

## КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ИНТЕРФЕЙСА МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ПРИ ПРЯМОМ СРАЩИВАНИИ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН

Воронков В. Б., Грехов И. В., Козлов В. А.

С помощью лазерного сканирующего микроскопа проведено исследование интерфейса полупроводниковых структур, сформированных методом прямого сращивания зеркально полированных кремниевых пластин. Показано, что измерение величины оптического пропускания структур при зондировании светом с  $\lambda = 1.15$  мкм обеспечивает неразрушающий контроль однородности сращивания и выявление дефектных областей интерфейса. Наличие потенциального барьера на интерфейсе структур может быть выявлено путем регистрации наведенной фотоэдс в режиме сканирования границы сращивания светом с  $\lambda = 0.63$  мкм.

Использование лазерного сканирующего микроскопа для контроля качества структур и корректировки технологического процесса прямого сращивания кремния (ПСК) позволило изготовить методом ПСК высоковольтные  $p^+ - n - n^+$ -структуры, характеристики которых не отличались от характеристик контрольных структур, изготовленных традиционными технологическими методами.

В работах [1, 2] впервые сообщалось о формировании многослойных кремниевых структур путем сращивания неокисленных зеркально полированных поверхностей пластин кремния. Изготовленные методом прямого сращивания кремния (ПСК)  $p - n$ -переходы имели хорошие электрические характеристики как в проводящем, так и блокирующем направлениях.

Механизм образования и эволюции связей между сращиваемыми поверхностями неокисленных пластин в процессе ПСК был аналогичен ранее описанному в [3, 4] механизму сращивания окисленных кремниевых пластин при формировании структур «кремний на диэлектрике». Наиболее детально модель этих процессов рассмотрена в [5]. Согласно этой модели, на первой стадии процесса между предварительно гидрофилизованными и соединенными поверхностями пластин находятся слои молекул воды, адсорбированных на силанольных группах  $\text{Si}-\text{OH}$ . Соединение пластин на этой стадии происходит при комнатной температуре за счет образования водородных связей между молекулами воды на противоположных поверхностях:  $[\text{Si}-\text{OH} : (\text{H}_2\text{O})_2 : (\text{H}_2\text{O})_2 : \text{OH}-\text{Si}]$ . Затем при постепенном нагреве пластин происходит изменение структуры связей: сперва водородные связи между молекулами  $\text{H}_2\text{O}$  заменяются на водородные связи между силанольными группами  $[\text{Si}-\text{OH} : (\text{H}_2\text{O})_2 : (\text{H}_2\text{O})_2 - \text{OH}-\text{Si} \xrightarrow{\tau} \rightarrow \text{Si}-\text{OH} : \text{OH}-\text{Si} + 4\text{H}_2\text{O}]$ , а затем при высоких температурах водородные связи заменяются более сильными кислородными  $(\text{Si}-\text{OH} : \text{OH}-\text{Si} \xrightarrow{\tau} \rightarrow \text{Si}-\text{O}-\text{Si} + \text{H}_2\text{O})$ . Заключительный этап процесса ПСК состоит в «растворении» кислорода на интерфейсе и образовании прямых ковалентных связей между атомами кремния  $(\text{Si}-\text{O}-\text{Si} \rightarrow \text{Si}-\text{Si} + \text{O})$  сращиваемых поверхностей.

Достаточно очевидно, что метод ПСК открывает принципиально новые возможности конструирования и изготовления полупроводниковых структур

<sup>1</sup> В англоязычной литературе метод ПСК получил название «silicon to silicon direct bonding (SDB) method».

на кремнии. Однако для его использования на практике необходима обработка технологических методов, обеспечивающих при сращивании пластин минимальный уровень дефектов и однородность интерфейса. В связи с этим важной задачей является разработка методов контроля качества интерфейса ПСК структур на различных стадиях их изготовления.

В данной работе изложены результаты исследования однородности и дефектности ПСК структур, выполненные методом лазерного сканирования в режимах регистрации интенсивности проходящего через структуры излучения и измерения амплитуды наведенной фотоэдс на барьере интерфейса. На рис. 1 приведена блок-схема использованного для исследований ПСК структур лазерного сканирующего микроскопа (JCSM), описание работы которого было дано в [6].

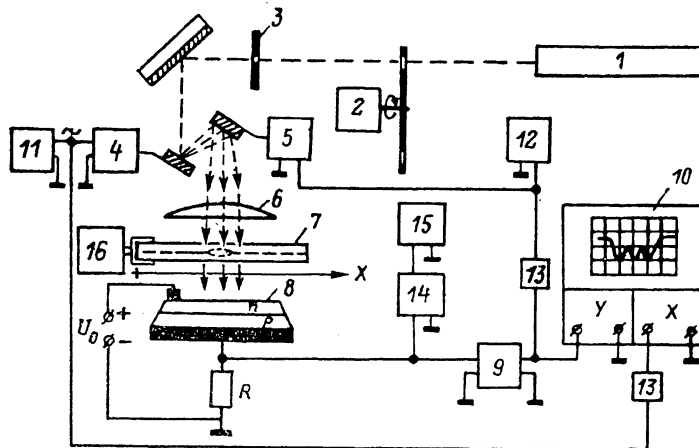


Рис. 1. Блок-схема установки лазерного сканирующего микроскопа для исследования ПСК структур.

1 — лазер ( $\lambda_1=0.63$ ,  $\lambda_2=1.15$ ,  $\lambda_3=3.39$  мкм), 2 — модулятор интенсивности зондирующего излучения, 3 — диафрагма, 4 и 5 — электромеханические вибраторы строчной и кадровой разверток светового луча соответственно, 6 — оптическая фокусирующая система, 7 — исследуемая ПСК структура, 8 — фотоприемник (кремниевый  $p-n$ -переход), 9 — широкополосный усилитель, 10 — контрольно-измерительный осциллограф, 11 и 12 — генераторы напряжения строчной и кадровой разверток соответственно, 13 — устройство сопряжения, 14 — синхронный детектор, 15 — двухкоординатный самописец.

Исследуемые образцы представляли собой соединенные методом ПСК промышленные зеркально полированные с двух сторон пластины кремния диаметром 40—60 мм и толщиной 250—480 мкм; использовался кремний  $p$ - и  $n$ -типа проводимости, выращенный в направлении  $\langle 111 \rangle$  методами бестигельной зонной плавки и Чохральского.

Перед соединением пластины очищались от возможных загрязнений поверхности с использованием стандартных обработок в кислотно-перекисных растворах и органических растворителях с промежуточными промывками в деионизованной воде. Гидрофилизация осуществлялась путем обработки в аммиачно-перекисном водном растворе [7] при температуре  $\sim 60^\circ\text{C}$  в течение нескольких минут. После финишной промывки в  $\text{H}_2\text{O}$  и сушки на центрифуге пластины складывались попарно полированными поверхностями в обеспыленной воздушной среде. Следует отметить, что гидрофилизация в растворе  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , предложенная в [2] и использованная нами ранее [8], не применялась из-за сложности полного удаления соединений серы, которая диффундирует в объем сращиваемых пластин при термообработке и приводит к изменению удельного сопротивления высокоомных кристаллов [9]. Высокотемпературная термообработка соединенных пластин проводилась на воздухе при  $T=1100^\circ\text{C}$  в течение 3—5 ч.

Известно [2, 7, 10, 11], что одним из наиболее распространенных дефектов структур, изготовленных методом ПСК, являются «пузыри» — участки площади интерфейса, где не произошло сращивание пластин и между их поверхностями имеется оптический зазор. Нами было проведено исследование возможности выявления таких областей, определения топографии их распределения по площади и измерения геометрических размеров методом светового сканирования.

В первом приближении (без учета интерференции и многократных отражений) коэффициент оптического пропускания  $T$  пластины толщиной  $d$  для света с длиной волны  $\lambda$  может быть записан как

$$T = \frac{I_1}{I_0} = \frac{(1 - R)^2 \exp(-kd)}{1 - R^2 \exp(-2kd)},$$

где  $I_1$  — интенсивность прошедшего через пластину излучения,  $I_0$  — интенсивность падающего излучения,  $R$  — коэффициент отражения света с данной длиной волны,  $k$  — коэффициент поглощения света в кристалле. Для высокочастотных тонких пластин кремния (с малым поглощением света на свободных

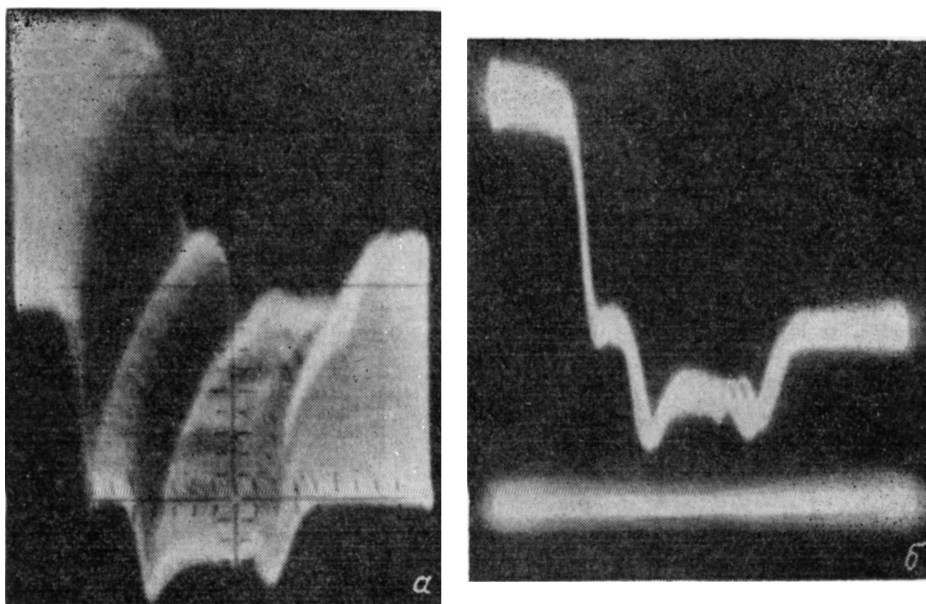


Рис. 2. Картина оптического пропускания краевой области ПСК структуры в режиме сканирования растром  $10 \times 20$  мм (а) и в режиме линейного сканирования в пределах 10 мм (б) ( $\lambda = 1.15$  мкм).

носителях) и при длине волны зондирующего излучения  $\lambda_2 = 1.15$  мкм поглощением света в пластине можно пренебречь ( $e^{-kd} \approx 1$ ). Тогда

$$T = \frac{1 - R}{1 + R} = \frac{2n}{n^2 + 1},$$

где  $n$  — показатель преломления кремния ( $n \approx 3, 4$ ).

Для участков площади, в которых произошло сращивание поверхностей пластин, величина локального коэффициента оптического пропускания света с  $\lambda_2$  должна быть близкой к  $T \sim 0.54$ . В то же время в области пузыря наличие дополнительных отражающих поверхностей в зазоре, заполненном средой с  $n \sim 1$ , должно снижать величину  $T$  до значения  $\sim 0.3$ . Таким образом, области пузырей на интерфейсе могут быть зарегистрированы в проходящем через образец свете по снижению коэффициента оптического пропускания.

Измерения, проведенные на пластинах кремния  $n$ -типа проводимости с  $\rho_n \sim 5$  Ом·см и толщиной  $\sim 480$  мкм, а также на ПСК структурах из этих пластин, подтвердили изложенные выше представления. Средняя величина оптического пропускания для пластин кремния составляла  $\sim 0.51$ , а при зондировании двух пластин, отстоящих на некотором расстоянии друг от друга, была  $\sim 0.27$ . Для двух пластин, сращенных методом ПСК, величина  $T$  имела среднее значение  $\sim 0.45$  в областях полного сращивания и  $\sim 0.25$  в области пузырей.

На рис. 2—4 приведены снимки различных участков площади сращенных при  $T = 1100$  °С пластин  $n$ -Si, полученные в проходящем свете с  $\lambda_2 = 1.15$  мкм.

Рис. 2 показывает типичную картину оптического пропускания краевой области ПСК структуры в месте, где края пластин сдвинуты друг относительно друга на расстояние  $\sim 1$  мм. При движении зондирующего луча из крайней правой точки развертки влево он сперва «просвечивает» только одну пластину, что соответствует первой «ступеньке» снижения регистрируемого фотоприемником сигнала (рис. 2, б, уровень нулевого оптического пропускания соответствует положению нижнего луча осциллографа). Затем луч попадает в область двух не сращенных по краю пластин, где наблюдается вторая ступенька снижения оптического пропускания. В месте, где зондирующий луч достигает области сращения, оптическое пропускание возрастает практически до уровня пропускания единичной пластины.

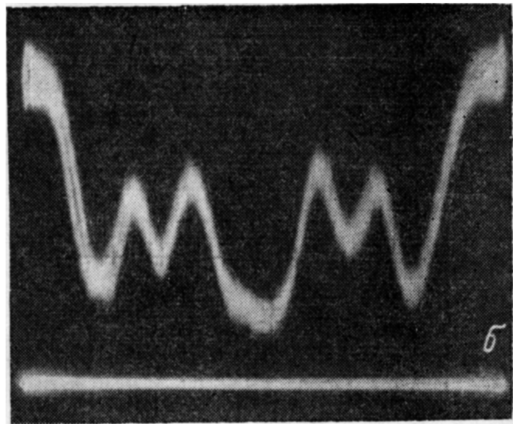
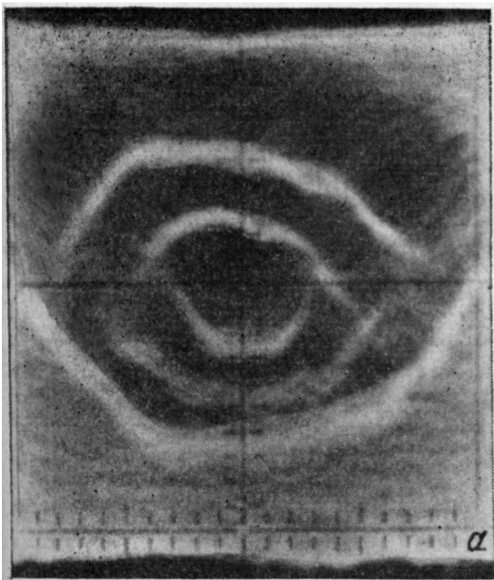


Рис. 3. Картина оптического пропускания ПСК структуры в области «пузыря» ( $\lambda = 1.15$  мкм). а — в режиме сканирования растром  $5 \times 6$  мм, б — в режиме линейного сканирования в пределах 5 мм через центр пузыря (уровень нулевого сигнала оптического пропускания соответствует положению нижнего луча).

Снимки, представленные на рис. 3, 4, соответствуют картинам оптического пропускания образцов с плохим качеством интерфейса. На снимках отчетливо видны области пузырей, имеющие, как правило, границы в форме круга с диаметром от долей миллиметра до сантиметра. Наличие оптического зазора переменной толщины  $h$  между поверхностями в области пузырей приводит к появлению чередующихся максимумов и минимумов локального оптического пропускания (рис. 3, б) вблизи среднего значения  $T \sim 0.25$  в результате интерференции лучей в зазоре. Интерференционная картина, наблюдаемая при этом в растровом режиме сканирования области пузыря, имеет вид концентрических интерференционных колец равной толщины (рис. 3, а) для пузырей круглой формы с величиной  $h_{\max}$  в центре пузыря более 0.5 мкм либо более сложную структуру (рис. 4, б) для пузырей неправильной формы с большими линейными размерами. При этом толщина зазора  $h$  в пределах отдельных интерференционных полос равной толщины остается постоянной.

Используя условие для возникновения минимумов оптического пропускания в приближении двухлучевой интерференции

$$\Delta = 2h \cos \alpha = (2m + 1)\lambda/2,$$

где  $\Delta$  — оптическая разность хода интерферирующих лучей,  $\alpha$  — угол преломления ( $\cos \alpha \approx 1$ ),  $m = 0, 1, 2, 3 \dots$ , можно оценить изменение  $h$  в области пузыря. Так, считая значение абсолютного показателя преломления среды в зазоре

$\sim 1$ , можно определить, что  $h_{\max}$  для пузыря на рис. 3 находится в центре и составляет  $\sim 1.45$  мкм. Для наименьшего пузыря на рис. 4, а это значение не пре-

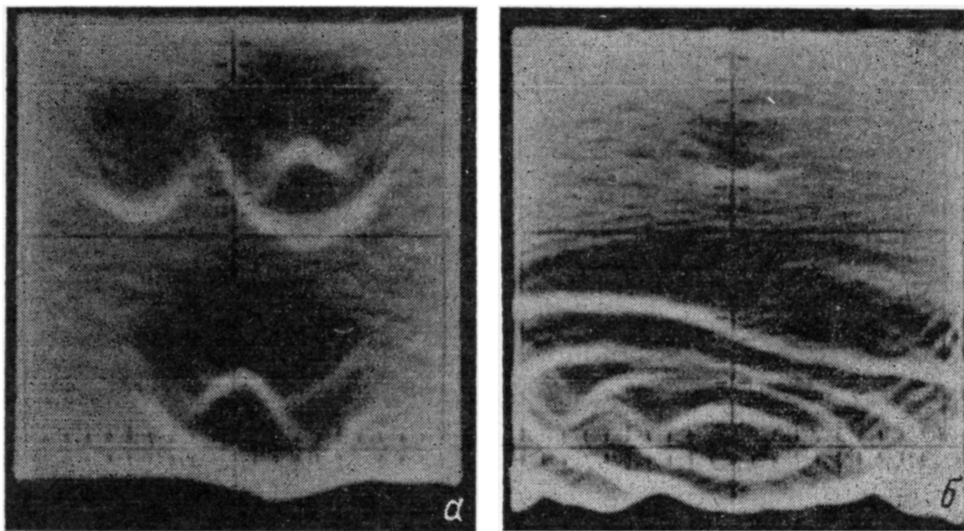


Рис. 4. Различные участки площади ПСК интерфейса плохого качества.

а — группа из трех круглых пузырей различных размеров, наблюдаемая в проходящем свете при сканировании растром  $5 \times 5$  мм, б — изображение пузыря неправильной формы, полученное в проходящем свете при сканировании растром  $10 \times 20$  мм.

вышает 0.3 мкм. Максимальные значения  $h$  наблюдались для пузырей с большими линейными размерами ( $\sim 1$  см) и доходили до 6—8 мкм.

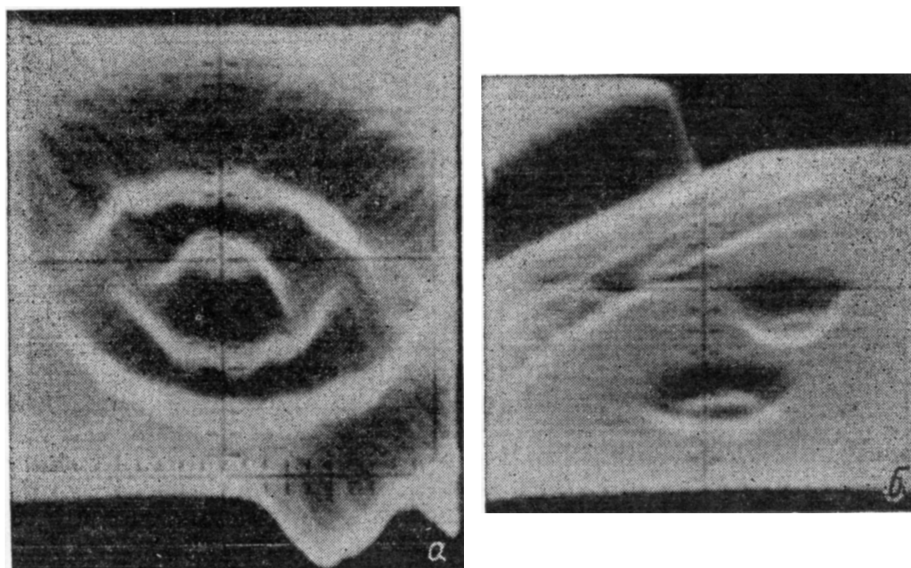


Рис. 5. Вид областей интерфейса с пузырями, образованными при соединении пластин до проведения высокотемпературной термической обработки ( $\lambda = 1.15$  мкм).

а — сканирование световым растром  $5 \times 6$ , б — сканирование световым растром  $10 \times 20$  мм.

Исследования в оптическом и электронном микроскопах торцов ПСК структур, разрезанных через центр пузыря, подтвердили наличие в этих областях оптического зазора переменной толщины. После разреза величина  $h$  в этих местах практически не изменялась (вид интерференционной картины сохранялся).

Это свидетельствует о произошедшей при сращивании пластической деформации пластин во время термообработки. Такая деформация приводит обычно к введению дислокаций и других структурных дефектов, способных отрицательно влиять на электрические характеристики. Однако вопрос о влиянии пузырей на характеристики приборов требует проведения специальных исследований.

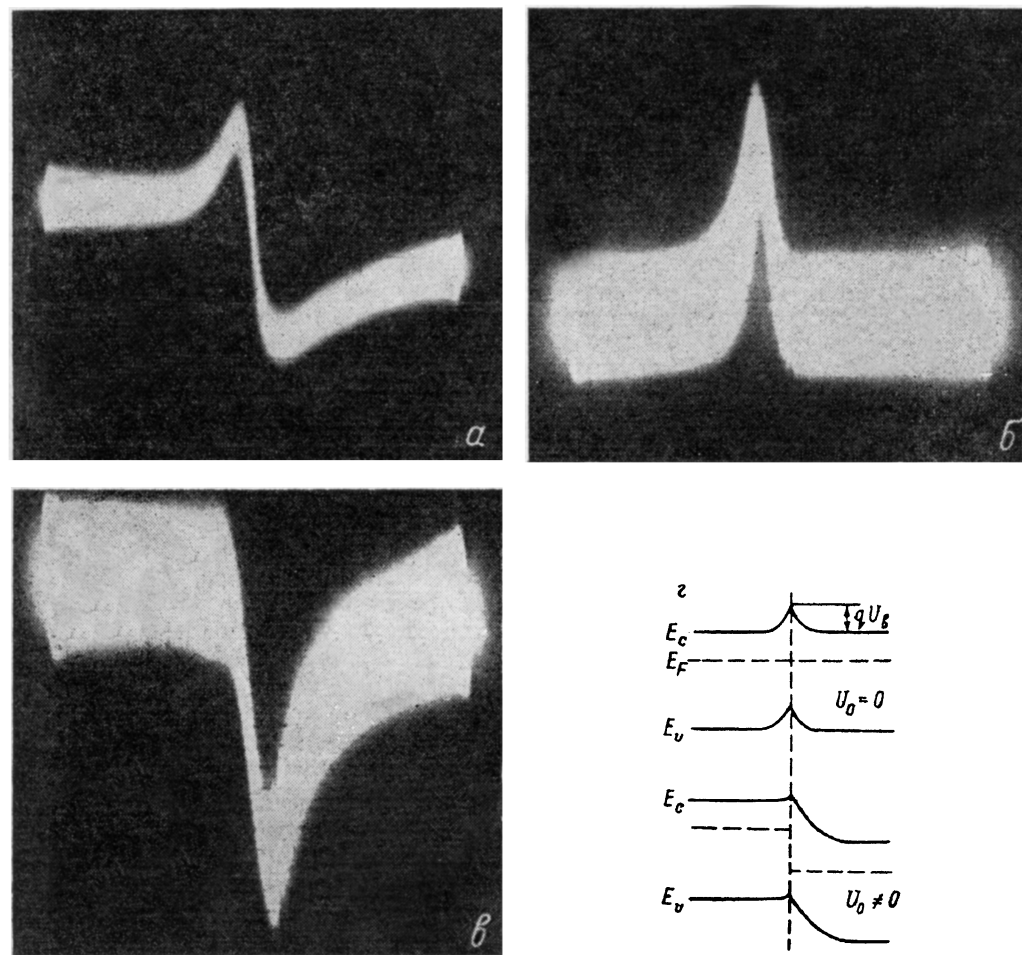


Рис. 6. Сигнал наведенного световым зондом фототока в области потенциального барьера интерфейса при линейном сканировании косога шлифа ПСК структуры в пределах 400 мкм.  $U_0$ , В: а — 0, б — +10, в — -10; z — схематический вид потенциального барьера интерфейса при  $U_0=0$ .

Анализ оптического пропускания соединенных пластин кремния до высокотемпературной термообработки показал, что образование пузырей происходит уже на стадии соединения гидрофилизированных пластин при комнатной температуре (рис. 5); последующая термообработка не приводила в наших условиях к их полному исчезновению. Такая ситуация объясняется, по-видимому, наличием в пузырях частичек пыли и воздушной атмосферы, мешающих полному «схлопыванию» при термообработке [11]. Предложенный в [11] метод устранения пузырей путем приложения внешнего давления на поверхность пластин во время высокотемпературной термообработки представляется нам не лишенным недостатков, так как может приводить к появлению механических напряжений и пластической деформации в областях пузырей. При изготовлении ПСК структур для целей полупроводниковой электроники более перспективным, по-видимому, является устранение пузырей на стадии соединения пластин до термообработки.

Электрические характеристики структур, изготовленных методом ПСК, в значительной степени зависят от наличия потенциального барьера в области интерфейса, влияющего на перенос носителей заряда в структуре. В работе [12] было показано, что такой барьер может возникать при высокой плотности заряженных поверхностных состояний на интерфейсе. Наличие потенциального барьера будет приводить к разделению неравновесных носителей заряда, генерированных при освещении структуры зондирующим световым лучом. Поэтому в случае использования в качестве фотоприемника самой ПСК структуры имеется возможность исследования свойств потенциального барьера на интерфейсе.

Для таких экспериментов были подготовлены образцы, представляющие собой сращенные пластины  $n$ -Si с  $\rho_n \approx 5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  с омическими контактами. Область соединения была выведена на поверхность косого шлифа, снятого под углом  $10^\circ$ . Подготовленные образцы устанавливались в держателе фотоприемника (вместо использованного в предыдущих экспериментах кремниевого фотодиода) и подключались в измерительную цепь с сопротивлением  $R_n$ , с которого снимался регистрируемый сигнал. Сканирование поверхности косого шлифа проводилось световым лучом диаметром  $\sim 25 \text{ мкм}$  с  $\lambda_1 = 0.63 \text{ мкм}$ .

На рис. 6, а приведена зависимость изменения фототока через образец при прохождении световым лучом по поверхности косого шлифа в режиме строчной развертки. В области интерфейса световой поток индуцирует фотоэдс (на потенциальном барьере), приводящую к протеканию тока через  $R_n$ . Как видно из рисунка, наведенный фототок меняет направление при переходе светового луча через плоскость сращивания пластин; такая ситуация соответствует потенциальному барьеру на интерфейсе, схематически показанному на рис. 6, з. Величина сигнала фотоэдс вдоль границы интерфейса, как правило, неоднородна, что свидетельствует о неоднородной плотности поверхностного заряда интерфейса и, возможно, о локальных утечках сквозь интерфейс. Измерения распределения потенциала между контактами на косом шлифе методом потенциального зонда [13] (при пропускании тока через структуру) также показали наличие скачка потенциала в области выхода плоскости сращивания на поверхность косого шлифа. При этом полное электрическое сопротивление образцов было заметно больше расчетного значения, определенного исходя из толщины пластин и величины  $\rho_n$ .

Следует также отметить, что приложение внешнего смещения к структурам изменяло вид наблюдаемой картинки: с увеличением напряжения смещения до значения  $\sim 10 \text{ В}$  пик фотоэдс одной из полярностей на интерфейсе уменьшался практически до нулевого уровня, тогда как фотоэдс другой полярности возрастала (рис. 6, б). При изменении полярности напряжения смещения на противоположную наблюдалась аналогичная картина. Однако в этом случае уменьшался уже пик фотоэдс противоположной полярности (рис. 6, в). Величина наведенной фотоэдс в области интерфейса исследованных образцов ПСК структур из  $n$ -Si с  $\rho_n = 5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  составляла  $\sim 10 \text{ мВ}$  (при  $U_0 = 0$ ) и примерно соответствовала порядку величины потенциального барьера на интерфейсе  $U_b$ . В случае сращивания пластин с  $\rho = 0.1 - 0.005 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  в пределах чувствительности установки потенциального барьера на интерфейсе не наблюдалось.

Полученные на ИСМ результаты подтверждают справедливость изложенных в [12] представлений о влиянии уровня легирования пластин Si и приложенного к ПСК структурам напряжения на высоту потенциального барьера интерфейса, обусловленного поверхностными зарядами в плоскости сращивания.

Рассмотренные методы контроля ПСК структур были использованы для отработки технологических режимов формирования  $p^+ - n$ -переходов. На стадии гидрофиллизации и соединения пластин до проведения высокотемпературной термообработки был использован специально разработанный метод, который обеспечивал отсутствие пылинок и пузырей между соединяемыми поверхностями при проведении всех операций до соединения.

Для примера на рис. 7 приведены прямые вольт-амперные характеристики (ВАХ) ПСК диода (кривая 1) и контрольного диода (кривая 2).  $p^+$ -Эмиттером структур, изготовленных методом ПСК, являлась пластина  $p$ -Si с  $\rho_p = 0.005 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  и толщиной  $380 \text{ мкм}$ , сращенная с пластиной  $n$ -типа толщиной  $450 \text{ мкм}$  с  $\rho_n \approx 200 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  (базовый слой). После формирования методом ПСК

$p$ - $n$ -перехода диффузией фосфора в  $n$ -пластине создавался  $n^+$ -слой. Исследование косых шлифов ПСК диодов методом светового сканирования и потенциального зонда показало отсутствие потенциального барьера на интерфейсе. При этом  $p$ - $n$ -переход после операции сращивания оказался сдвинутым за счет диффузии от интерфейса на глубину  $\sim 2.2$ , а после образования  $n^+$ -слоя — на 16 мкм. Электрофизические и геометрические параметры контрольных диффузионных диодов были идентичны параметрам ПСК структур, за исключением характеристик  $p^+$ -эмиттера. В контрольных диодах он создавался диффузией бора на глубину  $\sim 50$  мкм, поверхностная концентрация бора составила  $\sim 3 \cdot 10^{20}$  см $^{-3}$ . Время жизни дырок в  $n$ -базе всех структур (ПСК и диффузионных) было примерно равным и имело значение 15–20 нс.

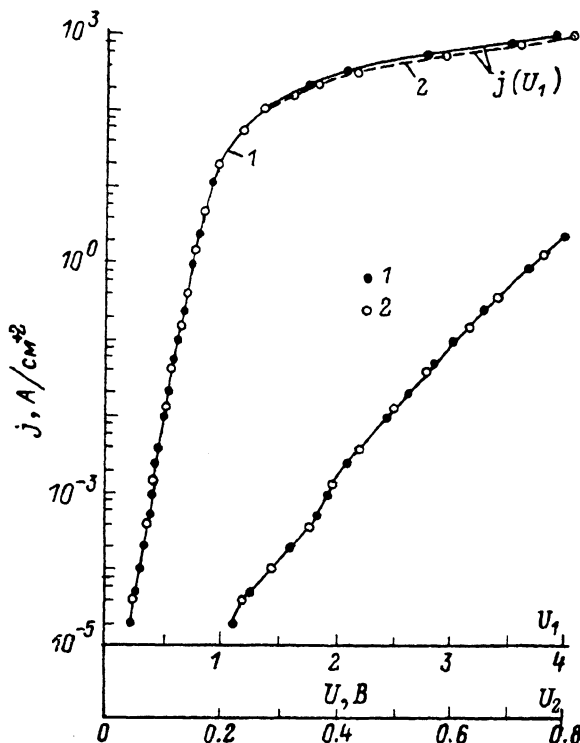


Рис. 7. Прямые вольт-амперные характеристики ПСК диодов (1) и контрольных диффузионных диодов (2).

Из рис. 7 видно, что прямые ВАХ диодов обоих типов практически полностью идентичны. В диапазоне плотностей тока  $10^{-5} < j < 10^{-1}$  А/см $^2$  они хорошо описываются зависимостью  $j \sim \exp(qU/mkT)$ , где  $m=2$  при  $4 \cdot 10^{-5} < j < 4 \cdot 10^{-4}$  (рекомбинационный участок ВАХ),  $m \sim 1.5$  при  $4 \cdot 10^{-4} < j < 2 \cdot 10^{-3}$  (начало инжекции) и  $m=2$  при  $3 \cdot 10^{-3} < j < 10^{-1}$  А/см $^2$  (высокий уровень инжекции в  $n$ -базе). При  $j > 10^{-1}$  А/см $^2$  происходит хорошо известная линейаризация ВАХ, определяемая рядом нелинейных эффектов, возникающих при большой концентрации электронно-дырочной плазмы в  $n$ -базе: электронно-дырочным рассеиванием, падением коэффициента инжекции  $p$ - $n$ -переходов и при очень больших  $j$  оже-рекомбинацией. Идентичность ВАХ диффузионных и ПСК диодов подтверждает тот факт, что барьер на ПСК интерфейсе исследованных диодов пренебрежимо мал (в сравнении с барьером  $p$ - $n$ -перехода) и практически не оказывает влияния на прохождение носителей через интерфейс.

Обратные ВАХ ПСК диодов имели вид, обычный для кремниевых высоковольтных  $p$ - $n$ -переходов. Зависимости обратного тока от температуры и величины обратного смещения были качественно одинаковы для структур обоих типов. При этом значение обратного тока  $I_r$  при  $T=125$  °С не превышало 10 мА при величинах смещения  $U_r < 3.5$  кВ и площади  $p$ - $n$ -переходов  $\sim 2$  см $^2$ . Ис-



следование характера пробой методом лазерного сканирования [6, 14, 15] и распределения напряженности электрического поля в области краевого контура  $p^+ - n - n^+$ -диодов методом потенциального зонда [13] показало, что пробой происходил по поверхности. При напряжениях  $U_r > 2$  кВ область объемного заряда  $p - n$ -перехода на поверхности краевого контура достигла границы  $n^+ - n$ -перехода, где с дальнейшим ростом  $U_r$  и наблюдался пробой структур из-за развития ударной ионизации в сильном электрическом поле, максимум напряженности которого был локализован в области  $n^+ - n$ -перехода [16]. Краевой контур  $p^+ - n - n^+$ -диодов был выполнен с положительным углом фаски  $\sim 30^\circ$ .

Таким образом, метод лазерного сканирования является информативным неразрушающим методом экспресс-контроля интерфейса при прямом сращивании кремниевых пластин, позволяющим оперативно получать информацию как о ряде физических процессов на интерфейсе, так и о влиянии на качество сращивания различных изменений в технологическом процессе; диоды, полученные методом ПСК, при достаточно хорошем уровне технологии имеют электрические характеристики, соответствующие расчетным и не уступающие характеристикам приборов, полученных традиционными методами.

#### Список литературы

- [1] Furukawa K., Shimbo M., Fukuda K., Tanzawa K. // Extended Abstract of XVIII Intern. Conf. on Sol. St. Dev. and Mat. Tokyo, 1986. P. 533—536.
- [2] Shimbo M., Furukawa K., Fukuda K., Tanzawa K. // J. Appl. Phys. 1986. V. 60. N 8. P. 2987—2989.
- [3] Lasky J. B., Stiffer S. R., White F. R., Abernathy J. R. // Proc. Intern. El. Dev. Meeting. Washington D. C. 1985. (IEEE, N. Y., 1985). P. 684—687.
- [4] Lasky J. B. // Appl. Phys. Lett. 1986. V. 48 (1). P. 78—80.
- [5] Stengl K., Tan T., Gosele U. // Japan. J. Appl. Phys. 1989. V. 28. N 10. P. 1735—1741.
- [6] Волле В. М., Воронков В. Б., Грехов И. В., Коробков Н. И. // ФТП. 1979. Т. 13. В. 4. С. 701—706.
- [7] Stengl K., Ahn K. Y., Gosele U. // Japan. J. Appl. Phys. 1988. V. 27. N 12. P. L2364—L2366.
- [8] Волле В. М., Воронков В. Б., Грехов И. В., Козлов В. А. // Письма ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 18. С. 59—63.
- [9] Астрова Е. В., Воронков В. Б., Грехов И. В., Козлов В. А., Лебедев А. А. // Письма ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 4. С. 1—4.
- [10] Haisma J., Spierings G. A. G. M., Biermann U. K. P., Pals J. A. // Japan. J. Appl. Phys. 1989. V. 28. N 8. P. 1426—1443.
- [11] Black R. D., Arthur S. D., Gilmore R. S., Lewis N., Hall E. L., Lillquist R. D. // J. Appl. Phys. 1988. V. 63. N 8. P. 2773—2777.
- [12] Bengtsson S., Engstrom O. // J. Appl. Phys. 1989. V. 66. N 3. P. 1231—1239.
- [13] Волле В. М., Грехов И. В. // Электротехн. пром. Сер. Преобразовательная техника. 1972. В. 12. С. 5—8.
- [14] Волле В. М., Грехов И. В., Колчин А. М. // Радиотехн. и электрон. 1973. Т. 18. В. 3. С. 654—657.
- [15] Волле В. М., Воронков В. Б., Грехов И. В., Козлов В. А. // Автоматизированный электропривод, силовые полупроводниковые приборы, преобразовательная техника. М., 1983. С. 304—309.
- [16] Brieger K. P., Gerlach W., Pelka J. // IEEE. Trans. Electron. Dev. 1984. V. ED-31. N 6. P. 733—738.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Получена 18.05.1990  
Принята к печати 18.09.1990