

06.2

© 1992

О ПРИРОДЕ p-СЛОЯ, ОБРАЗУЮЩЕГОСЯ В ОБЛАСТИ
ИНТЕРФЕЙСА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН
ПРИ ТВЕРДОФАЗНОМ ПРЯМОМ
СРАЩИВАНИИ КРЕМНИЯ (ПСК)

Е.В. А с т р о в а, В.Б. В о р о н к о в,
Ю.Н. Д а л у д а, В.А. К о з л о в,
А.А. Л е б е д е в

Исследование электрических характеристик интерфейса многослойных кремниевых структур, сформированных твердофазным прямым сращиванием [1], представляет в настоящее время помимо чисто научного интереса и большое практическое значение в силу внедрения технологии ПСК в производство широкого класса приборов [2]. Тем не менее число работ по данной тематике незначительно, а их результаты противоречивы.

Авторы [3, 4] при исследовании электрических характеристик ПСК-структур пришли к выводу, что неидеальность вольтамперных характеристик n-p-структур объясняется наличием на интерфейсе потенциального барьера, ограничивающего свободное прохождение носителей заряда. Образование барьера объяснялось при этом высокой плотностью заряженных состояний интерфейса, зависящей от способа подготовки поверхностей пластин кремния перед соединением. Нами в работе [5] сообщалось, что электрические характеристики p-p и n-p ПСК-структур не могут быть полностью объяснены по модели, предложенной в [3, 4].

При сращивании пластин кремния с удельным сопротивлением $\rho \geq 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ было обнаружено, что в прилегающих к интерфейсу слоях кремния возможна частичная компенсация проводимости материала p-типа вплоть до инверсии в r-тип с образованием двух дополнительных p-p-переходов [5], а в высокоомном кремнии r-типа образование p⁺-слоя. Степень компенсации в значительной мере определялась режимом химической обработки поверхности сращиваемых пластин. В случае использования финишных аммиачно-перекисных и кислотно-перекисных обработок, создающих гидрофильную поверхность кремния, образование p-слоев проявлялось наиболее отчетливо. При высокотемпературной обработке (ВТО) в режиме: $T = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$, $t = 5 \text{ ч}$; глубина p-p-перехода, отсчитанная от интерфейса, составляла 10–20 мкм в p-Si с $\rho \sim 100 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, а концентрация дырок в p-слое достигала $10^{15}\text{--}10^{16} \text{ см}^{-3}$ ($T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$). В случае использования для соединения гидрофобных поверхностей пластин p-Si, обработанных в буферных составах с НР, образование p-слоев не зарегистрировано. Следует отметить,

что термообработка гидрофильных пластин $p-Si$ порознь в окисляющей атмосфере также не приводила к появлению приповерхностных p -слоев.

Из этих фактов следует, что либо на поверхности срачиваемых пластин кремния имеется неконтролируемая акцепторная примесь, которая, будучи „запечатанной“ на интерфейсе соединенных пластин, диффундирует в кремний без окисления, либо в области срачивания при ВТО генерируются дефекты кристалла, проявляющие акцепторные свойства.

Задачей настоящей работы являлось исследование природы обнаруженных акцепторных центров, их концентрации и распределения в p -слое.

Предположение о дефектной природе акцепторных ловушек было отвергнуто на основании измерений холловской подвижности, данных просвечивающей электронной микроскопии и $DLTS$ -измерений. Подвижность дырок μ_p в p -слое не отличалась от значений, типичных для монокристаллов кремния с соответствующим уровнем легирования мелкой примесью. При этом в прилегающих к интерфейсу слоях $p-Si$ не отмечалось образование заметных нарушений кристаллической структуры (дислокаций, аморфных областей, скоплений точечных дефектов) и появления свойственных им глубоких центров, концентрация которых в исследованных слоях не превышала 10^{12} см^{-3} . Таким образом было установлено, что образование p -слоев обусловлено мелкими акцепторами.

Идентификация акцепторной примеси проводилась по коэффициенту диффузии D и энергии ионизации E_a .

Диффузия адсорбированных атомов примеси в условиях ПСК происходит из ограниченного источника и должна подчиняться известной формуле Гаусса

$$N(x) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right), \quad (1)$$

где: Q - общее количество примесных атомов на единицу поверхности, x - расстояние от интерфейса.

В результате ВТО при одной температуре, но разной длительности из ширины p -слоя с помощью (1) были получены значения $D = (1.2-2) \cdot 10^{-11} \text{ см}^2/\text{с}$, $Q = (2-3.7) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Это позволило предположить, что неизвестной акцепторной примесью является алюминий, адсорбированный на поверхности в количестве, равном $\sim 10^{-2}$ монослоя.

Для определения профиля распределения акцепторов по толщине p -слоя был изготовлен косой шлиф под углом 0.5° , на который после короткого травления был нанесен ряд барьеров Шоттки путем напыления сурьмы через маску с диаметром отверстий 340 мкм и шагом 750 мкм (рис. 1, б). Концентрацию примеси определяли из вольтфарадных зависимостей для каждого из барьеров Шоттки, а соответствующую глубину - из расстояния от интерфейса до центра барьера Шоттки, умноженного на $\text{tg } 0.5^\circ$. Типичная зависимость,

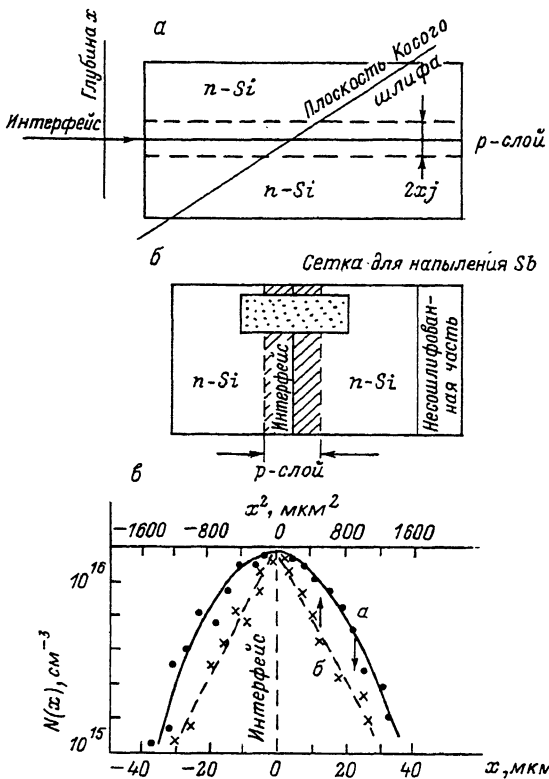


Рис. 1. Слой р-типа проводимости в структуре, полученной прямым твердофазным сращиванием, и профиль распределения примеси в этом слое. а – поперечное сечение структуры, б – вид сверху плоскости косо́го шлифа после выявления р-области и напыления барьеров Шоттки, в – распределение акцепторов по глубине структуры, прошедшей ВТО на воздухе при 1200 °С в течение 15 ч (кривая а) и та же зависимость, построенная от квадрата глубины (кривая б).

полученная для пластин, прошедших ВТО при 1200 °С в течение 15 ч и подвергшихся перекисно-аммиачной гидрофиллизации поверхности перед сращиванием, приведена на рис. 1, в.

Из рисунка видно, что концентрация акцепторов максимальна на интерфейсе и составляет $N = 1.44 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (полученные нами значения на других структурах лежат в диапазоне $(1-4) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$). По обе стороны от интерфейса концентрация уменьшается в соответствии с законом (1), о чем свидетельствуют прямые линии, полученные в координатах $\lg N = f(x^2)$ (см. кривую „б“ на рис. 1, в). Расчет коэффициента диффузии и поверхностной концентрации из профилей распределения на измерявшихся структурах дает $D = (1.4-2.1) \cdot 10^{-11} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, $Q = (1-4) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, что хорошо согласуется с приведенными выше результатами.

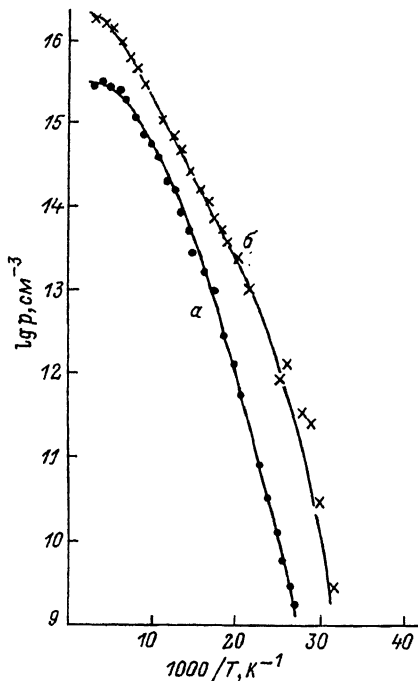


Рис. 2. Холловская зависимость концентрации дырок от обратной температуры в диффузионном слое акцепторов, образовавшемся в результате сращивания пластин кремния *p*-типа проводимости ($\rho = 250 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) при $T = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 5 ч. а – после финишной отмычки в аммиачно-перекисном растворе, б – при отмычке в том же растворе, но с добавлением $Al(NO_3)_3$.

Для измерений температурной зависимости эффекта Холла методом Ван-дер-Пау одну из пластин кремния *p*-типа сошлифовывали до *p*-слоя. Как известно, неравномерное распределение примеси в диффузионном слое не приводит к заметным ошибкам при холловских измерениях [6]. Полученная зависимость $p = p^0 \exp(-E_a/2kT)$ приведена на рис. 2 (кривая а). Рассчитанная из нее энергия активации $E_a = 72 \pm 2 \text{ мэВ}$, степень компенсации 1–2 %, что хорошо согласуется с концентрацией доноров в исходном *p-Si* ($2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$). Кроме того, были проведены измерения на ПСК-структуре, намеренно „загрязненной“ алюминием путем обработки пластин кремния перед сращиванием в аммиачно-перекисном растворе с добавлением $Al(NO_3)_3$. В таких образцах после сращивания концентрация акцепторов выросла примерно на порядок, степень компенсации уменьшилась и $p \sim \exp(-E_a/2kT)$ (рис. 2, кривая б). Вычисленная отсюда E_a близка к энергии ионизации, полученной для случая неконтролируемой адсорбции алюминия, и согласуется с данными [7]

для оптической энергии ионизации алюминия ($E_a = 70.18 \text{ мэВ}$).

Таким образом, результаты холловских измерений также свидетельствуют в пользу того, что образование р-слоя связано со следами алюминия на поверхности кремния.

Кроме алюминия, близкое значение $E_a = 74.05 \text{ мэВ}$ имеет другая акцепторная примесь - галлий [7]. Однако коэффициент диффузии галлия в кремний при той же температуре примерно в 3 раза меньше, чем у алюминия [8]. Поэтому для галлия толщина р-слоя должна быть примерно в 1.7 раза меньше, что далеко выходит за рамки ошибки измерений. К тому же, по данным контрольного измерения с помощью метода вторичной ионной масс-спектрометрии, обнаружить галлий на поверхности гидрофильных пластин $p-Si$, не удалось, в то время как алюминий был зарегистрирован (без количественной оценки из-за недостаточной чувствительности).

Таким образом, в результате проведенного исследования пластин кремния удалось установить, что природа наблюдаемых р-слоев вблизи интерфейса ПСК-структур связана с алюминием, который неконтролируемо адсорбируется на гидрофильных поверхностях пластин кремния при их обработке в аммиачно- и кислотно-перекисных растворах, а затем диффундирует прилегающие к интерфейсу слои во время ВТО. Полученные результаты хорошо согласуются с данными работ [8, 9], авторы которых также установили, что алюминий является доминирующей неконтролируемой примесью, интенсивно адсорбирующейся на кремнии во время аммиачно-перекисных отмывок.

Авторы благодарят В.В. Емцева за проявленный интерес к работе и полезное обсуждение.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Furukawa K., Shimbo M., Fukuda K., Tanzawa K. // J. Appl. Phys. 1986. V. 60. N 8. P. 2987-2989.
- [2] Hoshi T., Ogin M. // Denki Kagaku. 1989. V. 58. N 4. P. 321-325.
- [3] Bengtsson S., Engström O. // J. Appl. Phys. 1989. V. 66. N 3. P. 1231-1239.
- [4] Bengtsson S., Engström O. // Jap. J. Appl. Phys. 1991. V. 30. N 2. P. 356-361.
- [5] Волле В.М., Воронков В.Б., Грехов И.В., Козлов В.А. // Электротехника. 1992. В. 2. С. 58-64.
- [6] Батавин В.В., Концевой Ю.А., Федорович Ю.В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.

- [7] R a m d a s A.K., R o d r i g u e z S. // Rep. Prog. Phys. 1981. V. 44. P. 1297-1387.
- [8] S h i m i z u H., M u n a k a t a Ch. // Semi-cond. Sci. Technol. 1991. V. 6. N 8. P. 756-760.
- [9] S h i m i z u H., M u n a k a t a Ch. // Jap. J. Appl. Phys. 1991. V. 30. N 10. P. 2466-2467.

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

Поступило в Редакцию
2 июля 1992 г.