

## Предисловие

Развитие интегральной электроники показывает, что в настоящее время достигнут настолько высокий уровень интеграции, что приходится считаться с рядом физических ограничений при ее дальнейшем повышении. Это, в свою очередь, заставляет обращаться к новым принципам построения интегральной микроэлектроники. Одним из таких путей является функциональная электроника – направление, не связанное с построением электрических цепей из отдельных пассивных и активных компонентов. Главный отличительный признак функциональной электроники состоит в использовании динамических неоднородностей в континуальных средах, которые служат основным средством хранения и обработки информации. Поэтому задача поиска таких активных сред, а тем более исследование возможности использовать интеграцию различных физических эффектов в одной среде, остаётся одной из актуальных задач физики твердого тела. Сегнетоэлектрики по многим параметрам подходят в качестве континуальных сред для новой электроники. Например, наряду с определяющим физическим свойством сегнетоэлектриков – явлением переключения спонтанной поляризации – для них характерны высокая диэлектрическая проницаемость, диэлектрическая нелинейность, пьезо- и пьезоактивность, линейный и квадратичный электрооптические эффекты.

Раздел физики, которому посвящена данная книга, вместе с его приложениями охватывает почти неисчерпаемый круг вопросов. Тем не менее, можно выделить определенный круг явлений и процессов, иметь представление, о которых необходимо каждому специалисту, работающему в области физики микроэлектронных устройств и смежных областях.

Целью монографии является демонстрация современных проблем функциональной электроники основанной на наноразмерных пленочных сегнетоэлектрических материалах и способы их решения, включая:

- современные представления о механизмах роста монокристаллических сегнетоэлектрических пленок,

- особенности проявления сегнетоэлектрического состояния в наноразмерных сегнетоэлектриках,
- использование сегнетоэлектрических гетероструктур в электронно-управляемых устройствах СВЧ диапазона,
- проблемы создания энергонезависимой и электрически перепрограммируемой памяти и пути их решения,
- использование сегнетоэлектрических материалов в микроэлектромеханических устройствах,
- сверхбыстрые аналоговые модуляторы интегральной оптики,
- принципы построения матричных преобразователей ИК излучения,

Книга рассчитана в первую очередь на специалистов, работающих над данной проблемой. Поэтому представленный материал относится к самым последним публикациям.

Раздел 3.1. написан заведующим кафедрой нанотехнологии физического факультета ЮФУ кандидатом физико-математических наук Юзюком Юрием Ивановичем, остальные разделы заведующим лабораторией “Физики сегнетоэлектрических пленок” Южного научного центра РАН, доктором физико-математических наук Мухортовым Владимиром Михайловичем. Авторы благодарны своим коллегам Ю.И. Головки, С.В. Бирюкову, В.А. Алешину, В.В. Колесникову, И.Н. Захарченко за обсуждение многих вопросов, изложенных в настоящей монографии.

## Введение

Основной результат дальнейшего процесса миниатюризации электронных систем заключается не только в уменьшении геометрических размеров, но также в повышении качественных характеристик на основе новых эффектов, косвенно связанных с уменьшением размеров. Это ведёт к изменению не только параметров и типов задействованных материалов, но к изменению технологии создания микросистемной техники. В связи с этим в последние годы ведется интенсивный поиск новых функциональных материалов или изменение свойств у “старых” за счет геометрических эффектов в них. Сегнетоэлектрики в пленочном состоянии в последние годы вызывают повышенный интерес в связи с перспективами их встраивания в микросистемную технику. Сдерживающим фактором для их применения является отсутствие физически обоснованной технологии создания гетероструктур на их основе и понимания особенностей сегнетоэлектрического состояния в тонких пленках, а тем более новых явлений, свойственных наноразмерному состоянию. При этом совершенно очевидны качественно новые параметры микросистемной техники при их использовании.

Например, технологической революции можно ожидать от находящейся сейчас на стадии разработки высокоплотной энергонезависимой сегнетоэлектрической памяти на наноразмерных сегнетоэлектрических пленках. Это приведет к замене традиционно используемых магнитных дисков на сегнетоэлектрические чипы с объемом памяти на порядки большим, чем в магнитных и лазерных дисках, и позволит создать новую архитектуру вычислительной техники, где оперативная и долговременная память будут реализованы в едином чипе [1].

Сегнетоэлектрические оксиды являются чрезвычайно перспективными при применении в микромеханических системах (MEMS), где по их функциональным возможностям, включающим диэлектрическую нелинейность, пиро- пьезоэффект, генерация второй гармоники и т.д., этим материалам нет альтернативы [2,3] .

В связи с созданием волоконной оптики, позволяющей передавать информацию на терабитных частотах, разработка высокоскоростных оптических модуляторов становится насущной проблемой систем связи. Последние эксперименты показа-

ли, что, к примеру, модулятор на 40 ГГц, изготовленный на основе гетерозпитаксиальных сегнетоэлектрических структур в конструктивном отношении значительно проще полупроводниковых аналогов [4]. Поскольку на основе гетероструктур с использованием сегнетоэлектрических тонких пленок на одном кристалле создается микрополосковая часть СВЧ диапазона и оптическая часть, то можно говорить о новых интегрированных устройствах СВЧ диапазона и интегральной оптики.

Требования к системам радиосвязи следующего поколения определяются двумя противоречивыми факторами. Стоимость их создания и обеспечения работы должна уменьшаться, а скорость передачи данных должна возрасти до многих гигабайт в секунду. В рамках решения этой фундаментальной задачи переход к более высоким частотам К-диапазона (17 - 30 ГГц) выглядит вполне естественным [5]. Вторым очевидным шагом является объединение наземных и космических систем в единую гиперинформационную систему. Реализация этих очевидных решений требует пересмотра существующих технологий передачи информации по радиоканалу и создания принципиально новых комплектующих изделий, направленных на уменьшение в сотни раз массогабаритных характеристик и потребляемой мощности, при увеличении емкости каналов связи во столько же раз. Поэтому одной из важных задач является разработка и создание различных вариантов электронно-перестраиваемых СВЧ устройств с наносекундным быстродействием. С переходом систем радиосвязи к более высоким частотам и расширением их функциональных возможностей, несомненно, потребуется постепенная замена обычных антенн фазированными антенными решетками (ФАР) наземного и космического базирования. Это потребует разработки технологии массового производства ФАР и естественно поиск путей использования интегральной технологии в их изготовлении. Использование сегнетоэлектрических пленок в электронно-управляемых устройствах и применение их в конструкции ФАР [6-10] позволит:

- впервые формировать зеркала антенны из СВЧ чипов, включающих элементы пространственного возбуждения излучения и интегрированных фазовращателей, изготовленных по интегральной технологии на единой подложке [6];

- уменьшить в сотни раз энергетические затраты на управление [8];

- снизить в сотни раз стоимость и вес.

Перечисленные выше очевидные преимущества от применения сегнетоэлектриков в микросистемной технике требуют детального понимания, контроля и управления процессом синтеза гетероэпитаксиальных сегнетоэлектрических пленок и разработки принципов их интеграции в имеющиеся технологические процессы. Основными фундаментальными проблемами, связанными с гетероэпитаксией сложных оксидов, являются: установление физических механизмов ориентированной кристаллизации при сохранении стехиометрии и управления структурным совершенством сегнетоэлектрических гетероструктур; установление связи между условиями образования, степенью совершенства структуры и физическими свойствами пленок при переходе к наноразмерной толщине.