

05;06;12

ПРЯМОЕ СРАЩИВАНИЕ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН С РЕГУЛЯРНЫМ РЕЛЬЕФОМ НА ИНТЕРФЕЙСЕ

© Т.С.Аргунова, А.Г.Андреев, Е.И.Белякова,
И.В.Грехов, Л.С.Костина, Т.В.Кудрявцева

В последние годы технология прямого сращивания кремния (ПСК), с окислом на поверхности пластин и без него, широко используется в силовом полупроводниковом приборостроении [1-3]. Завершением процесса сращивания является образование ковалентных связей между атомами кремния, расположенными вблизи поверхности контакта зеркально полированных, подвергнутых отмывке и гидрофилизации пластин. В [4,5] было продемонстрировано применение технологии ПСК для разработки новых конструктивных вариантов запираемого тиристора (ЗТ) и реверсивно включаемого диристора (РВД). Конструкция этих приборов предусматривает создание фотолитографическим методом на поверхности одной из сращиваемых пластин мелкоячеистой ортогональной сетки, полосы которой легируются бором. После такого долегирирования поверхность пластины приобретает регулярный рельеф в виде сетки канавок глубиной 0.3-0.5 мк. Таким образом, возникает задача исследования прямого сращивания кремниевых пластин, обеспечивающего получение структур с рельефом на интерфейсе; эта проблема имеет как прикладной, так и научный интерес.

Образцы, исследовавшиеся в процессе данной работы, представляли собой $n-n$ - или $p-n$ -структуры, изготовленные методом ПСК, включающим отмывку, гидрофилизацию и последующую термообработку плотно прижатых друг к другу зеркально полированных пластин, на поверхности одной из которых методом фотолитографии был изготовлен регулярный рельеф в виде ортогональной сетки с полосами глубиной 0,3, 0,5 и 5 мк.

Структурное совершенство пластин исследовалось комплексом проекционных методов рентгеновской дифракционной топографии. Для наблюдения дефектов в объеме кристаллов применялись в основном схемы с расходимостью падающего пучка не менее 3 угл. мин (метод Ланга и метод Берга-Баррета-Ньюкирка). Двухкристальные схемы с асимметричным монохроматором, обеспечивающие слабосходящиеся пучки, использовались реже; их применение лимитировалось изгибом разориентированных пластин. Молибденовое излучение использовалось в трансэмиссионной геометрии и медное — в геометрии отражения. Глубина проникновения рентгеновских лучей в последнем случае не превышала 40 мк. Перед получением топограмм структуры ориентировались с точностью 1° . Взаимная ориентация пластин характеризовалась двумя параметрами: углом поворота пластин θ и углом φ между (111) плоскостями. Вследствие разориентации рентгеновские дифракционные рефлексы пластин, как правило, разделялись и топограммы демонстрировали структурное качество каждой из пластин в отдельности.

В результате предварительного исследования был определен критерий, по которому диагностировалось качество сращивания. Известно, что пригонка кристаллов друг к другу всегда связана со структурными изменениями. В кремниевых структурах того типа, который исследовался в данной работе, был наглядный признак протекания процессов дефектообразования в границе раздела, обусловленный присутствием регулярного рельефа на поверхности одной из пластин. В том случае, когда кристаллы действительно срастались друг с другом, гладкая до сращивания пластина наследовала рельеф в виде ортогональной сетки канавок. Это означало появление в ней сильных локальных нарушений кристаллической решетки. Непосредственно после сращивания описанные нарушения демонстрировали, как правило, отрицательный контраст (интенсивность отражения в этих местах структуры была ниже фона средней решетки), что означало его ориентационную природу: контраст появлялся потому, что нарушенные плоскости в этих местах пластины были развернуты на углы, превышающие расходимость падающего пучка лучей. В тех областях, где плот-

ный контакт кристаллов не перешел еще в стадию структурной перестройки, рельеф наблюдался лишь в рефлексе той пластины, на которую он был нанесен методом фотолиграфии.

Полученные результаты доказали возможность успешного сращивания кремниевых пластин с регулярным рельефом. Структурное качество пластин зависело от следующих параметров:

- совершенства их поверхности;
- угла разориентации θ ;
- степени отклонения границы от плотноупакованных плоскостей (111) (величины угла φ);
- дефектообразования в объеме кремниевых пластин при сращивании, т. е. в определенной степени от чистоты исходного кремния.

В случае произвольных θ -ориентаций и углов $\varphi > 3^\circ$, а также для пластин с недостаточно гладкой поверхностью длительности процесса сращивания было недостаточно для формирования сплошной границы раздела по всей площади структуры. Соблюдение же специальных ориентационных соотношений облегчало сращивание. Лучшие из выращенных структур были разориентированы на углы $\theta < 5^\circ$ или на угол $\theta = 60^\circ$ при условии, что угол $\varphi < 1^\circ$; они не содержали пузырей размером $\geq 10-20$ мк (предел рентгенотопографического разрешения). На рис. 1 приведена топограмма, демонстрирующая успешное сращивание двух пластин диаметром 40 мм. Видимые на топограмме нарушения были внесены уже при комнатной температуре и обусловлены необходимым для изготовления приборов разрезанием исходной пластины на структуры меньшего диаметра.

Если структуры с несплошной границей подвергались дополнительным термообработкам, сращивание продолжалось. На топограммах, позволивших наблюдать разные стадии этого процесса, было видно, что сплошная граница формировалась путем возникновения островков границы неправильной формы с их последующим слиянием. Кроме того, наблюдалось зарастание пузырей (механизм этого процесса в данном типе структур изучен нами, и результаты будут опубликованы в ближайшее время).

Существенной особенностью структур с рельефом было то, что они имели более низкую плотность дислокаций, прорастающих от границы в объем, чем выращенные в таких же условиях гладкие пластины. Последнее наглядно проявлялось на топограммах в геометрии отражения: приповерхностная плотность дислокаций в разориентированных гладких пластинах после сращивания была не менее чем 10^5 см^{-2} , тогда как в так же разориентированных рельефных она едва достигала 10^2 см^{-2} . Если принять во вни-

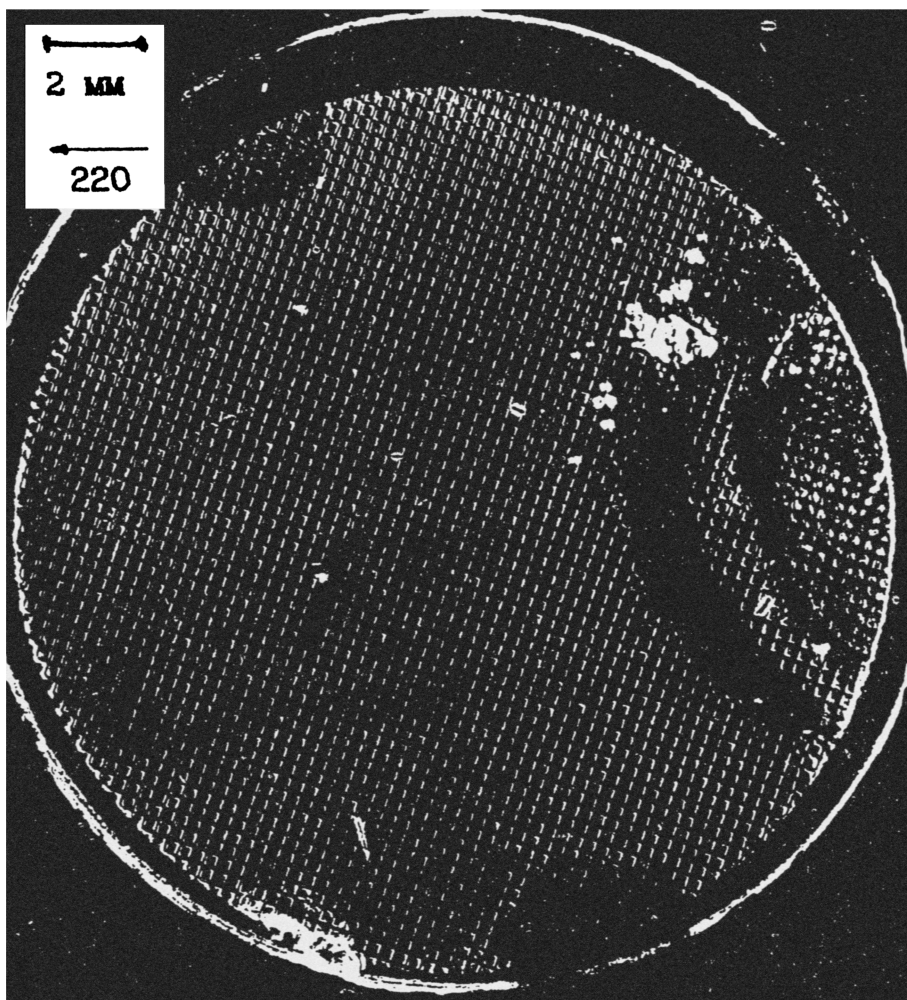


Рис. 1. Топограмма $n-p$ -структуры с рельефом на интерфейсе. Метод Ланга, отражение типа 220, Mo K_α -излучение. Структура вырезана из пластины диаметром 40 мм, имевшей ориентацию: $\theta = 60^\circ$, $\varphi < 1^\circ$.

мание, что до сращивания пластины были бездислокационными (это было показано соответствующим рентгенотопографическим контролем), то можно сделать вывод о весьма заметном различии плотности прорастающих дислокаций в двух описанных типах структур. Кроме того, на топограммах наблюдалось изменение цвета контраста канавок в процессе термообработок, и это свидетельствовало о протекании в них структурных перестроек. Ранее упоминав-

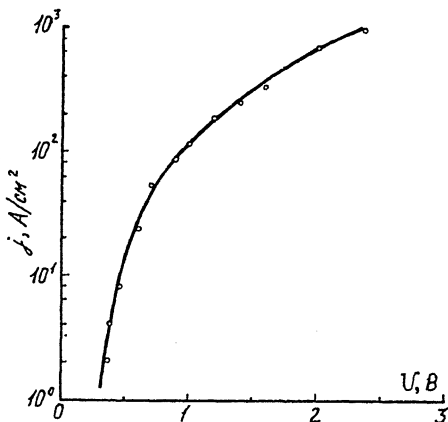


Рис. 2. Прямая ВАХ ПСК-диода, изготовленного из пластин бестигельного n -кремния ($\rho = 30 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) и Чохральского p -кремния марки КДБ ($\rho = 0.002 \text{ Ом} \cdot \text{см}$). Рельеф выполнялся на пластине n -типа.

шийся отрицательный ориентационный контраст после дополнительного отжига менялся на положительный. Последний можно с уверенностью объяснить присутствием вблизи канавок высокой плотности дислокаций. Таким образом, канавки служили стоками для дислокаций, в большом количестве возникающих вблизи границ двух кристаллов при сращивании. Эффект был заметнее для более глубоких канавок. Сопоставление вышеописанных экспериментальных фактов позволяет сделать вывод о том, что скольжение приграничных дислокаций на свободные поверхности канавок способствовало очищению объема пластин от этих дефектов.

Электрофизическое состояние интерфейса было охарактеризовано вольтамперными характеристиками (ВАХ). На рис. 2 приведена прямая ВАХ диода, изготовленного путем прямого сращивания зеркально полированных пластин бестигельного n -кремния марки КОФ с ориентацией (111) и удельным сопротивлением $\rho = 30 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и p -кремния марки КДБ, выращенного методом Чохральского, с той же ориентацией и $\rho = 0.002 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Рельеф выполнялся на пластине n -типа и имел следующие параметры: ширина канавок 50 мкм, расстояние между ними 200 мкм, их глубина 0.3 мкм. Диаметр (40 мм) и толщина (0.35–0.40 мм) обеих пластин были примерно одинаковы. Их соединение осуществлялось на воздухе; термообработка состояла из следующих циклов: 95°C 5 ч; 1100°C 4 ч. Поскольку никаких термообработок при более высоких температурах не производилось, то можно считать, что p – n -переход располагался вблизи интер-

фейса. Металлизация осуществлялась путем химического осаждения никеля с последующим вжиганием при 650°C . Затем структура припаивалась p -стороной к вольфрамовому термокомпенсатору. Краевой контур обрабатывался и пассивировался стандартным для силовой техники способом.

Хорошо видно, что вплоть до плотностей тока $j = (1 - 1.5) \text{ A/cm}^2$ прямая ВАХ имеет экспоненциальный характер, дальнейшая ее линеаризация определяется эффектами, имеющими место при высокой концентрации электронно-дырочной плазмы, а именно: падением коэффициента инжекции $p - n$ -перехода, электронно-дырочным рассеянием и Оже-рекомбинацией. В области обычных для силовых приборов плотностей тока $j = (250 - 300) \text{ A/cm}^2$ падение напряжения на ПСК диоде практически не отличалось от типичных для диффузионных $p - n$ -переходов значений (1.3–1.5 В). В обратном направлении величина напряжения лавинного пробоя такого диода составляла 1250 В, что приближается к расчетному значению для данной марки кремния. Таким образом, можно сделать вывод, что наличие рельефа на интерфейсе ПСК структур не препятствует формированию совершенного высоковольтного $p - n$ -перехода.

Список литературы

- [1] *Haisma J., Spierings G.A.C.M., Biermann U.K.P., Pals J.A.* // Jap. J. Appl. Phys. 1989. V. 28. N 8. P. 1426–1443.
- [2] *Bengtsson S.* // J. Electronic Mater. 1992. V. 21. N 8. P. 841–862.
- [3] *Волле М.В., Воронков В.Б., Грехов И.В., Козлов В.А.* // Электротехника. 1992. В. 2. С. 58–64.
- [4] *Грехов И.В., Белякова Е.И., Костина Л.С., Рольник И.А.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 23. С. 26–29.
- [5] *Grekhov I.V., Belyakova E.I., Kostina L.S., Rol'nik I.A.* // Proc. of ISPSD. 1994. P. 293–295.

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе РАН
С.-Петербург

Поступило в Редакцию
22 мая 1995 г.