

05;06;12

Прямое сращивание кремниевых пластин с диффузионным слоем

© В.Б. Воронков, Е.Г. Гук, В.А. Козлов, В.Б. Шуман

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

Поступило в Редакцию 10 октября 1997 г.

Впервые показана возможность твердофазного прямого сращивания кремниевых пластин, имеющих диффузионные слои p^+ - либо n^+ -типа с высокой поверхностной концентрацией примеси.

Метод твердофазного прямого сращивания полупроводниковых пластин (в англоязычной литературе DWB-direct wafer bonding) предложен относительно недавно [1,2], но уже широко используется в микроэлектронике, оптоэлектронике и силовой технике наряду с традиционными методами [3]. Важнейшим условием применимости этого метода является малый уровень среднеквадратичной микрошероховатости поверхности пластин, позволяющей приводить сращиваемые пластины в "оптический" контакт [3,4]. В настоящее время прямое сращивание применяется для соединения чистых полированных пластин кремния с различным удельным сопротивлением либо с разным типом проводимости для формирования p^+-n , n^+-n и p^+-p переходов, а также для соединения пластин, подвергнутых ионной имплантации. Однако процесс ионной имплантации, хотя и сохраняет качество поверхности пластин, но зачастую неприемлем из-за сложности оборудования и невозможности достижения в ряде случаев достаточных толщин слоев при высокой степени их легирования. Диапазон применения метода прямого сращивания мог бы быть расширен, если бы появилась возможность сращивать пластины, имеющие диффузионные слои с высоким уровнем

легирования мелкими примесями. Например, можно было бы получать прямым сращиванием структуры солнечных элементов с вертикальными $p-n$ переходами [5], где требуется последовательное соединение отдельных p^*nn^* либо n^*pp^* структур. При этом необходимо иметь высокую концентрацию примеси в n^+ - и p^+ -слоях для обеспечения омического контакта с малым переходным сопротивлением. Однако вследствие того, что поверхность кремниевых пластин после диффузии имеет недостаточно высокое качество, такая задача требует проведения специальных исследований. Так, в [6] для сращивания использовали пластины кремния с глубиной залегания p^+-n перехода $100\ \mu\text{m}$ после диффузии Ga (в инертной атмосфере) либо после совместной диффузии В и Al (на воздухе). После диффузии эти пластины подвергались химико-механической полировке ввиду эрозии поверхности. В результате удалось срастить только пластины после диффузии Ga. Полировка поверхности (которая сама по себе имеет очевидный недостаток — удаляет слой с максимальной концентрацией примеси) после диффузии бора с алюминием выявила микрошероховатость, не позволившую срастить пластины. Возможно, эта микрошероховатость обусловлена присутствием вакансионных комплексов. Таким образом, задача не была решена.

Целью данной работы являлось исследование прямого сращивания пластин, имеющих сформированный в окисляющей среде диффузионный p^+ - либо n^+ -слой с высокой поверхностной концентрацией примеси. Для улучшения качества поверхности пластин перед сращиванием предложено после диффузии проводить окисление пластин с последующим удалением окисла.

Для сращивания использовались промышленные полированные пластины $p\text{-Si}$ с высоким качеством поверхности, имеющие ориентацию $\langle 100 \rangle$, диаметр $600\ \text{mm}$, толщину $350 \pm 10\ \mu\text{m}$. В пластины с удельным сопротивлением $\rho = 1\ \Omega\cdot\text{cm}$ с двух сторон проводилась диффузия на воздухе из нанесенного на поверхность полимерного источника [7] с высоким содержанием бора либо фосфора, обеспечивающего поверхностную концентрацию примеси $\sim 10^{20}\ \text{cm}^{-3}$. Диффузия бора проводилась при 1200°C в течение 40 минут (образец № 1) либо при 1050°C в течение 90 минут (образцы № 2, 3). Диффузия фосфора проводилась при 850°C в течение 40 минут (образцы № 4, 5). Глубины диффузионных слоев составляли: $x_1 \sim 3.7\ \mu\text{m}$, $x_{2,3} \sim 1.4\ \mu\text{m}$, $x_{4,5} \sim 0.4\ \mu\text{m}$. Затем после удаления в плавиковой кислоте силикатного стекла образцы № 1, 2, 4 окислялись в парах воды при 900°C в течение 40 минут.

Пластины сращивались по две: каждая кремниевая пластина, прошедшая диффузию, сращивалась с чистой пластиной кремния p -типа с удельным сопротивлением $\rho = 0.005 \Omega \cdot \text{см}$. Непосредственно перед сращиванием все пластины травились в плавиковой кислоте, а затем проходили стандартный цикл кислотно-перекисных отмывок, на завершающей стадии которых проводилась обработка в разбавленной 2% HF с последующей гидрофилизацией 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 $\sim 18 \text{M}\Omega \cdot \text{см}$. Соединение и сращивание пластин проводилось согласно методике, описанной в [8].

Высокотемпературная термообработка соединенных пар проводилась на воздухе при 1200°C в течение 2 часов, причем внешнее давление не прикладывалось.

Сплошность сращивания и наличие "пузырей" на интерфейсе контролировалось методом инфракрасной (ИК) фотометрии на телевизионной установке типа ПТУ-44. Координатное разрешение установки по площади составляло $\sim 300 \mu\text{m}$ с возможностью выявления "пузырей" с величиной оптического зазора между пластинами $\geq 0.25 \mu\text{m}$. После ИК-фотометрии сращенные пластины разрезались на две половины. На одной половине делали косой шлиф под малым углом, и после щелочного травления с помощью микроскопа оценивалось качество сращивания. На вторую половину наносились контакты путем химического никелирования и проводилась резка на квадраты размером $4 \times 4 \text{mm}$ (сборки), у которых измерялась вольт-амперная характеристика. Контроль сплошности сращивания пластин, имевших диффузионный p^+ -слой, показал практическое отсутствие пузырей на образце № 1, то есть подтвердил полное сращивание, на образце № 2 пузыри занимали $\sim 10\%$ площади. На контрольном образце, не прошедшем операцию окисления после диффузии бора (образец № 3), на долю пузырей приходилось $\sim 50\%$ площади. При сращивании пластин с диффузионным n^+ -слоем получен иной результат — как у прошедшего операцию окисления после диффузии фосфора образца № 4, так и у контрольного образца № 5 на долю пузырей приходилось $\sim 5\%$ площади.

Вольт-амперные характеристики сборок линейны. Сравнение измеренного сопротивления сборок с расчетным (учитывающим объемное сопротивление пластин; сопротивление контактов считали пренебрежи-

1* Письма в ЖТФ, 1998, том 24, № 6

мо малым) позволило судить о наличии добавочного сопротивления на интерфейсе. Доля сборок, имевших расчетное сопротивление, составила 91% в случае образца № 1, 85% для образца № 2 и 40% для контрольного образца № 3, что коррелирует с оценкой, сделанной с помощью ИК-фотометрии. При сращивании пластин с диффузионным n^+ -слоем мы ограничивались ИК-фотометрией, давшей хороший результат. Следует отметить, что соответствие сопротивления сборки расчетному значению еще не свидетельствует о том, что на интерфейсе отсутствуют мелкие "пузыри", поскольку сопротивление растекания по диффузионному слою невелико. Однако следует учесть и то обстоятельство, что для ряда применений качество интерфейса между сильно легированными слоями не так существенно, как например для сращивания однородно легированных пластин с разным типом проводимости, ибо в первом случае $p-n$ переход находится на расстоянии от интерфейса, равном толщине диффузионного слоя, и, следовательно, интерфейс расположен вне области объемного заряда.

Отметим три момента, способствовавшие достижению положительного результата: 1) время диффузии в окислительной атмосфере было намного короче, чем в [6]; 2) полировка после диффузии не проводилась в отличие от [6]; после диффузии проводилось окисление в парах воды с последующим удалением окисла.

Таким образом, впервые показана возможность твердофазного прямого сращивания кремниевых пластин, имеющих диффузионные слои n^+ - либо p^+ -типа с высокой поверхностной концентрацией примеси без дополнительной полировки поверхности после диффузии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 96-02-17902.

Список литературы

- [1] *Lasky J.B.* // Appl. Phys. Lett. 1986. V. 48. N 1. P. 78–80.
- [2] *Shimbo M., Furukawa K., Fukuda K., Tanzava K.* // J. Appl. Phys. 1986. V. 50. P. 2987–2991.
- [3] *Bengtsson S.* // Journal of El. Mat. 1992. V. 21. N 8. P. 841–862.
- [4] *Abe T., Steigmeier E.F., Hagleiter W., Allan A.J.* // Jap. J. Appl. Phys. 1992. V. 31. N 3. P. 721–728.

- [5] Гук Е.Г., Зимогорова Н.С., Шварц М.З., Шуман В.Б. // ЖТФ. 1997. Т. 67. № 2. С. 129–131.
- [6] Kozlov V.A., Eremin V.K., Shulpina I.L., Voronkov V.B., Ivanov A.M., Eliseyev V.V., Chibirkin V.V. In High Purity Silicon IV, eds C.L. Claeys, P. Rai-Choudhury, P. Stallhofer and J.M. Maurits, The Electrochem. Soc. Ser., Pennington, PV 96–13, 1996, P. 369-378.
- [7] Гук Е.Г., Ельцов А.В., Шуман В.Б., Юрре Т.А. Фоторезисты–диффузаны в полупроводниковой технологии. Наука, Л., 1984. 116 с.
- [8] Grekhov I.V., Kozlov V.A., Volle V.A., Voronkov V.B. Best of Soviet Semicond. Phys. and Technol. 1989–1990, Ed. by M. Levinstein and M. Shur, World, Scientific, 1995. P. 597–599.