984 гг. создана первая лазерная станция с наносекундными импульсами, контролирующая координаты летательного аппарата с радиорефером. Для повышения степени гомологичности ЗС исследуются и компенсируются ее весовые, тепловые и ветровые деформации. В 1980–1985 гг. исследована эффективность фотограмметрического и радиодальномерного контроля деформации рефлектора.

Точность угловой юстировки СН в полусфере доведена до $2''$. Исследуются остаточные угловые погрешности и условия их компенсации. Завершена автоматизация слежения и многократных быстрых переходов с объекта на объект при круглосуточной работе и ведется автоматизация тестовых, метрологических и вспомогательных режимов.

Создан и модернизируется прецизионный автоматизированный метрологический комплекс в составе радиометрической, радиологической, радиопеленгационной, геодезической систем и соответствующих технологий.

Радиотелескопы регулярно и эффективно работают в международных сетях РСДБ, чем повышают их общую чувствительность и увеличивают диапазон пространственных частот. На радиотелескопах получены новые результаты наблюдений. Институт космических исследований РАН получил радиоизображение джета радио-

галактики 3C274 и мазера в газопылевом комплексе W51. По проекту "Астрокомплекс" ПРАО АКЦ ФИАН исследует тонкую структуру флуктуаций времени и направления прихода импульсов радиоизлучения миллисекундных пульсаров в режимах тайминга и РСДБ. АКЦ ФИАН получил радиоизображение квазара 3C147 с повышенным разрешением в режиме наземно-космического интерферометра с участием КА HALCA (Япония). Радиотелескопы образуют уникальную по сочетанию чувствительности, точности, универсальности, надежности и экономичности приборную базу коллективного пользования.

4. Заключение

Научные результаты являются составной частью решения ОКБ МЭИ (с участием ряда научных и производственных организаций) комплексной научно-технологической проблемы создания и широкого использования крупных оптимизированных антенн и радиотелескопов с их оборудованием для космических и радиоастрономических систем.

PACS numbers: 07.07.-a, 81.15.Hi, 85.30.-z

Молекулярно-лучевая эпитаксия: оборудование, приборы, технология

О.П. Пчеляков

1. Введение

Синтез полупроводниковых тонкопленочных композиций из молекулярных пучков в сверхвысоком вакууме заявил о себе как о новом методе в полупроводниковом материаловедении после первых успешных экспериментов Артура и Чо в конце шестидесятих годов [1, 2]. Этот метод, наиболее часто называемый молекулярно-лучевой эпитаксией (МЛЭ) по аналогии с английским названием Molecular Beam Epitaxy, стал быстро развиваться благодаря разработкам уникальных приборов микро-, нано- и оптоэлектроники на структурах со сверхрешетками, квантовыми ямами и квантовыми точками, принцип действия которых (в отличие от традиционных приборов микроэлектроники) основан на волновой природе электрона. Это, в первую очередь, полупроводниковые лазеры и чувствительные фотодетекторы с квантовыми ямами, сверхрешетками и квантовыми точками в активной области, транзисторы с высокой подвижностью электронов в канале, нанотранзисторы, туннельно-резонансные диоды, одноэлектронные приборы и т.п. В настоящее время дополнительный импульс как исследовательским, так и технологическим работам по МЛЭ придают идеи и перспективы создания элементной базы для квантовых компьютеров. Параллельно и так же интенсивно развивается научное приборостроение в этой области вакуумной техники и аналитического оборудования.

Промышленная реализация и развитие метода МЛЭ убедительно показали, что он незаменим при получении многослойных эпитаксиальных структур с атомной гладкостью границ, прецизионно заданными толщинами слоев, составом и профилем легирования. Применение высокочувствительных электронно-зондо-

вых и оптических средств контроля параметров полупроводниковых структур и управления процессом их синтеза обеспечивает высокую воспроизводимость этих параметров.

История основания и развития этого важного направления научного приборостроения в Институте физики полупроводников Сибирского отделения РАН (ИФП СО РАН), как и в стране в целом, тесно связана с именами выдающихся ученых — первого директора Института академика А.В. Ржанова и основателя ведущей научной школы России по физике и технологии МЛЭ профессора С.И. Стенина. Первая сверхвысоковакуумная установка МЛЭ в Институте была запущена уже в 1979 г. К этому моменту состояние работ по созданию экспериментальной базы для МЛЭ характеризовалось заметным отставанием отечественных разработок приборов и оборудования. Их создание было фактически направлено на преодоление зависимости от импорта в этой области передовой технологии.

2. Оборудование для молекулярно-лучевой эпитаксии

Судя по публикациям, в нашей стране к началу 80-х годов имелось несколько установок МЛЭ производства фирмы Ribier (Франция), которые были размещены, в основном, в отраслевых НИИ, и небольшое количество напылительных сверхвысоковакуумных установок импортного и отечественного производства, напрямую не предназначенных для получения пленок методом МЛЭ. Наиболее интенсивные разработки в направлении создания установок для МЛЭ кремния и германия велись в то время за рубежом — в Англии, Франции, США и Японии в таких фирмах, как VG-Semicon, Ribier, Varian, Ulvac Corporation, Anelva и др. Лидеры отечественного сверхвысоковакуумного машиностроения — Научно-исследовательский технологический институт (г. Рязань), НИИ вакуумной техники им. С.А. Векшинского (г. Москва), СКБ Аналитического приборостроения (г. Ленинград), НПО "Буревестник" (г. Ленинград), Экспериментальный завод научного приборостроения РАН (пос. Черноголовка), внесшие большой вклад в развитие отечественного оборудования для МЛЭ соединений $A^{III}B^V$ [3, 4], не выпускали установок для эпитаксии элементарных полупроводников и соединений $A^{II}B^{VI}$. Разработки технологической оснастки и научных основ технологии для всех упомянутых типов полупроводников осуществлялись с 1978 г. только в ИФП СО РАН. Они начались на десять лет позже первых публикаций по этому вопросу в мировой научной печати, однако высокие темпы работ позволили уже к 1992 г. выйти на мировой уровень по качеству установок и многокамерных комплексов для МЛЭ. Нами были обоснованы принципы построения таких комплексов, определен оптимальный набор аналитических средств контроля процессов роста, описаны конструкция и технологические характеристики установок МЛЭ типа "Ангара" и "Катунь" [5]. Полная конфигурация установки содержала модуль подготовки и анализа подложек, модуль эпитаксии полупроводниковых пленок и модуль нанесения металлических и диэлектрических слоев. Установки имели компьютерную систему управления технологическим процессом.

В Институте разработаны и выпускаются следующие аналитические приборы, встраиваемые в модули установок МЛЭ:

— Регистрирующий дифрактометр быстрых электронов (ДБЭ) для контроля структуры подложек и пленок, а также для определения скорости роста, толщины пленок и соотношения основных компонентов в твердых растворах.

— Встраиваемый лазерный эллипсомер для измерения толщины и оптических свойств, который при использовании оригинальных методик и компьютерных программ служит также для измерения состава пленок, микрошероховатости поверхности и даже температуры поверхностных слоев пленок [6, 7]. Эллипсометрия резко расширила возможности неразрушающего контроля свойств пленок *in situ*, особенно в тех случаях, когда применение ДБЭ невозможно (высокое давление в молекулярном пучке, низкая радиационная стойкость растущих пленок).

— Поляризационный пирометр оригинальной конструкции для бесконтактного измерения температуры поверхности образца [7].

Установки типа "Ангара" и "Катунь" с 1987 г. выпускались малыми сериями на базе экспериментального производства ИФП СО РАН и на Опытном заводе СО РАН. За время с 1987 по 1992 гг. было изготовлено 35 комплектов таких установок, содержащих 79 ростовых и аналитических сверхвысоковакуумных модулей, более 100 электронных дифрактометров и 25 лазерных эллипсометров.

В последние годы, продолжая совершенствовать технику и технологию МЛЭ, ИФП СО РАН в сотрудничестве с РКК "Энергия" им. С.П. Королева и НИИ "Научный центр" (г. Зеленоград) ведет разработку экспериментального оборудования и приборов для осуществления процесса МЛЭ в открытом космическом пространстве вблизи орбитальной станции за молекулярным экраном [8]. К работам по проекту подключается Институт электросварки им. Е.О. Патона (г. Киев). Этот проект призван преодолеть принципиальные ограничения, присущие процессу МЛЭ при получении структур предельно высокого качества в наземных вакуумных установках. Лимитирующими факторами являются глубина и чистота вакуума, производительность откачной системы, а также наличие стенок вакуумной камеры, накапливающих и отдающих компоненты молекулярных пучков и атмосферы остаточных газов. Эти недостатки могут быть устранены при выносе технологической установки в открытый космос в "кильватерную" область молекулярного экрана [8–10]. В соответствии с Программой реализации научно-прикладных исследований на российском сегменте Международной космической станции первые эксперименты планируется провести в 2003 г. В настоящее время в ИФП СО РАН идет наземная отработка процессов МЛЭ, запуск стенда-имитатора космического пространства и испытания элементов технологической оснастки.

3. Приборная реализация эпитаксиальных структур

Для иллюстрации возможностей созданного оборудования МЛЭ приведем перечень некоторых современных приборов, которые изготовлены на основе эпитаксиальных структур, выращенных в ИФП СО РАН на установках типа "Катунь". Характеристики этих приборов описаны в цитированных публикациях.

— Диоды Ганна миллиметрового диапазона (28 ГГц) [11].

- Интегральные схемы на основе GaAs [11].
- Кремниевые полевые транзисторы с квантовыми точками Ge в канале [12].
- Фоточувствительные матричные модули инфракрасного (ИК) диапазона (3–5 мкм) на основе гетероперехода GeSi/Si [13].
- ИК лазеры с вертикальным резонатором мощностью до 20 Вт в импульсе и длиной волны 0,95 мкм [14].
- Матричные ИК (5 мкм) фотоприемники на пленках CdHgTe [15].

4. Заключение

Работа выполняется при поддержке Государственной программы "Ведущие научные школы РФ" (грант 00-15-96806), а также программ "Перспективные технологии и приборы для микро и наноэлектроники" (проект 02.04.1.1) и "Фундаментальные космические исследования" (проект "Эпитаксия").

Список литературы

1. Arthur J R, LePore J J. *Vac. Sci. Technol.* **6** 545 (1969)
2. Cho A Y J. *Vac. Sci. Technol.* **8** S31 (1971)
3. Денисов А Г, Кузнецов Н А, Макаренко В А *Обзоры по ЭТ. Серия "Технология, организация производства и оборудование"* Т. 17 (М.: ЦНИИ Электроника, 1981)
4. Майоров А А *Научное приборостроение* **1** 114 (1991)
5. Блинов В В, Потемкин Г А, Пчеляков О П и др., Автор. свид. "Устройство для молекулярно-лучевой эпитаксии" № 1487517 (1989)
6. Архипенко А В, Бломкина Ю А, Пчеляков О П и др. *Поверхность. Физика, химия, механика* **1** 93 (1985)
7. Спесивцев Е В, Рыхлицкий С В, Назаров Н И и др., в сб. *Материалы IV Росс. конф. "Полупроводники-99"* (Новосибирск, 1999) с. 289
8. Pchelyakov O P, Nikiforov A I, Sokolov L V et al., in *Proc. X Symp. on Physical Sciences in Microgravity* Vol. II (St. Petersburg, 1997) p. 144
9. Ignatiev A *Earth Space Rev.* **2** 10 (1995)
10. Бержатый В И, Зворыкин Л Л, Иванов А И, Пчеляков О П и др. *Автоматическая сварка* **10** 108 (1999)
11. Преображенский В В, Автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук (Новосибирск: ИФП СО РАН, 2000)
12. Yakimov A I et al. *Phys. Rev. B* **59** 12598 (1999)
13. Машанов В И, Чистохин И Б, Зайцев Б А, Пчеляков О П и др. *Микроэлектроника* **27** 412 (1998)
14. Гайслер В А, Торопов А И, Бакаров А К и др. *Письма в ЖТФ* **25** 40 (1999)
15. Sidorov Yu G et al. *Thin Solid Films* **306** 253 (1997)

PACS numbers: 07.20.Mc, 07.79.-v, 07.79.Cz, 68.35.Bs

Низкотемпературная сканирующая туннельная микроскопия

В.С. Эдельман

Начало работам по сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии в СССР было положено М.С. Хайкиным, создавшим первый в стране СТМ [1] вскоре после изобретения в 1982 г. этого прибора Биннигом и Рорером. В его лаборатории была создана серия микроскопов различного назначения [2]: СТМ с большим полем зрения, совместимый с растровым электронным микроскопом [3]; простой высоковакуумный СТМ [4]; высоковакуумный СТМ с позиционирова-

нием острия в диапазоне нескольких мм по трем координатам [5]; низкотемпературный СТМ, погружаемый в транспортный дьюар с жидким гелием [6].

Логическим развитием этих работ стало создание криогенной высоковакуумной установки для проведения сканирующей туннельной микроскопии [7, 8]. Необходимость проведения низкотемпературной сканирующей туннельной микроскопии связана, в первую очередь, с тем, что многие явления и процессы, такие как сверхпроводимость, переход в состояние с волнами зарядовой плотности, магнитное упорядочение, сорбция газов и т.п., реализуются при глубоком охлаждении. Охлаждение образца позволяет устранить тепловые флуктуации границ атомных террас, в ряде случаев ярко выраженные уже при комнатной температуре [9]. Но и для тех исследований, которые, в принципе, можно проводить и при комнатной температуре, охлаждение СТМ до гелиевых температур оказывается полезным, так как в этом случае практически устраняется тепловой дрейф прибора.

Известные низкотемпературные высоковакуумные установки, как правило, базируются на дорогих промышленных системах сверхвысокого вакуума, дополненных криогенными вставками (см. обзор [10]). Мы пошли по другому пути, разместив СТМ в полости, стенки которой охлаждены до температуры жидкого гелия, что автоматически решает задачу получения сверхвысокого вакуума. Предложенное нами решение позволяет не только обеспечить необходимые условия проведения экспериментов, но и исключить проблему плохого теплового контакта образца с ванной жидкого гелия путем напуска газообразного гелия в камеру. Присутствие гелия, согласно нашим наблюдениям, не сказывается на результатах экспериментов по сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии.

В установке используется СТМ [5] с держателем образца, позволяющим нагревать его *in situ* до 500–600 К при мощности нагревателя порядка 1 Вт [11]. Для отвода тепла от микроскопа при длительном отжиге используются медный теплопровод и механический тепловой ключ, замыкающийся на ванну с жидким азотом. Тем самым тепловая нагрузка на ванну с жидким гелием может быть снижена до допустимого уровня в 0,1–0,2 Вт.

Установка использовалась для изучения структуры поверхности висмута, раскалываемого *in situ*. Было обнаружено, что при раскалывании кристалла при низких температурах, как правило, возникают атомно-гладкие террасы с прямыми границами, направленными строго вдоль атомных рядов [12, 13]. Это свидетельствует об "инерции" движения границы террасы в процессе разрушения кристалла.

Оказалось, что атомно-гладкие участки не обладают строгой трансляционной симметрией — на атомную картину накладываются вариации рельефа со случайной структурой и с характерными размерами в плоскости в несколько межатомных расстояний. При этом вольт-амперные характеристики меняются от точки к точке на поверхности. Это позволяет утверждать, что плотность электронных состояний не постоянна. По-видимому, эти особенности связаны с подповерхностными дефектами, рождающимися в процессе разрушения кристалла [14]. Неоднородность поверхности сохраняется и при нагреве образца почти до плавления, что позволяет оценить