

- [3] Епишин В.А., Заславский В.Я., Нефитный М.В. // Труды НИИТЛ АН СССР. 1986. с. 200-205.
- [4] Kolodziejczyk A. // Opt. Acta. 1985. V. 32. N 6. P. 741-746.
- [5] Смирнов А.П. // Опт. и спектр. 1987. Т. 62. В. 3. С. 636-643.
- [6] Сороко Л.М. Гильберт-оптика. М.: Наука, 1981. 159 с.
- [7] Городецкая В.И., Кособурд Т.П., Маркус Ф.А. В сб.: Всесоюз. конф. „Оптическое изображение и регистрирующие среды“, Тезисы докладов, Л. 1982, с. 78-79.
- [8] Arbuзов V.A., Poleshuk A.G., Fedorov V.A. // Opt. and Quant. Electron. 1977. V. 9. N 6. P. 455-458.

Харьковский государственный
университет им. А.М. Горького

Поступило в Редакцию
6 июня 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 18
Об.2; 12

26 сентября 1989 г.

ФОРМИРОВАНИЕ $p-n$ ПЕРЕХОДОВ МЕТОДОМ ПРЯМОГО СРАЩИВАНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН (ПСК)

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

На сегодняшний день технология формирования кремниевых структур с $p-n$ переходами располагает широким арсеналом сложнейших технологических процессов. Однако большинство из них может быть сведено к комбинациям нескольких базовых методов, которыми являются диффузия, эпитаксия, ионная имплантация. В научных публикациях последних лет сообщается о разработке еще одного нового технологического процесса [1-4], получившего в англоязычной литературе название *SDB*-метода (silicon to silicon direct bonding method), который может в ближайшее время по праву дополнить отмеченный ряд базовых способов формирования полупроводниковых структур на *Si*. Данный метод позволяет осуществить „низкотемпературное“ прямое сращивание кремниевых пластин и открывает широкие возможности конструирования и изготовления кремниевых приборов. Сведения об электрических характеристиках $p-n$ структур, изготовленных методом прямого сращивания кремния, и особенности технологического процесса представлены в имеющихся зарубежных публикациях весьма ограничено в связи с новизной метода, а отечественные публикации по этой тематике нам не известны. Учитывая важность данного метода для технологии производства кремниевых приборов, целью настоящей работы являлась раз-

работки технологических приемов, обеспечивающих прямое сращивание применяемых в полупроводниковом производстве СССР марок Si , и исследование характеристик полученных р-п структур.

В экспериментах по ПСК использовались промышленные зеркально полированные пластины Si , полученные методом Чохральского, с ориентацией (Ш) (марок КДБ и КЭФ), а также полированные в лабораторных условиях пластины бестигельного п- Si . Диаметр пластин составлял 40–60 мм, толщина 380 мкм. Технологический процесс ПСК включал три стадии: предварительная очистка поверхностей пластин, их гидрофилизация, соединение пластин и их термическая обработка (ТО).

Первая стадия включала обычные для полупроводникового производства операции очистки поверхностей в органических растворителях и смесях кислот. На второй стадии проводилось образование на очищенных поверхностях пластин свободных радикалов OH , для чего пластины подвергались обработкам в смесях $H_2SO_4 + H_2O_2$, HF , $H_2SO_4 + H_2O$ с промежуточными промывками в деионизованной воде и окончательной сушкой поверхностей в беспылевой атмосфере. Подготовленные таким образом пластины накладывались друг на друга попарно полированными поверхностями в обеспыленной воздушной среде и переносились на край кварцевой трубы, установленной в предварительно прогретую печь. После начального разогрева в течение 1–3 минут пластины передвигались в рабочую зону трубы, прогретую до $T = 1000–1100$ °С и проводилась их ТО в течение 1–10 часов в окисляющей атмосфере. При проведении ТО пластины располагались одна на другой горизонтально без приложения какой-либо дополнительной нагрузки на их поверхности. Охлаждение пластин после окончания ТО осуществлялось в режиме „выключенной печи“.

После окончания процесса ПСК пластины разрезались на квадраты с шагом реза 5–15 мм. Качество сращивания пластин контролировалось путем приложения сдвигающих и разрывающих нагрузок к вырезанным из различных участков площади пластин образцам, а также методом исследования косых шлифов до и после травления в HF , $HF + HNO_3$. Установлено, что в периферийной части площади пластин, отстоящей от края на расстояние до 10 мм, сращивание поверхностей не происходит, что объясняется, по-видимому, нарушением плоскопараллельности зеркальных поверхностей пластин в этих областях. Исследование вырезанных из центральной части образцов показало наличие на границе соединенных поверхностей тонкого окисного слоя, что соответствует данным работ [3–4]. Детальное исследование однородности, толщины и плотности данного окисного слоя не входило в задачи работы, однако следует отметить, что толщина окисного слоя увеличивалась от центра пластины к ее краям и возрастала с увеличением длительности ТО.

Для исследования электрических характеристик полученных структур вырезанные образцы проходили операции формирования омических контактов из Al и Ni на соответствующих поверхностях образцов. На рис. 1 представлены типичные вольт-амперные харак-

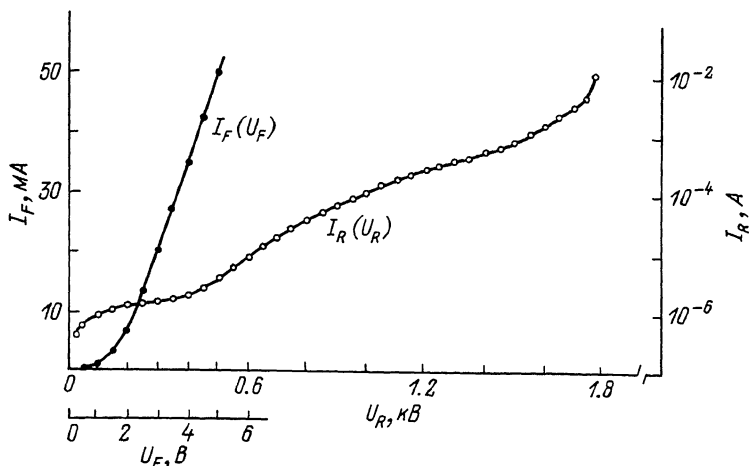


Рис. 1. Прямая $I_F(U_F)$ и обратная $I_R(U_R)$ ветви ВАХ р-п перехода, сформированного методом ПСК. Площадь р-п перехода - 1 см^2 , толщина р и п слоев - 380 мкм , удельное сопротивление слоев: $\rho_p \sim 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, $\rho_n \sim 350 \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

теристики (ВАХ) структур, изготовленных методом ПСК из пластин р-Si марки КДБ-10 и п-Si марки БЕ₃ диаметром 45 мм. Общая площадь соединения пластин составила $\sim 10 \text{ см}^2$, площадь каждого из подготовленных для измерений образцов - 1 см^2 . Значение удельного сопротивления для р-Si имело величину $10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, а для п-Si - $350\text{--}400 \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

Обратная ветвь ВАХ р-п структур, изготовленных методом ПСК, была практически одинаковой с характеристикой обычного диффузионного диода с соответствующими электрофизическими и геометрическими параметрами слоев. Начиная с напряжения обратного смещения $U_R > 400 \text{ В}$ зависимость $I_R(U_R)$ заметно отклонялась от вида $I_R \sim U_R^{1/2}$, обусловленного объемной составляющей тока, вследствие быстрого роста с напряжением вклада поверхностной утечки. Такой характер изменения поверхностной утечки типичен для структур с „тонкой“ слабелегированной базой, когда, начиная с некоторых значений U_R , примерно соответствующих смыканию границы слоя объемного заряда на поверхности фаски с плоскостью контакта, величина тока быстро увеличивается с повышением U_R вследствие ударной ионизации кремния в быстрорастущем электрическом поле на поверхности фаски вблизи контакта. Проведенные численные оценки и исследование эффекта „смыкания“ с помощью методики лазерного сканирующего микроскопа [5] подтвердили справедливость данного механизма формирования обратной ветви ВАХ исследованных структур. Монотонное увеличение I_R наблюдалось при этом до значений $U_R \sim 1.8 \text{ кВ}$, при которых на ВАХ

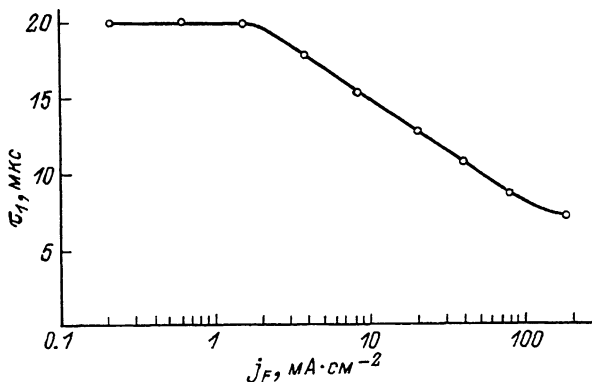


Рис. 2. Зависимость длительности фазы высокой обратной проводимости τ_1 от плотности тока j_F прямосмещенного р-п перехода для случая $j_F/j_R = 2$ (j_R - плотность тока в фазе высокой обратной проводимости).

имел место излом, связанный с развитием лавинного пробоя на поверхности краевого контура вблизи контакта со стороны п-базы (положительная фаска под углом 20°).

Прямая ветвь ВАХ р-п структур $I_F(U_F)$ существенно отличалась от аналогичных характеристик диффузионных р-п переходов. При напряжениях прямого смещения $U_F > 3$ В зависимость $I_F(U_F)$ практически линейна с типичным значением дифференциального сопротивления $R = dU_F/dI_F \sim 50$ Ом для структур площадью 1 см^2 . Такой вид прямой ВАХ может объясняться наличием на границе соединенных методом ПСК поверхностей пластин высокоомного переходного слоя (например, SiO_2) проницаемого при инжекции для носителей заряда. О наличии инжекции свидетельствовал характер восстановления блокирующих свойств р-п структуры при приложении к ней обратного смещения после пропускания импульса прямого тока. При смене полярности приложенного к структурам смещения наблюдалась стадия высокой обратной проводимости, длительность которой τ_1 определялась соотношением амплитуд импульсов прямого и обратного токов и временем жизни дырок τ_p , инжектированных в приграничную с р-слоем область слабелегированной п-базы структуры.

Вид зависимости τ_1 от j_F при $j_F/j_R = \text{const}$ приведен на рис. 2 и типичен для структур, у которых концентрация легирующей примеси в р-эмиттере лишь на 2 порядка превышает концентрацию доноров в п-базе. Значение j_F , при котором наблюдается уменьшение τ_1 , численно хорошо согласуется с уровнем тока, соответствующим переходу к среднему уровню инжекции и составляющему значение $\sim 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ А/см}^2$. Повышение j_F выше этого уровня ведет

к падению коэффициента инжекции и уменьшению значения τ_f . Следует отметить, что расчетный уровень τ_p по данным измерений τ_f , составляет ~ 40 мкс, т. е. является достаточно высоким и сравним с уровнем τ_p в базах диффузионных р-п переходов. Это свидетельствует о невысоких скоростях рекомбинации носителей заряда на границе срачиваемых поверхностей, несмотря на возможно высокую плотность дефектов в переходном слое из-за несоответствия в нашем случае кристаллографических направлений соединяемых пластин [3, 4].

ВАХ р-п структур, изготовленных методом ПСК на основе кремния Чохральского марок КДБ и КЭФ, качественно аналогичны описанным. Во всех случаях на формировании прямой ветви ВАХ р-п структур и ВАХ образцов, изготовленных срачиванием пластин одного типа проводимости, решающее влияние оказывало наличие переходного слоя высокого сопротивления, величина которого возрастала с увеличением длительности ТО. Полагая наличие высокого „барьерного“ электрического сопротивления связанным с образованием окисного слоя между соединяемыми пластинами и учитывая выводы работы [4], для улучшения прямых ВАХ р-п структур ТО пластин в процессе ПСК, вероятно, следует проводить в бескислородной атмосфере, используя при этом бестигельный Si с малым содержанием кислорода.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] F u r u k a w a K., S h i m b o M., F u k u d a K., T a n z a w a K. In..Extended Abstract of 18th International Conference on Solid State Devices and Materials, Tokyo, 1986, P. 533-536.
- [2] S h i m b o M., F u r u k a w a K., F u k u d a K., T a n z a w a K. // J. Appl. Phys. 1986. V. 60. N 8. P. 2987-2989.
- [3] L a s k y I.B. // Appl. Phys. Lett. 1986. V. 48 (1). P. 78-80.
- [4] A h n K.Y., S t e n g l R., T a n T.Y., G o s e l e U. // J. Appl. Phys. 1989. V. 65. P. 561-563.
- [5] В о л л е В.М., В о р о н к о в В.Б., Г р е х о в И.В., К о р о б к о в И.Н. // ФТП. 1979. Т. 13. № 4. С. 701-706.

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

Поступило в Редакцию
18 июля 1989 г.