

06

Структура термомиграционных каналов в кремнии

© Э.Ю. Бучин, Ю.И. Денисенко, С.Г. Симакин

Институт микроэлектроники и информатики РАН, Ярославль
E-mail: imi.buchin@rambler.ru

Поступило в Редакцию 3 сентября 2003 г.

Исследованы глубокие и сквозные каналы, сформированные в кремнии *n*-типа в процессе термомиграции тонких дискретных алюминиевых зон. В экспериментах использовалась техника избирательного химического травления кремния и ВИМС — анализ распределения атомов примеси. Обнаружено наличие двух обособленных оболочек по наружному контуру каналов.

Метод термомиграции жидких включений в объеме твердого тела или иначе метод зонной плавки с градиентом температуры (ЗПГТ) известен с середины 50-х гг. [1]. В самом общем виде его суть заключается в последовательной перекристаллизации частей твердого тела жидкой зоной, движущейся под действием градиента температуры. Метод ЗПГТ позволяет направленно перемещать эвтектическую зону нужного состава со скоростью, существенно превышающей (на 3–5 порядков) скорость твердотельной диффузии. Термомиграция широко используется во многих технических отраслях, в частности в микроэлектронике с ее помощью формируют глубокие легированные области различной формы, сквозные проводящие каналы, производят монолитное соединение полупроводниковых фрагментов и т.п. Основные закономерности, теория и технологические режимы различных процессов термомиграции наиболее полно изложены в научном издании [2] и трудах группы Antony and Cline (см. обзоры [3]). Целью данной работы являлось исследование состава и структуры каналов, сформированных в кремнии *n*-типа в процессе термомиграции тонких дискретных алюминиевых зон, как наименее изученного процесса.

В экспериментах использовались кремниевые пластины марки КЭФ-4.5 с ориентацией (100), диаметром 100 mm и толщиной 460 μm . Процесс термомиграции осуществлялся на термоградиентной установке инфракрасного нагрева [4]. Исходная подложка с алюминиевыми пло-

шадками различной геометрической формы и толщиной от 2 до 5 μm , нанесенными электронно-лучевым способом, нагревалась с обратной стороны до температуры 1100°C. При этом лицевая сторона подложки, где осуществлялся вход зон, имела температуру на 8–10°C ниже за счет кондукции в среде аргона от медного водоохлаждаемого пьедестала. Время процесса термомиграции составляло 10–45 min, в случае формирования сквозных каналов выход зоны фиксировался с помощью пирометра.

При указанной температуре в местах контакта алюминия с кремнием образуются эвтектические жидкие зоны, которые начинают двигаться по направлению к горячей стороне пластины. Процесс термомиграции происходит за счет растворения атомов кремния на горячем фронте расплава, диффузионного их переноса и осаждения на холодном крае расплава. В рекристаллизованной области остается часть алюминия, максимальное его количество находится вдоль оси канала и составляет $1-2 \cdot 10^{19} \text{ at/cm}^3$, за счет диффузионного легирования часть атомов переходит металлургическую границу, общий профиль концентрации алюминия в поперечном сечении канала имеет вид, близкий к erfc -распределению. Таким образом, в результате прохождения дискретных зон в подложке образуются термомиграционные каналы p -типа, а на их внешней границе формируется $p-n$ -переход. Так как исходный кремний содержит собственные примеси, фосфор в количестве $5 \cdot 10^{15}$ и кислород $\sim 10^{18} \text{ at/cm}^3$ (кремний выращен по методу Чохральского), то в процессе термомиграции происходит также и их перераспределение, обусловленное явлениями термодиффузии, зонной очистки, комплексобразования и т. п. Кроме того, продвижение эвтектической зоны сквозь объем монокристаллического кремния сопровождается возникновением напряженного состояния в обрабатываемой подложке, что может приводить к пластическому сдвигу на металлургической границе. Деформация решетки также влияет на распределение атомов примеси и дефектов по краям канала. Для получения узких рекристаллизованных каналов, ширина которых не превышает размеров алюминиевых площадок, следует использовать кремниевые пластины с ориентацией (100) и тонкие (менее 20 μm) дискретные зоны. При термомиграции тонких зон краевые эффекты проявляются наиболее ощутимо, что может существенно влиять на состав и структуру каналов, а следовательно, и на характеристики $p-n$ -переходов.

Термомиграционные каналы исследовались с помощью техники избирательного химического травления кремния и метода масс-спектрометрии вторичных ионов (ВИМС). Для избирательного химического травления кремния использовалась смесь кислот HF (48%)—HNO₃ (67...70%)—CH₃COOH (ледяная) с объемным соотношением компонентов 1 : 5 : 1. В этой смеси наблюдаются различные потенциалы для *n*- и *p*-кремния, благодаря чему образуется гальваническая пара, в которой вследствие более положительного потенциала *p*-область играет роль анода, а *n*-область — катода. На аноде идет окисление и растворение кремния, а на катоде — преимущественно восстановление HNO₃, таким образом, *p*-область травится быстрее [5]. За счет добавки уксусной кислоты процесс проходит мягко, в полирующем режиме. Чтобы исключить дополнительную фотогенерацию дырок на поверхности кремния, обработку осуществляли в темноте. Химическое травление позволяет также выявить области, имеющие кристаллографические дефекты, скопления дислокаций и т.п., поскольку реакция окисления кремния здесь протекает интенсивнее. Результаты травления термомиграционных каналов представлены на рис. 1. Два верхних электронных снимка отображают фигуры травления, образовавшиеся на поверхности образцов в местах входа эвтектических зон. Здесь представлены каналы с различной формой поперечного сечения в плоскости подложки. Обработка в смеси кислот проводилась в течение 20 с. В результате кратковременного травления основное тело каналов огранялось по направлениям (111), одновременно с этим по внешнему контуру каналов глубоко протравливалась область толщиной в несколько микрон, поверхность исходной подложки (кремния *n*-типа) оставалась практически без изменений. На нижнем левом электронном снимке представлена фигура травления поперечного скола образца, содержащего глубокий термомиграционный канал с застывшей на его дне эвтектической зоной. На данном снимке видно, что область преимущественного травления (темная область) располагается по всей длине канала. Здесь же отчетливо наблюдается светлая область, примерно той же толщины, которая охватывает по контуру весь канал. В ходе кратковременной обработки светлая область практически не стравливалась, а при сканировании в электронном микроскопе электрически заряжалась и ярко светилась. Обе указанные области представляют собой оболочки, окружающие основное тело канала в районе металлургической границы. На нижнем правом фотографическом снимке (вид сверху)

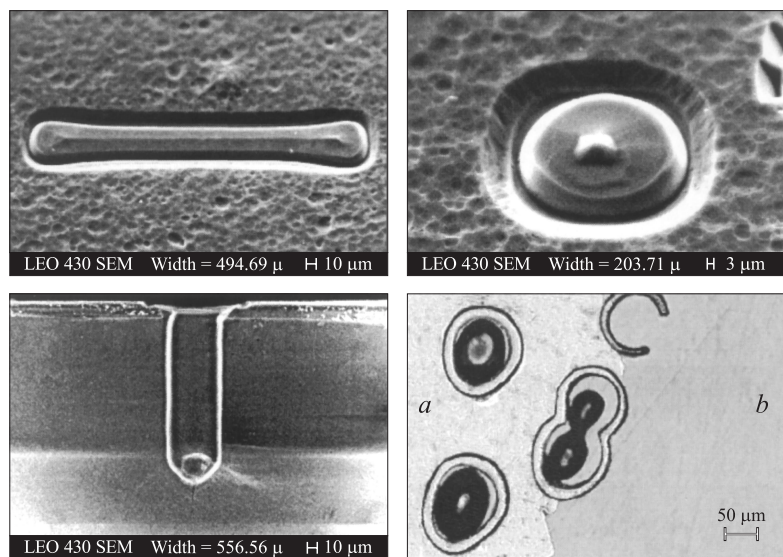


Рис. 1. Фигуры травления, полученные при химической обработке термомиграционных каналов: *a* — кремний *n*-типа, *b* — предметное стекло.

представлен результат длительного (в течение 30 min) травления образца, содержащего несколько сквозных термомиграционных каналов. Данный снимок хорошо иллюстрирует различие в скоростях травления всех структурных элементов канала: внутренняя оболочка полностью растворилась, тело канала уменьшилось в диаметре и в отдельных местах „выпало“ в процессе обработки, внешняя оболочка сохранила свою форму. Таким образом, в термомиграционных каналах с помощью избирательного химического травления удалось зафиксировать наличие двух обособленных оболочек, различающихся по физико-химическим свойствам.

Для определения состава оболочек был произведен ВИМС-анализ распределения атомов примеси в поперечном сечении скола канала. В работе использовался вторично-ионный микроскоп CAMECA IMS-4F, в качестве бомбардирующих использовались пучки ионов кислорода и азота. Размеры области сбора вторичных ионов, определяющие локальность анализа по поверхности, составляли 33 и 8.3 μm в диамет-

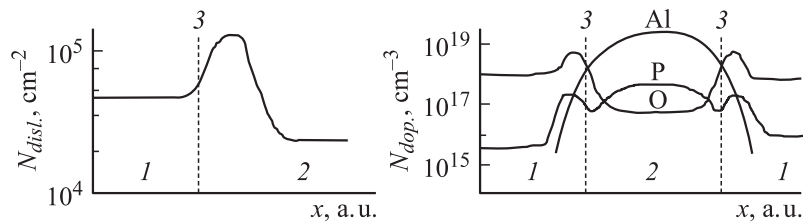


Рис. 2. Профили распределения плотности дислокаций и концентрации примесей: 1 — исходная подложка, 2 — термомиграционный канал, 3 — металлургическая граница.

ре. Для повышения чувствительности анализа распределения фосфора осуществлялся напуск кислорода в рабочую камеру с образцом. На рис. 2 (правая диаграмма) представлены усредненные сглаженные концентрационные профили распределения атомов алюминия, фосфора и кислорода. Из диаграммы следует, что в районе внешней оболочки наблюдается повышенное содержание кислорода и фосфора. Концентрационные всплески, очевидно, обусловлены встречным действием механизмов геттерирования и термодиффузии на межфазной границе. Таким образом, внешняя оболочка может рассматриваться как n^+ -область, что хорошо согласуется с представленными выше данными по избирательному химическому травлению кремния: внешняя оболочка растворялась с наименьшей скоростью, даже медленнее, чем исходная подложка n -типа. В районе местоположения внутренней оболочки не выявлено повышенного содержания акцепторной примеси. Причиной интенсивной ее растворимости, очевидно, является увеличение концентрации дефектов в этой области. На левой диаграмме представлено распределение плотности дислокаций вблизи металлургической границы в соответствии с данными работы [6]. Возрастание плотности дислокаций по краю канала обусловлено механическими напряжениями, возникающими при прохождении жидкой зоны.

При дополнительном термическом отжиге образцов в течение двух часов при температуре 1200°C толщина внутренней оболочки несколько уменьшалась за счет снятия напряжений, а внешняя оболочка, за счет разгонки примеси, увеличивалась по толщине в несколько раз и границы ее размывались.

Таким образом, в ходе выполнения работы было показано, что термомиграционные каналы, полученные в результате прохождения тонких дискретных алюминиевых зон, неоднородны по своей структуре. На их периферии имеются две обособленные оболочки с различными физико-химическими свойствами, их наличие может оказывать существенное влияние на характеристики формируемых $p-n$ -переходов.

Список литературы

- [1] Pfann W.G. // J. Metals. 1955. V. 7. N 9. P. 961–964.
- [2] Лозовский В.Н., Лукин Л.С., Попов В.П. Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых материалов. М.: Металлургия, 1987. 233 с.
- [3] Рудаков В.И., Коледов Л.А. // Науч.-техн. сб. „Зарубежная электронная техника“. М.: ЦНИИ „Электроника“, 1993. № 3–4. С. 27–60; № 5–6. С. 25–40.
- [4] Мочалов В.Б., Рудаков В.И. // Приборы и техника эксперимента. 1996. № 2. С. 155–157.
- [5] Редько Ф.Ф., Изидинов С.О. // Электрохимия. 1966. Т. 2. № 10. С. 1128; 1966. Т. 2. № 11. С. 1282; 1976. Т. 12. № 9. С. 1494.
- [6] Вольф Г.А., Млавский А.И. Рост кристаллов. Т. I / Пер. с англ. М.: Мир, 1977. С. 244–296.