

Приведены методы решения некоторых нелинейных уравнений в частных производных с помощью методов Гельфанд — Левитана — Марченко и Лакса. Далее обсуждается явление нарушения симметрии, в частности, подробно исследуется модельная задача об электроне в полиацетиленовой цепочке. Второй раздел начинается с обсуждения одномерного уравнения Дирака, введения пространства Фока и вторичного квантования для фермионов. Подробно изучаются калибровочные преобразования и алгебра зарядов, а также модель Швингера (двумерной квантовой электродинамики).

Четвертая глава «Решеточные калибровочные модели» содержит два раздела: «Определения», «Строгие результаты». В первом разделе приводится аксиоматика Гординга — Вайтмана и классическая теория калибровочных полей. Обсуждаются калибровочно-инвариантная модель Гейзенберга и фермионы на решетке. Второй раздел содержит метод Фаддеева — Попова, теорему положительности Остервальдера — Шредера, тщательное изложение кластерного разложения, обсуждение проблемы конфайнмента, а также краткое изложение результатов численных расчетов и последних достижений.

Пятая глава «Струнные модели» содержит классическую механику струн (определение, уравнения движения, ковариантное решение уравнений движения и гамильтонов формализм), а также квантование бозонных струн и фермионных струн и суперструн.

Последняя, шестая, глава «Ренормгруппа» начинается с формулировки законов подобия (Уайдом), описания метода спиновых блоков Каданова, идей ренормгруппы Вильсона и вновь одномерной модели Изинга. Далее автор переходит к применению метода ренормгруппы к специальным моделям, после предварительного анализа центральной предельной теоремы вероятностей. Рассмотрены и подробно проанализированы иерархическая модель, двумерная модель Изинга на треугольной решетке, модель Гинзбурга — Ландау — Вильсона, а также различные сценарии хаотического поведения динамических систем, включая и результаты Фейгенбаума.

Книга написана очень интересно. В столь небольшом объеме автору удалось вместить много важных результатов. Изложение отличается ясностью и полнотой, все промежуточные результаты легко восстанавливаются. Значительная часть результатов, содержащихся в книге, в монографической литературе не излагалась и на русском языке отсутствует. Работа может служить превосходным пособием для студентов, аспирантов и научных работников, занимающихся статистической физикой, теорией поля или теорией твердого тела.

*А. Ю. Захаров*

621.315.592(049.3)

### СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО КРЕМНИЯ

Semiconductor Silicon: Material Science and Technology: Proceedings of the Summer School. Erice, Trapani, Sicily, July 3—15, 1988./Eds G. Harbeck, M. J. Schulz.— Berlin; Heidelberg; New York; London; Paris; Tokyo; Hong Kong: Springer-Verlag, 1988.— 360 p.— (Springer Series in Material Science. V. 13).

Последнее время издательство «Шпрингер» систематически публикует материалы конференций, симпозиумов и школ в виде отдельных книг-сборников. Как правило, эти материалы издаются в поразительно сжатые сроки и уже стали весомыми источниками свежей научно-техни-

ческой информации наряду с обычными публикациями в научных журналах. Большую популярность среди этих изданий приобрела серия сборников, посвященных современным проблемам материаловедения и тонкой технологии. Стоит отметить, что редактором этой серии является д-р К. Алекс Мюллер — лауреат Нобелевской премии по физике 1987 г., связанной с открытием нового класса высокотемпературных сверхпроводников.

Рецензируемый 13-й том этой серии посвящен полупроводниковому кремнию. Хорошо известно, что кремний — основной базисный материал современной полупроводниковой электроники, включая микроэлектронику. Спектр использования кремния в этой быстро развивающейся области техники весьма широк — от мощных суперкомпьютеров до бытовой радиотехники, калькуляторов и преобразователей солнечной энергии. Достаточно сказать, что высокоразвитая электронная индустрия стран Запада ежегодно поглощает и реализует в соответствующей продукции около 5 тыс. тонн высококачественного монокристаллического кремния.

Настоящий сборник составлен по материалам летней школы, состоявшейся в Сицилии в июле 1988 г., и посвящен проблемам материаловедения и тонкой технологии кремния. В сборнике обстоятельно освещен широкий круг актуальных проблем, связанных с кремнием, — фундаментально научных, а также технологических и чисто прикладных, касающихся изготовления конкретных устройств, в частности, больших интегральных схем. Материал сборника представлен в виде обзорных лекций и оригинальных сообщений, прочитанных ведущими в области кремниевой технологии специалистами целого ряда всемирно известных фирм, таких, как «IBM» (США), «AT and T Bell Labs.» (США), «Wacker-Chemitronic» (ФРГ), «Simens AG» (ФРГ) и др. Сборник содержит семь глав.

Гл. I посвящена выращиванию монокристаллов кремния. Специалистом фирмы «Wacker-Chemitronic» (ФРГ), являющейся мировым лидером в области выращивания крупногабаритных кристаллов кремния по способу Чохральского, сделан подробный обзор современного состояния в этой области. На современном уровне рассмотрены тигельные материалы и их влияние на химический состав газовой среды и качество кристаллов.

Рассмотрены процессы гомоэпитаксии кремния при атмосферном давлении. Показано, что автолегирование выращиваемых пленок послужило причиной развития нового направления — низкотемпературной эпитаксии в сверхвысоком вакууме. Глава заканчивается описанием аппаратуры и технологии молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) кремния. Охарактеризованы различные МЛЭ системы фирм «Anelva» (Япония), «Atomica» (ФРГ), «Perkin Elmer» (США), «Riber» (Франция), «Varian» (США) и «VG» (Англия).

В гл. II рассмотрены новые процессы обработки кремния, имеющие целью контролируемое введение в решетку примесных атомов и создание различных поверхностей из других материалов. Эта технология направлена на производство интегральных схем.

На атомном уровне анализируются процессы травления, осаждения, литографии, ионной имплантации, окисления.

Изложена общая теоретическая модель легирования кремния при использовании лазера в качестве источника нагрева (лазерное распыление, лазерный отжиг).

Очень большой раздел, написанный специалистом фирмы «Bell Labs», посвящен ионной имплантации. Показана возможность формировать с помощью этого метода чистые слои  $\alpha\text{-Si}$ , приведены новые результаты по определению энталпии плавления. Обнаружено, что  $\alpha\text{-Si}$

переходит в состояние металлического расплава при 225 К. Отсюда следует, что можно получать  $\alpha$ -Si закалкой из расплава, переохлажденного ниже этой температуры, причем темп охлаждения должен составлять  $10^{12}$  К/с.

Гл. III содержит подробное описание кристаллических дефектов в кристаллах кремния, выращенных различными способами. Особое внимание обращено на точечные дефекты (в первую очередь, межузельный кислород) и малоизученные иглообразные дефекты, интерпретируемые как модификация  $\text{SiO}_2$ , возникающая при высоком давлении и  $T > 800^\circ\text{C}$ .

Гл. IV посвящена современным методам диагностики кремния. Рассмотрены электронная микроскопия высокого разрешения, включая метод контраста на дефектах решетки, тунNELьная микроскопия, спектроскопия глубоких уровней (DLTS), специальные методы спектроскопии структур кремний/изолятор.

Особый интерес представляют оригинальные результаты определения кислорода в поликристаллическом профилированном кремнии с помощью метода ИК-спектроскопии (инфракрасная спектроскопия).

Гл. V посвящена получению и анализу изолирующих пленок на кремнии. Особое внимание уделено оксиду кремния, а также проблеме остаточных заряженных примесей в таких изолирующих пленках.

В гл. VI рассмотрено получение пленок силицидов переходных металлов, широко используемых в производстве интегральных схем. Описан новый туннельный эксперимент, позволяющий получать информацию о свойствах границ раздела металл—полупроводник—(контакты Шоттки).

Наконец, заключительная, гл. VII, посвящена разработке новых кремниевых приборов. Описано получение ячеек оперативной памяти с емкостью 4 Мбит («Siemens» AG). Обсуждаются возможности повышения эффективности до 30% кремниевых солнечных элементов на основе кристаллического кремния. К ним относятся: применение резких изотропных  $p^+—p^-$ -барьеров, текстурирование фронтальной поверхности, создание двойных интерференционных антирефлекторных покрытий, эпитаксиальное наращивание высококачественного фронтального кремния, и пр.

Не приходится сомневаться в том, что настоящий сборник найдет большую и заинтересованную аудиторию среди специалистов, интересующихся современными проблемами физики и тонкой технологии полупроводников. Этот сборник сослужит большую пользу и для тех, кто только вступает в данную область — студентов, стажеров и аспирантов, ибо обучать полупроводниковой технологии следует на примерах ее самых свежих и ярких достижений.

*B. B. Тимофеев*