

## Создание методом твердофазного прямого сращивания отдельных $p-n$ -переходов, разделенных изолирующим слоем

© Е.Г. Гук, Б.Г. Подласкин, Н.А. Токранова, В.Б. Воронков, В.А. Козлов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 15 декабря 1998 г. Принята к печати 16 декабря 1998 г.)

Разработаны три варианта технологического цикла изготовления отдельных  $p-n$ -переходов, разделенных изолирующим слоем, базирующиеся на использовании твердофазного прямого сращивания. Исследованы прямая и обратная ветви вольт-амперной характеристики сформированных диодов. Для всех технологических вариантов дифференциальное сопротивление прямой ветви отдельных  $p-n$ -переходов составляет  $\sim 0.01$  Ом, напряжение пробоя  $\sim 400$  В, ширина области апертуры для встречно включенных диодов составляет 0.22 В. Все эти данные, а также высокая интегральная фоточувствительность диодов свидетельствуют об отсутствии окисного барьера между  $p$ - и  $n$ -областями и о высоком качестве границы, полученной в результате сращивания.

Метод твердофазного прямого сращивания (ТПС) был разработан для формирования различных интерфейсов типа Si-Si, Si-SiO<sub>2</sub> и т.п. путем образования прямых ковалентных связей между атомами сращиваемых материалов при их высокотемпературном соединении [1–3]. Наиболее широко ТПС используется для изготовления кремниевых приборов на изолирующей подложке с электрофизическими параметрами, характерными для монокристаллического материала, так называемая SOI-технология (silicon on insulator technology) [4]. В этом случае реализуются самые разнообразные варианты формирования интерфейсов: от соединения окисленной и неокисленной Si-пластин с дальнейшим формированием на последней прибора с нужной топологией до использования в качестве второй подложки кремниевой пластины, на поверхности которой уже сформированы, например, транзисторные меза-структуры с  $p-n$ -переходами, перпендикулярными или параллельными интерфейсу [5–7].

Для создания  $p-n$ -переходов (т.е. формирования интерфейса Si-Si) методом ТПС до сих пор соединяли только чистые кремниевые пластины с разным типом проводимости. Так, в ряде работ описана технология простого и быстрого формирования силовых кремниевых диодных структур большой площади, образованных в результате контакта совершенных монокристаллических слоев с заданными электрофизическими параметрами. Показано, что электрические характеристики таких структур не уступают характеристикам аналогичных силовых полупроводниковых приборов, изготовленных диффузионным методом, а по однородности пробоя по площади пластины превосходят традиционные аналоги [3,8,9].

Однако в случае формирования разделенных элементов определенной топологии сращивание пластин применялось только при создании контактных слоев, т.е. границ  $p-p^+$  и  $n-n^+$  [10,11]. Между тем важнейшей задачей является формирование методом ТПС отдельных  $p-n$ -переходов. Решение этой задачи позволит не только отказаться от энергоемкой и экологически грязной

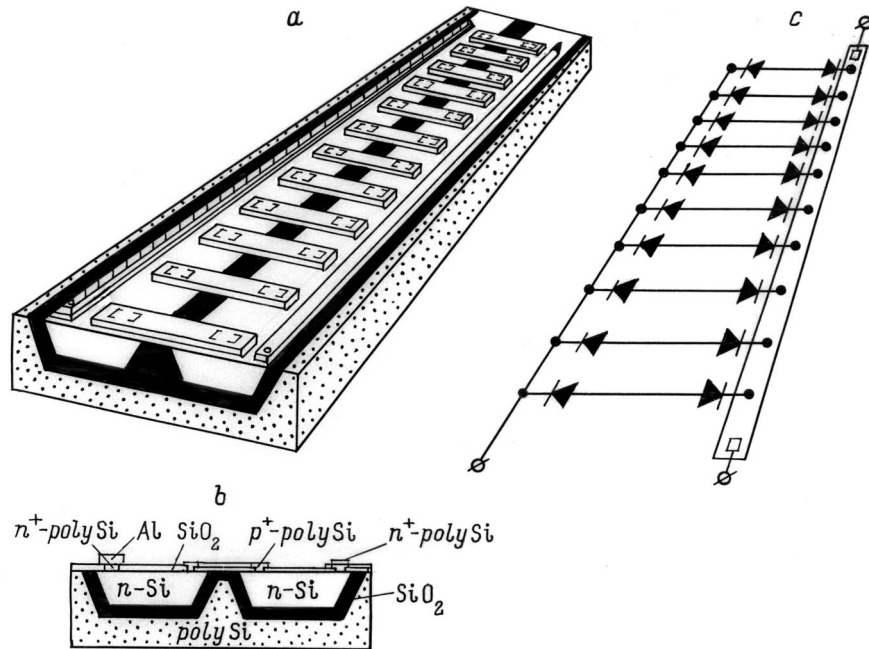
КСДИ (кремний с диэлектрической изоляцией) технологии [12], но и позволит улучшить параметры традиционных полупроводниковых приборов. Кроме того, технология ТПС открывает возможность перехода на новый уровень "конструирования" трехмерных интегральных схем с активной вертикальной связью между слоями при сохранении у встроенных элементов электрофизических характеристик, соответствующих монокристаллическому материалу.

Характерным примером использования отдельных  $p-n$ -переходов могут служить фотодиодные матрицы и, в частности, многоэлементный фотоприемник "мульти-скан" [13], принцип работы которого основан на использовании свойств пары встречно включенных фотодиодов.

Традиционная планарная технология изготовления мультискана базируется на использовании КСДИ структур, позволяющих изолировать друг от друга встречно включенные диоды каждой пары (рис. 1, *a, b*). Эквивалентная схема мультискана показана на рис. 1, *c*. Данную эквивалентную схему можно реализовать и без использования КСДИ технологии, что позволит отказаться от планарного варианта структуры, получить высококачественные  $p-n$ -переходы с высоким пробойным напряжением и узкой переходной зоной вольт-амперной характеристики (ВАХ). Вариант возможной реализации структуры с набором встречно включенных фотодиодов с помощью ТПС представлен на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что ключевой технологической операцией изготовления подобной структуры является создание интерфейсного слоя, состоящего из отдельных  $p-n$ -переходов, разделенных изолирующим слоем (рис. 3).

Цель данной работы — разработка технологического базового цикла, приводящего к созданию методом твердофазного прямого сращивания изолированных  $p-n$ -переходов. Многократное воспроизведение данного цикла в различных комбинациях позволит формировать многослойные полупроводниковые структуры с отдельными элементами, встроенными в объем.



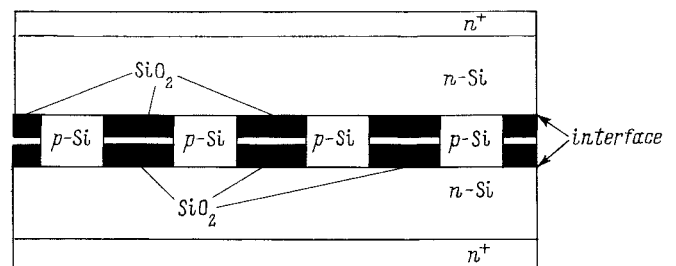
**Рис. 1.** *a* — общий вид фотоприемника мультискан; *b* — поперечный разрез структуры мультискана; *c* — эквивалентная схема мультискана; polySi — поликристаллический кремний.

Этот технологический цикл базируется на двух ключевых операциях: твердофазное прямое срачивание и прецизионное вскрытие, т.е. удаление части профилированной кремниевой пластины до вскрытия областей, разделяющих  $p-n$ -переходы. Первая операция предъявляет высокие требования к качеству срачиваемых поверхностей, получаемых в процессе всех технологических действий, предшествующих срачиванию. Отработка второй операции связана с выбором способов прецизионного формирования профилированного слоя. Строгое соблюдение определенной высоты "столбиков", являющихся частью формируемых диодов, необходимо не только для получения определенных электрофизических параметров этих структур, но важно и для последующих операций ТПС. При этом важно не только абсолютное значение высоты столбиков, но и разброс высоты по площади пластины. Предполагаемое использование создаваемых диодов в качестве ячейки многоэлементной фотодиодной матрицы делает однородность по высоте особенно актуальной из-за необходимости получения малого разброса параметров  $p-n$ -переходов по всей структуре прибора.

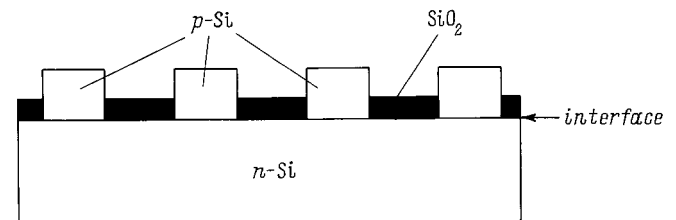
Для выбора способа изготовления структур с отдельными  $p-n$ -переходами, разделенными изолирующим слоем, были опробованы несколько технологических вариантов. Поскольку создаваемая нами структура является аналогом фотоприемника, перед нами стояла задача формирования несимметричного  $p-n$ -перехода. Для этого были использованы две пластины, перепад концентраций в которых составлял 5 порядков (промышленные зеркально полированные пластины: низкоомная пластина

$p$ -типа проводимости ориентации  $\langle 100 \rangle$  диаметром 60 мм и толщиной 350 мкм и высокоомная пластина  $n$ -типа проводимости КЭФ-7.5 ориентации  $\langle 100 \rangle$  диаметром 60 мм и толщиной 500 мкм).

Профилирование поверхности осуществлялось на пластинах  $p$ -типа проводимости. С учетом предполагаемой окончательной конструкции (рис. 2) высота профилиро-



**Рис. 2.** Вариант возможной реализации мультискана с помощью ТПС.



**Рис. 3.** Базовая структура, включающая интерфейсный слой, состоящий из отдельных  $p-n$ -переходов, разделенных изолирующим слоем  $\text{SiO}_2$ .

ванного слоя (вытравленных столбиков) составляла не менее 2 мкм во избежание диффузионной связи между  $p$ - $n$ -переходами каждой пары в случае использования последующей операции ТПС для изготовления встречно включенных диодов, но не более 10 мкм для сохранения механической прочности структуры. Во всех случаях столбики были диаметром 250 мкм, а расстояние между ними составляло 5 мм.

Высокотемпературное твердофазное сращивание осуществлялось между профилированной пластиной кремния  $p$ -типа проводимости (стороной, прошедшей операцию травления) и чистой пластиной кремния  $n$ -типа проводимости.

Непосредственно перед сращиванием все пластины травилась в плавиковой кислоте, а затем проходили стандартный цикл кислотно-перекисных отмывок, на завершающей стадии которых проводилась обработка в 2%-м водном растворе HF с последующей гидрофиллизацией поверхности в растворе  $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$  (0.05:1:5) и окончательной промывкой в деионизованной воде с удельным сопротивлением  $\sim 18$  МОм·см. Соединение пластин проводилось также в деионизованной воде согласно методике, описанной в [14], что позволяет избежать необходимости использования обеспыленной атмосферы, а затем выполнялись предварительная термообработка для удаления влаги и сращивание пластин. Высокотемпературная термообработка соединенных пар проводилась на воздухе при 1200°C в течение 1 ч без приложения внешнего давления.

Для исследования электрофизических параметров полученных структур формировались омические контакты (на кремнии  $n$ -типа проводимости — химическим никелированием, на кремнии  $p$ -типа проводимости — вжиганием напыленного алюминия).

Вариант 1 технологического цикла предусматривал вытравливание столбиков высотой 10 мкм на низкоомной пластине кремния  $p$ -типа проводимости (КДБ-0.005). После операции сращивания проводилось удаление части профилированной пластины до вскрытия областей, разделяющих  $p$ - $n$ -переходы с помощью прецизионных шлифовки и полировки кремния.

В варианте 2 технологии мы решили заменить технически наиболее сложную операцию полировки на травление с остановкой.

Использование зависимости скорости травления кремния от концентрации легирующей примеси широко применяется в полупроводниковой технологии, особенно при изготовлении мембран [15]. Так, например, в работе [16] описана методика травления со стоп-слоем, представляющим собой диффузионный слой с концентрацией бора  $\sim 10^{20}$  см $^{-3}$ . Так как диффузионный фронт с высокой точностью параллелен поверхности пластины, авторам удалось получить однородные слои кремния толщиной в единицы микрометров.

Использование операции травления со стоп-слоем обусловило применение в случае второго варианта кремния  $p$ -типа проводимости с исходной концентрацией бора

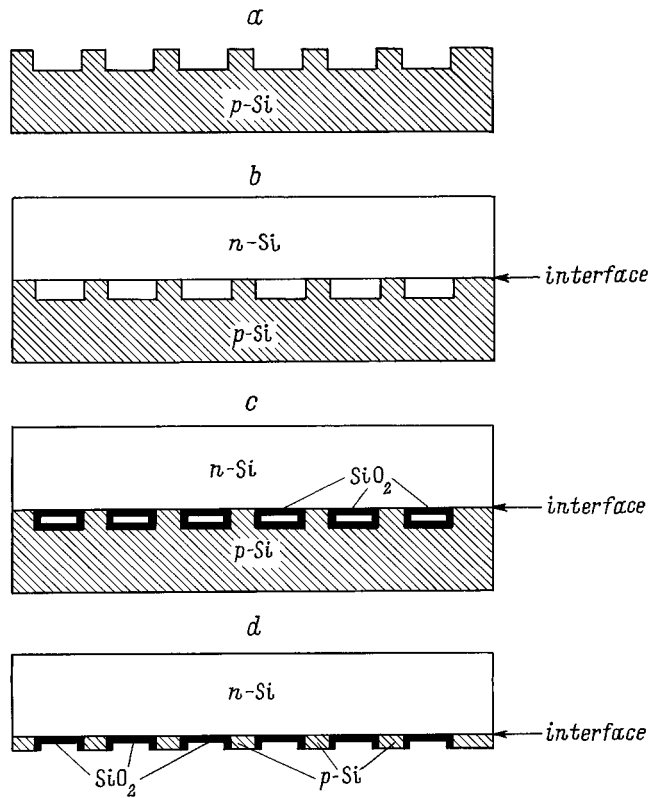
в нем  $\sim 10^{16}$  см $^{-3}$  (КДБ-1). В эти пластины после формирования столбиков высотой 10 мкм, окисления и фотолитографии проводилась диффузия бора на воздухе из нанесенного на поверхность полимерного источника [17] с высоким содержанием бора, обеспечивающего поверхностную концентрацию примеси  $\sim 10^{21}$  см $^{-3}$ . Диффузия бора проводилась при 1250°C в течение 1 ч. Глубина залегания диффузионного слоя составила  $x_j \sim 10$  мкм.

Однако задача сращивания пластин кремния, имеющих диффузионные слои с высоким уровнем легирования мелкими примесями, представляет определенные трудности вследствие того, что диффузия снижает качество поверхности кремниевых пластин. В работе [18] показана возможность прямого сращивания пластин, имеющих сформированный в окисляющей среде диффузионный  $p$ -либо  $n$ -слой с высокой поверхностной концентрацией примеси, если после диффузии проводить окисление пластин с последующим удалением окисла. Для решения нашей задачи эта методика не эффективна, так как максимальная поверхностная концентрация бора, достигаемая с ее помощью, не превышает  $10^{20}$  см $^{-3}$ . Поскольку нам важна не столько концентрация бора в приповерхностном слое, формирующем при сращивании интерфейс, сколько ее значение на глубине  $\sim 10$  мкм, представлялось возможным удалить дефектный приповерхностный слой полировкой.

В [19] предпринята попытка срастить пластины кремния с глубиной залегания  $p^+$ - $n$ -перехода 100 мкм после диффузии Ga (в инертной атмосфере) либо после совместной диффузии В и Al (на воздухе). После диффузии эти пластины подвергались химико-механической полировке из-за эрозии поверхности. В результате удалось срастить только пластины после диффузии Ga. Полировка поверхности после диффузии бора с алюминием выявила микрошероховатость, не позволившую срастить пластины. Очевидно, причиной сохранения микрошероховатости является химико-механический характер использованной полировки, сопровождающейся неизбежным селективным травлением по дефектам. По этой причине мы использовали механическую полировку профилированной поверхности пластины, удалив в результате этой операции  $\sim 1$  мкм приповерхностного сильно легированного бором слоя.

После операции ТПС и предварительного удаления с пластин  $p$ -кремния шлифовкой 200 мкм структуры подвергались обработке в горячем травителе  $\text{KOH} + \text{изопропанол} + \text{вода}$ , действие которого останавливается, когда достигается  $p$ -область [16].

В 3-м варианте технологии в качестве стоп-слоя для операции прецизионной полировки мы использовали  $\text{SiO}_2$ . С этой целью на исходном кремнии  $p$ -типа проводимости (КДБ-0.005) травлением были сформированы столбики, высота которых составляла 2 мкм, промежутки между которыми были зарощены термическим окислом толщиной 1.8 мкм, а с самих столбиков окисел был стравлен после проведения фотолитографии. Химико-механическая полировка, удалявшая высту-



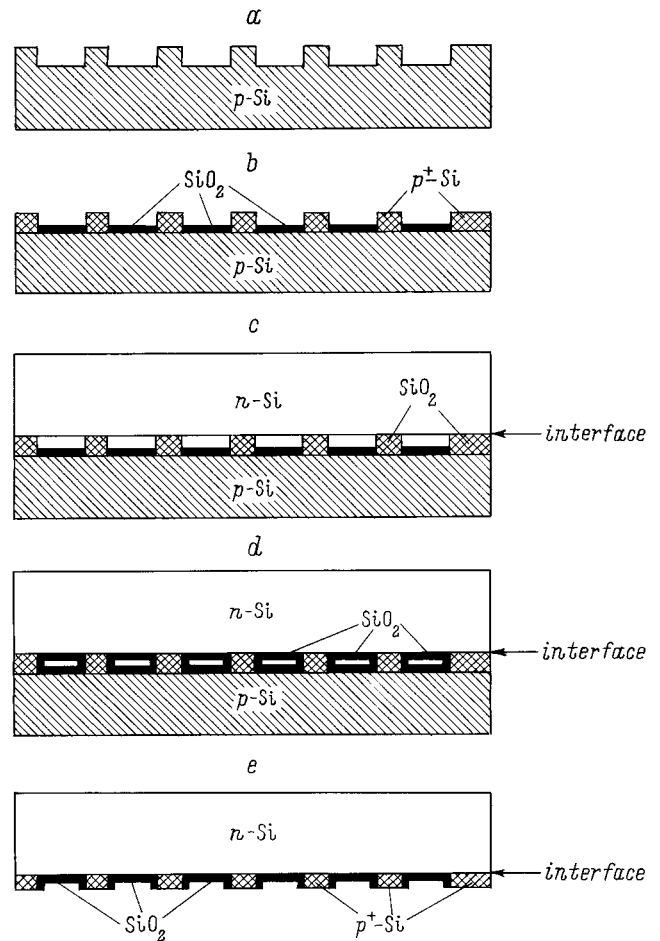
**Рис. 4.** Первый вариант технологического цикла изготовления отдельных  $p-n$ -переходов, разделенных изолирующим слоем, с использованием ТПС. *a* — формирование с помощью фотолитографии химическим травлением рельефа (столбиков) на исходной промышленной полированной пластине кремния  $p$ -типа проводимости; *b* — высокотемпературное твердофазное сращивание при  $1250^{\circ}\text{C}$  в течение 1 ч первой пластины стороной, прошедшей операцию травления, с чистой полированной пластиной кремния; *c* — окисление в сухом кислороде при  $1100^{\circ}\text{C}$  в течение 1 ч с последующим окислением в парах воды при  $1250^{\circ}\text{C}$  в течение 4 ч для формирования надежного изолирующего слоя; *d* — механическая шлифовка и последующая прецизионная полировка для удаления основной части кремниевой пластины  $p$ -типа проводимости до вскрытия пустот, разделяющих отдельные  $p-n$ -переходы.

пающий над окислом кремний, останавливалась слоем окисла. Вскрытие изолированных  $p-n$ -переходов осуществлялось предварительной механической шлифовкой, завершаемой прецизионной полировкой до окисного стоп-слоя.

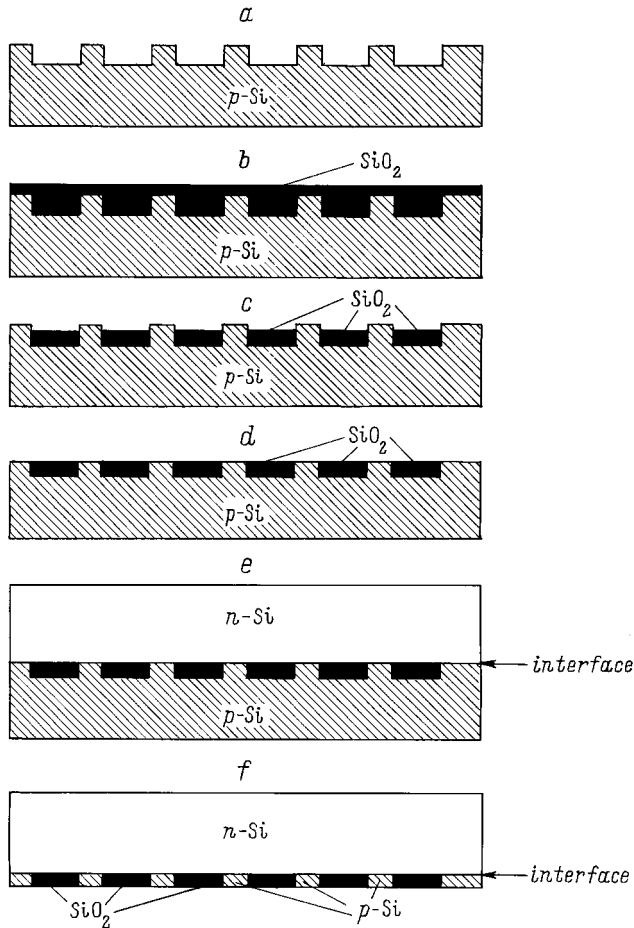
Схемы трех различных вариантов технологического цикла изготовления отдельных  $p-n$ -переходов, разделенных изолирующим слоем, с использованием ТПС представлены на рис. 4–6.

Стандартным методом контроля сплошности сращивания является метод инфракрасной (ИК) фотометрии [20]. В нашем случае такой метод мог дать лишь оценочный результат вследствие высокой концентрации мелкой примеси в  $p$ -кремнии, обуславливающей интенсивное поглощение в ИК области. Однако операции шлифовки и

полировки, применявшиеся для удаления слоя  $p$ -кремния и создающие сильные сдвиговые нагрузки на интерфейс, позволили оценить его механическую прочность и тем самым качество сращивания. При шлифовке всех образцов, а также при полировке структур в технологических вариантах 1 и 3, либо при травлении во 2-м варианте произошло частичное разрушение несросшихся столбиков. Минимальную площадь ( $\sim 15\%$ ) такие участки занимали в варианте 1, в двух других случаях площадь дефектных



**Рис. 5.** Второй вариант технологического цикла изготовления отдельных  $p-n$ -переходов, разделенных изолирующим слоем, с использованием ТПС. *a* — формирование с помощью фотолитографии химическим травлением рельефа (столбиков) на исходной промышленной полированной пластине кремния  $p$ -типа проводимости; *b* — проведение диффузии бора непосредственно в столбики после предварительных окисления и фотолитографии при  $1250^{\circ}\text{C}$  в течение 1 ч; *c* — высокотемпературное твердофазное сращивание при  $1250^{\circ}\text{C}$  в течение 1 ч первой пластины стороной, прошедшей операцию травления, с чистой полированной пластиной кремния; *d* — окисление в сухом кислороде при  $1100^{\circ}\text{C}$  в течение 1 ч с последующим окислением в парах воды при  $1250^{\circ}\text{C}$  в течение 4 ч для формирования надежного изолирующего слоя; *e* — предварительное удаление с пластин  $p$ -кремния 200 мкм механической шлифовкой и последующее травление  $p$ -слоя до стоп-слоя для вскрытия пустот, разделяющих отдельные  $p-n$ -переходы.



**Рис. 6.** Третий вариант технологического цикла изготовления отдельных  $p-n$ -переходов, разделенных изолирующим слоем, с использованием ТПС. *a* — формирование с помощью фотолитографии химическим травлением рельефа (столбиков) на исходной промышленной полированной пластине кремния  $p$ -типа проводимости; *b* — окисление в сухом кислороде при  $1100^\circ\text{C}$  для заполнения промежутков между столбиками термическим окислом толщиной  $1.8\ \mu\text{м}$ ; *c* — удаление окисла со столбиков; *d* — химико-механическая полировка, удалившая выступающий над окислом кремний и остановленная слоем окисла; *e* — высокотемпературное твердофазное сращивание при  $1250^\circ\text{C}$  в течение 1 ч первой пластины стороной, прошедшей операцию травления, с чистой полированной пластиной кремния; *f* — вскрытие  $p-n$ -переходов в результате предварительной механической шлифовки, завершаемой прецизионной полировкой до окисного стоп-слоя.

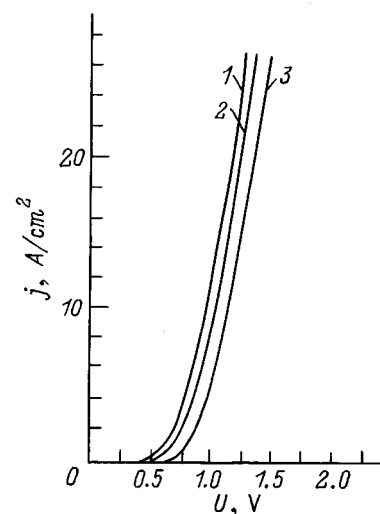
участков достигала  $\sim 40 \div 45\%$ . Так как характерной особенностью технологического цикла в этих последних вариантах (2 и 3) является применение полировки кремния  $p$ -типа проводимости с профилированной стороны до операции ТПС, можно предполагать, что использованная нами полировка снизила качество поверхности на значительной части кремниевой пластины. Однако результаты, полученные в результате использования 2-го технологического варианта, представляют самостоятельный интерес с той точки зрения, что впервые показана возмож-

ность твердофазного прямого сращивания поверхности после механической полировки. Нам представляется, что дальнейшие эксперименты с размером зерна полирующей пасты и с режимами полировки позволят увеличить площадь интерфейса высокого качества.

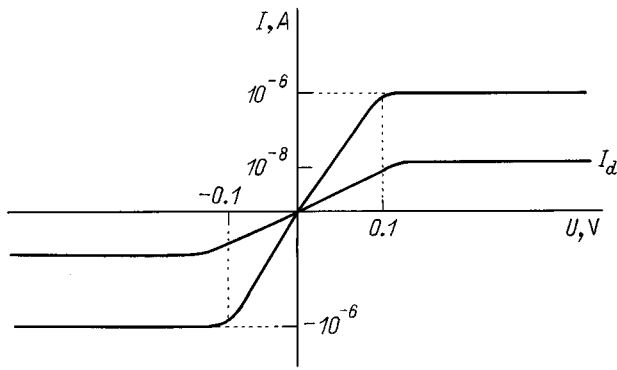
Также следует отметить, что операция вскрытия профилированной поверхности, основанная на травлении со стоп-слоем, обеспечивала наибольшую однородность высоты столбиков ( $\pm 0.3\ \mu\text{м}$ ), в то время как разброс высоты в 1-м и 2-м способах составил  $\pm 1.5$  и  $\pm 0.8\ \mu\text{м}$  соответственно.

Основные выводы о качестве  $p-n$ -переходов, полученных в процессе сращивания, были сделаны в результате исследования прямой (рис. 7) и обратной ветвей ВАХ сформированных диодов. Для всех трех вариантов базовой технологии дифференциальное сопротивление прямой ветви лучших  $p-n$ -переходов составляло  $\sim 0.01\ \text{Ом}$ , что свидетельствует о высоком качестве сращивания. Для обратной ветви ВАХ во всех трех вариантах утечка при смещении  $130\ \text{В}$  не превышала  $10\ \mu\text{А}$ , а напряжение пробоя составляло величину  $\sim 400\ \text{В}$ . Однако количество таких  $p-n$ -переходов, без технологического барьера между  $p$ - и  $n$ -областями, было различным в разных случаях. Так, в 1-м варианте количество  $p-n$ -переходов с подобными характеристиками составляло около  $60\%$ , во 2-м — около  $30\%$ , в 3-м — менее  $20\%$ .

Для встречно включенных диодов, используемых в фотодиодных матрицах и мультисканах в качестве элементарной ячейки и имеющих двухполярную ВАХ, большое значение имеет ширина переходного участка характеристики между двумя областями насыщения тока (апертура). В области апертуры происходит переключение фотодиодов из запертого состояния в открытое и наоборот. Основным свойством этого участка ВАХ является ширина переходного участка, определяющая в



**Рис. 7.** Прямые ветви вольт-амперных ( $j-U$ ) характеристик отдельных  $p-n$ -переходов, разделенных изолирующим слоем. 1–3 соответствуют технологическим вариантам 1–3.



**Рис. 8.** Вольт-амперная ( $I-U$ ) характеристика диодов, полученных методом твердофазного прямого срачивания, при встречном включении.  $I_d$  — темновой ток.

случае работы с мультисканом пространственную ширину переходной зоны, внутри которой фототоки  $p-n$ -переходов меняют свой знак [21]. Ширина апертуры ВАХ диод-диодной ячейки является важнейшим параметром, определяющим такие характеристики фотоприемника, как пространственная разрешающая способность в режиме сканирования, координатная чувствительность в режиме позиционирования и другие. При попадании светового сигнала в "зону апертуры" фотоприемных слоев прибора наблюдается уменьшение преобразования светового сигнала в электрический ток. Возможность сужения апертуры в первую очередь зависит от возможности приложения к  $p-n$ -переходу достаточно высокого напряжения. Действующая апертура мультискана уменьшает свое пространственное значение с увеличением прикладываемого напряжения.

На рис. 8 показаны экспериментальные ВАХ встречно включенных  $p-n$ -переходов для трех технологических вариантов их изготовления. Видно, что ширина апертуры составляет 0.22 В. Теоретическое значение полуширины вольтовой апертуры получено из выражения для ВАХ одиночной пары встречно включенных диодов, основанного на уравнении Шокли для идеального кремниевго диода [22], и составляет  $8kT/q$ . При условии идеальности  $p-n$ -перехода расчетное значение полной ширины апертуры при температуре 300 К составляет 0.21 В, что практически соответствует экспериментальным значениям, полученным нами для всех технологических вариантов, и говорит об "идеальности" сформированных  $p-n$ -переходов.

При работе с мультисканом, изготовленным с использованием КСДИ технологии, пространственное значение апертуры составляло  $\sim 400$  мкм в связи с тем, что величина прикладываемого напряжения составляла 10 В. Теперь высокое пробойное напряжение позволяет работать при величине приложенного напряжения более 100 В, что приводит к уменьшению пространственного значения апертуры до 40 мкм и менее.

Кроме того, сформированные отдельные  $p-n$ -переходы, разделенные изолирующим слоем, отличаются высокой fotocувствительностью, что свидетельствует об отсутствии окисных барьеров между  $p$ - и  $n$ -областями, и малыми темновыми токами (при 30 В для всех вариантов темновой ток не превышал  $5 \cdot 10^{-8}$  А). Измеренная интегральная fotocувствительность для технологических вариантов 1 и 3 составляла 0.3 А/Вт, для варианта 2 — 0.25 А/Вт.

Таким образом, оценка электрических характеристик созданных изолированных диодов подтвердила эффективность использования ТПС при формировании высококачественных  $p-n$ -переходов во всех трех технологических вариантах. Однако при выборе технологического варианта следует учитывать, что 1-й способ является наиболее простым, содержит наименьшее число операций и обеспечивает максимальный процент сращенных диодных структур при наименьшей однородности по высоте профилированного слоя. Данный вариант может быть эффективно использован в случае, когда не требуется высокая однородность параметров. Для задач с высокими требованиями к однородности профилированного слоя рекомендуется использовать 2-й технологический вариант, в то время как 3-й вариант может найти свое применение лишь для решения узкого круга задач, предусматривающих полное заполнение объема внутри сращенной структуры слоем  $\text{SiO}_2$ .

## Список литературы

- [1] J.B. Lasky. Appl. Phys. Lett., **48**, 78 (1986).
- [2] M. Shimbo, K. Furukawa, K. Fukuda, K. Tanzava. J. Appl. Phys., **50**, 2987 (1986).
- [3] S. Bengtsson. J. Electron. Mater., **21**, 841 (1992).
- [4] H. Gotoi. J. de Phys., **49**, 4 (1988).
- [5] B. Mazhari, S. Cristoloveanu, D.E. Ioannou, A.L. Caviglia. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-38**, 1289 (1991).
- [6] K. Watanabe, T. Hashimoto, M. Yoshida, M. Usami, Y. Sakai, T. Ikeda. Ext. Abstr. Electrochem. Soc. Fall Mtg. (1991) 91-2, p. 774.
- [7] A.L. Caviglia, R.C. Potter, L.J. West. IEEE Electron. Dev. Lett., **EDL-12**, 26 (1991).
- [8] R. Wilson, H.S. Gamble, S.J.N. Mitchell. Ext. Abstr. Electrochem. Soc. Fall Mtg. (1991) 91-2, p. 742.
- [9] В.М. Волле, В.Б. Воронков, И.В. Грехов, В.А. Козлов. Письма ЖТФ, **16**, 6 (1990).
- [10] I. Rhee, F.M. Casparini, A. Petrou, D.J. Bishop. Rev. Sci. Instrum., **61**, 1528 (1990).
- [11] K. Tsuruta, M. Katada, S. Fujino, T. Hattori. IEICE Trans. Electron. (1992) E75-C, p. 1459.
- [12] Н.А. Брюхно, Е.М. Жарковский, Ю.А. Концевой, Ю.Г. Сахаров. Обзоры по электрон. техн. Сер. 3. Микроэлектроника, **4** (1987).
- [13] К.Ф. Берковская, Н.В. Кириллова, Б.Г. Подласкин, В.М. Столовичкий, Н.А. Токранова. В сб.: Научно-технические достижения (М., ВИМИ, 1992) вып. 2, с. 22.
- [14] I.V. Grekhov, V.A. Kozlov, V.M. Volle, V.B. Voronkov. Best of Soviet Semicond. Phys. and Technol. 1989-1990, ed. by M. Levinstein and M. Shur (World Scientific, 1995) p. 597.

- [15] К. Сангвал. *Травление кристаллов. Теория, эксперимент, применение* (М., Мир, 1990) гл. 11, с. 426.
- [16] G.I. Kuhn, C.J. Rhee. *J. Electrochem. Soc.*, **120**, 1563 (1973).
- [17] Е.Г. Гук, А.В. Ельцов, В.Б. Шуман, Т.А. Юре. *Фоторезисты — диффузаны в полупроводниковой технологии* (Л., Наука, 1984) с. 76.
- [18] В.Б. Воронков, Е.Г. Гук, В.А. Козлов, В.Б. Шуман. *Письма ЖТФ*, **24**, 1 (1998).
- [19] V.A. Kozlov, V.K. Eremin, I.L. Shulpina, V.B. Voronkov, A.M. Ivanov, V.V. Eliseyev, V.V. Chibirkin. In: *High Purity Silicon IV*, ed. by C.L. Claeys, P.Rai-Choudhury, P. Stallhofer, J.E. Maurits [*The Electrochem. Soc. Ser.* (Pennington, 1996) v. PV 96-13, p. 369].
- [20] R.D. Black, S.D. Arthur, R.S. Gilmore et al. *J. Appl. Phys.*, **63**, 2773 (1988).
- [21] Б.Г. Подласкин, Е.П. Романова, В.С. Юферев. *ЖТФ*, **62**, 126 (1992).
- [22] В.Ф. Золотарев. *Безвакуумные аналоги телевизионных трубок* (М., Энергия, 1972).

Редактор Л.В. Шаронова

### **Creation of individual $p-n$ junctions spaced by an insulating layer by using direct wafer bonding**

E.G. Guk, B.G. Podlaskin, N.A. Tokranova,  
V.B. Voronkov, V.A. Kozlov

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** Based on direct wafer bonding three technological methods of producing single  $p-n$  junctions spaced by an insulating layer have been developed. The forward and reverse current-voltage characteristics of the diodes have been investigated. The forward current-voltage characteristic differential resistance of single  $p-n$  junctions was equal to  $0.01 \Omega$ , the breakdown voltage 400 V and the aperture width of two mutually opposite diodes 0.22 V for all technological methods. All these data and high integral photosensitivity evidence in favour of the  $p-n$  interface being free from the silicon dioxide barrier, which is attesting a high bonding quality.