

05;06;08;12

ИССЛЕДОВАНИЕ КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ СОВМЕЩЕННОЙ ФОТОАКУСТИЧЕСКОЙ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ

© Р.М.Бурбело, А.Л.Гуляев, А.Г.Кузьмич, И.Я.Кучеров

Киевский государственный университет им. Т.Г. Шевченко,
252017 Киев, Украина

(Поступило в Редакцию 16 декабря 1994 г.)

В окончательной редакции 29 ноября 1995 г.)

Методом ФА микроскопии исследованы эпитаксиальные кремниевые структуры с различным типом проводимости, а также локальные области модификации поверхности кремниевых пластин в результате ионной имплантации. Показана возможность визуализации целого ряда дефектов в таких структурах, связанных как с условиями подготовки кристалла-подложки, так и с проведением технологических операций наращивания и имплантирования. Представлены результаты сравнительных исследований с использованием рентгеновских топограмм, электронной и оптической микроскопии, а также фотоэлектрической микроскопии. Приводятся сравнительные данные, позволяющие оценить чувствительность методов ФА и ФЭ микроскопии при исследовании имплантированных образцов р-кремния.

Введение

Одним из быстро развивающихся методов исследования твердых тел стала фотоакустическая (ФА) микроскопия. В настоящее время ФА микроскопия может рассматриваться как достаточно эффективное средство неразрушающего контроля, позволяющее визуализировать на заданную глубину неоднородности, дефекты, внутреннюю структуру непрозрачных объектов [1,2]. В частности, ФА микроскопия успешно применяется для контроля материалов и готовых изделий в микроэлектронике [3,4].

В данной работе представлены результаты применения лазерной фотоакустической микроскопии для целей визуализации приповерхностных нарушений и неоднородностей кремниевых эпитаксиальных структур $-p$ - и $-n$ -проводимости, а также локальных областей модификации поверхности кремниевых пластин p -типа в результате имплантации ионами B^+ и P^- . Поскольку наличие приповерхностного нарушенного слоя (химико-механическая обработка, ионное легирование)

приводит к образованию широкого энергетического спектра ионизируемых уровней, то это позволило для сравнительной оценки использовать лазерную фотоэлектрическую (ФЭ) микроскопию с целью расширения информативности при одновременном получении фотоакустических и фотоэлектрических топограмм исследуемых образцов.

Экспериментальные методы и образцы

Регистрация ФА сигнала в образце осуществлялась пьезокерамическим преобразователем дисковой формы. Образец закреплялся на заземленном верхнем электроде преобразователя с использованием акустической связки, с нижнего электрода сигнал снимался на синхронный усилитель первого измерительного канала (рис. 1). Преобразователь с образцом размещался на двухкоординатном столике с шаговым приводом. Минимальный шаг сканирования образца 10 мкм. Неподвижный емкостный электрод в форме кольца с внутренним диаметром около 100 мкм с механической системой юстировки располагался в непосредственной близости от поверхности образца для регистрации фотоэдс (второй измерительный канал). Модулированный по интенсивности луч аргонового ионного лазера ($\lambda = 484$ нм) фокусировался на поверхности образца в точку диаметром ~ 10 мкм через отверстие в электроде. Измерение сигналов, сбор данных и их обработка, а также управление процессом сканирования осуществлялись с помощью компьютера. Изображение распечатывалось на печатающем устройстве в полутоновом режиме с десятью градациями яркости.

Процессы, происходящие при измерении, кратко можно описать следующим образом. Модулированное излучение лазера поглощается в приповерхностной области образца в точке фокусировки. Переменное электрическое поле, возникающее за счет поверхностной фотоэдс, образует напряжение на емкостном электроде. Кроме того, поглотившееся излучение создает в образце точечный переменный источник тепла, от которого в глубь образца распространяется тепловая волна, взаимодействующая с его теплофизическими неоднородностями. Информация об амплитуде и фазе тепловой волны содержится в акустической волне, возникающей за счет явления термоупругости. Акустическая волна принимается с помощью пьезопреобразователя.

В качестве образцов использованы а) кремниевые пластины — подложки *p*-типа проводимости с удельным сопротивлением 40 Ом·см; б) эпитаксиальные кремниевые структуры *p-p⁺*-типа проводимости с толщиной эпислоя 15 мкм; в) кремниевые структуры с поверхностной топологией — эпитаксиальные “карманы” *n*-типа проводимости в подложке *p*-типа (глубина “карманов” ~ 40 мкм); г) кремниевые пластины, в которых предварительно с различной величиной дозы имплантации

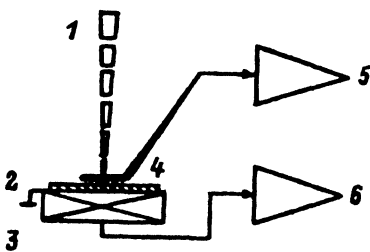


Рис. 1. Схема исследуемой системы.

1 — модулированное лазерное излучение, 2 — образец, 3 — пьезокерамика, 4 — электрод, 5 — синхронный детектор 1, 6 — синхронный детектор 2.

была проведена операция ионного легирования. Все образцы имели однородную полированную поверхность, на которой оптический контакт не наблюдался. По этой причине оптические изображения приводятся не для всех образцов.

Фотоакустические и фотоэлектрические измерения проводились в основном на частоте ~ 80 кГц. Поскольку в схеме рис. 1 использовались одноканальные синхронные усилители, то регистрируемый выходной сигнал содержал одновременно информацию и об амплитуде, и о фазе измеряемого сигнала. Устанавливая начальный сдвиг фазы опорного сигнала можно было выявить те или иные детали фотоакустического изображения, что подтверждает существенное значение фазы в фотоакустической визуализации.

Результаты и обсуждение

Процесс эпитаксиального наращивания — один из важнейших в полупроводниковой технологии. В большинстве современных приборов наращиваемый эпитаксиальный слой играет роль активной области будущего полупроводникового устройства. В связи с этим контроль качества эпитаксиальных слоев — актуальная задача.

Ранее [5,6] были получены результаты, которые позволили оптимистически рассматривать технику фотоакустической микроскопии для целей визуализации областей эпитаксии в пластинах монокристаллического кремния. С помощью ФА микроскопа удалось, во-первых, визуализировать топологический рисунок эпитаксиальных областей, которые отличаются от окружающего материала кремния величиной удельного сопротивления и типом проводимости; во-вторых, обнаружить целую гамму подповерхностных макродефектов типа царапин, микротрещин, выколов и т. п., обусловленных как дефектностью исходного материала, так и несовершенством химико-механического “вскрытия” эпитаксиальных областей.

Ниже мы приводим результаты исследований эпитаксиальных структур $p-p^+$ -типа проводимости. Как известно, при получении гомоэпитаксиальных структур такого типа значения несоответствия периодов решеток, обусловленных различным уровнем их легирования, достаточно малы. И поэтому структурное совершенство получаемого эпитаксиального слоя будет во многом определяться дефектами, содержащимися в кристалл-подложке Si. В связи с этим на рис. 2, а и б представлены фотоакустические изображения для кристалл-подложек Si, используемых для эпитаксиального наращивания. Как видно, наблюдается высокая степень контраста фотоакустических изображений, который связан с тем, что заполированные микротрещины, микроцарапины и т. п. представляют собой области несплошности полупроводникового материала, и является существенным препятствием на пути распространения тепловой волны. Далее, на рис. 2, в и г представлены фотоакустические изображения гомоэпитаксиальных структур. Видно, что структурное совершенство приповерхностного слоя подложки Si играет определяющую роль при наращивании эпитаксиального слоя. Обращает на себя внимание характер изменения ФА сигнала в области структурных дефектов типа “линейных полосок” (рис. 2, в). Учитывая тот факт, что ранее [7] была показана возможность визуализации средствами ФА микроскопии областей модификации поверхности кремниевых пластин в результате имплантации

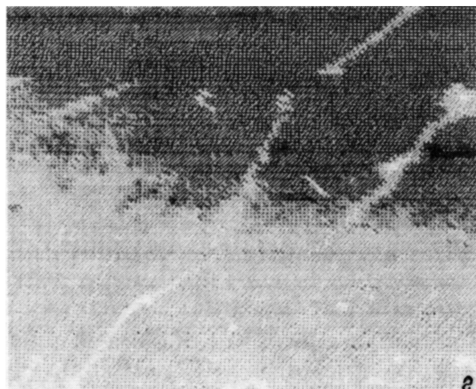
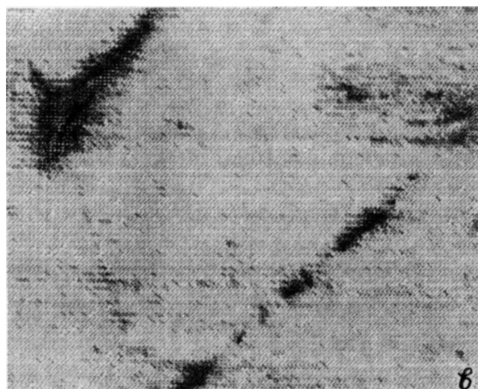
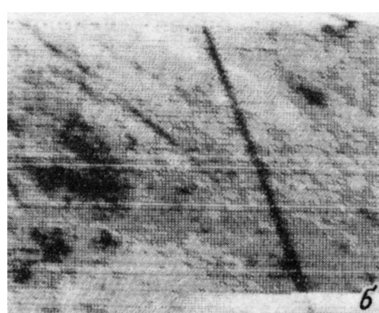


Рис. 2.
а, б — ФА изображение подповерхностных дефектов в Si пластине (*а* — 2.4×2.4 мм, *б* — 6.0×6.0 мм); *в, г* — ФА изображение эпитаксиальной кремниевой структуры *p-p*-типа проводимости (*в* — 1.2×1.2 мм, *г* — 3.6×3.6 мм).

примеси, то в данном случае, по-видимому, можно утверждать, что на ФА топограмме зафиксирован неоднородный характер распределения дефектов, имеющий “облачный” вид, который связан с процессом наращивания высоколегированной эпитаксиальной пленки. Такая ситуация весьма вероятна, поскольку зона дефекта (например, царапина, как в данном случае) является эффективным стоком для легирующей примеси. Отметим, что дефектность эпитаксиального слоя в этих образцах подтверждается интерферометрическими измерениями в инфракрасном свете. В данном же случае использование метода ФА микроскопии позволяет визуализировать дефектную структуру эпитаксиального слоя, а также проводить контроль с высокой степенью детализации на заданном участке пластины. Более того, ФА микроскопия выступает как инструмент для определения качества подготовки подложки для процессов эпитаксии.

Следует указать, что в ряде случаев при обработке поверхности полупроводникового материала концентрация напряжений вблизи дефектов приводит не только к образованию, например, дислокаций, но и к развитию хрупких микротрещин, имеющих специфический вид и известных в литературе под названием “гусиная лапка”. Отметим, что указанный вид дефектов приводит к значительному снижению прочности кремниевых пластин. На рис. 3 представлены результаты исследования такого рода дефектов. Использовались ФА микроскопия (*а*),

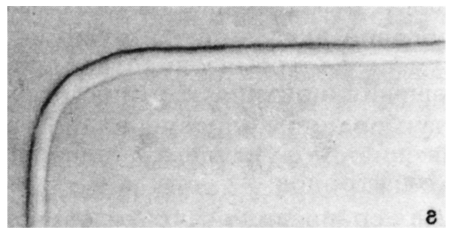
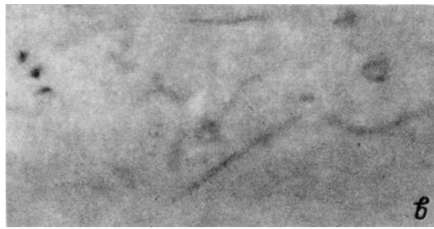
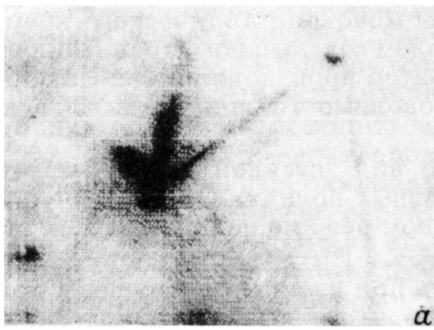


Рис. 3. Изображение дефекта ("гусиная лапка") в Si эпитаксиальной структуре (1.2×1.2 мм).

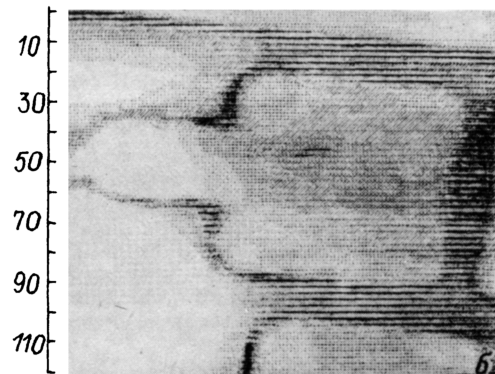
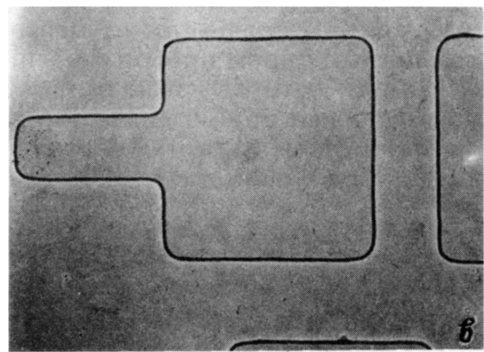
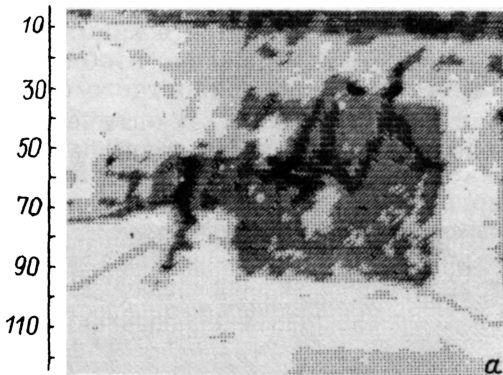


Рис. 4. Изображение двух эпитаксиальных кремниевых структур различной топологии (4.8×4.8 мм).
а — фотоакустическое, б — фотоэлектрическое, в — оптическое.

рентгеновская топография (а) и электронная (б) микроскопии. Исследовались пластины монокристаллического кремния *p*-типа проводимости, в которых методом селективного травления изготовлены углубления — “карманы”. Затем производились эпитаксиальное наращивание кремния *n*-типа проводимости, шлифовка до “вскрытия” структуры и полировка.

Изображение дефекта, имеющего вид “гусиной лапки”, представленное на рис. 3,а, получено в тепловых волнах. Отметим, что контраст *p*- и *n*-областей в использованном режиме не проявляется (в отличие от результатов, представленных в [6]). Это связано с тем, что начальная установка фазового сдвига при измерении изменена, поэтому и проявились другие детали. Этот же дефект был визуализирован методом рентгеновской топографии (рис. 3,в), что потребовало восьмичасовой экспозиции в отличие от ФА изображения, которое было получено за время около получаса. При специальном выборе угла освещения в оптическом микроскопе (рис. 3,г) можно наблюдать лишь контур границы эпитаксиальной области. Рис. 3,б соответствует изображению, полученному в электронном микроскопе в режиме отражения электронов.

Для сравнения результатов, получаемых методами ФА и ФЭ микроскопии, были исследованы эпитаксиальные структуры с *n*-карманами различной топологии. На рис. 4 представлены результаты измерений методом фотоакустической (а), фотоэлектрической (б) и оптической микроскопии (в) соответственно. Анализ изображения показывает, что как в случае ФА микроскопии (рис. 4,а), так и в случае ФЭ микроскопии (рис. 4,б) имеет место визуализация областей в кремнии с различным типом проводимости. Однако ФА изображение избыточно детализирует детали, которые связаны с дефектностью приповерхностного слоя, возникающей при ее химико-механической обработке. В оптическом же микроскопе (рис. 4,в) можно наблюдать лишь контур границы эпитаксиальной области.

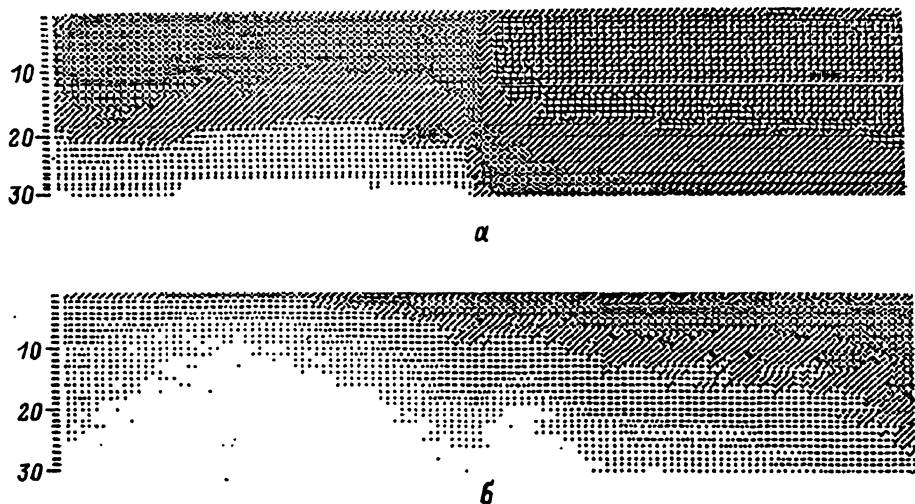


Рис. 5. Изображение легированной области в Si ($B, 0.01$ мкКл/см).
а — ФА, б — ФЭ.

В случае образцов с ионной имплантацией как ФА, так ФЭ микроскопия обеспечивает визуализацию областей, подвергнутых имплантации ионами P^- с различными дозами. Исследовались пластины кремния p -типа, в которых имплантация ионов фосфора проводилась через секторную маску с изменением дозы от 0.05 до 10 мкКл/см. Полученные ФА и ФЭ изображения проявляют топологии зон имплантации. Более того, на ФА изображениях визуализируются различного рода неоднородности, которые, вероятно, связаны с тем, что процесс имплантации прошел по тем или иным причинам неоднородно, например, в связи с флуктуациями тока пучка ионов, наличия процесса каналирования, наличия участков на полупроводниковой пластине с высокой степенью дефектности и т.п. Более сложная задача — это визуализация областей при воздействии малых доз более легкого иона, внедряемого с малой энергией. Были исследованы пластины кремния (КДБ-40), легированные бором с энергией 40 кэВ. Каждая пластина имела границу раздела легирования — нелегированную область, проходящую через центр пластины перпендикулярно базовому срезу. Дозы составляли следующий ряд значений: 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05 мкКл/см. Во всех случаях на ФА топограммах удалось зафиксировать границу легированной области (рис. 5, а), в то время как на ФЭ топограммах в случае минимальной дозы 0.01 мкКл/см это сделать не удалось (рис. 5, б). Представленные выше результаты демонстрируют чувствительность метода ФА микроскопии к диагностике малых доз имплантации, что особенно существенно в технологии МОП ИС, где пороговые напряжения наиболее критичны к малым дозам ионной имплантации.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования указывают на ряд различий в полученных изображениях, что говорит о возможности увеличения информативности при одновременном получении изображений различными методами. Кроме того, отметим, что лазерная фотоакустическая микроскопия дает в ряде случаев более полную, а иногда и единственно возможную информацию.

Список литературы

- [1] *Rosencwaig A.* // Sol. St. Technol. 1982. Vol. 25. N 3. P. 91–97. Subsurface Imaging III–V Materials. Technical Report. California (USA), 1983.
- [2] Photoacoustic and Thermal-Wave Phenomena in Semiconductors / Ed. A. Mandelis. North-Holland, 1987.
- [3] *Busse G.* // Physical Acoustics / Eds. W.P. Mason & R.N. Thurston. New York: Academic Press, 1988. Vol. 13. P. 403–478.
- [4] Photoacoustic and Photothermal Phenomena III / Ed. D. Bicanic. Springer Series in Optical Sciences. Vol. 69. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1992.
- [5] *Bulakh G.I., Burbelo R.M., Gulyaev A.L., Kucherov I.Ya.* // Proc. of the 20th IC Physics of Semiconductors. World Sci. Publ. Co. Ltd., 1990. Vol. 3. P. 2029–2031.
- [6] *Булах Г.И., Бурбело Р.М., Гуляев А.Л., Кучеров И.Я.* // ФТП. 1990. Т. 24. С. 926–928.
- [7] *Bulakh G.I., Burbelo R.M., Kucherov I.Ya., Kuzmich A.G.* // Proc. of the 6th IC Acoustoelectronic. Varna, 1993. P. 212–214.