

Были приготовлены поперечные шлифы образцов и проведен РСМА приконтактной области. На рис. 1 и 2 представлены распределения элементов в области контактов до и после пайки индием. Из рисунка видно, что после отжига формируется слой $Ag-Pd$ с достаточно резкой границей и равномерным распределением Ag и Pd по толщине слоя. После пайки наблюдается частичное замещение серебра индием (рис. 2).

Полученные результаты позволяют судить о возможности применения покрытия из сплава $Ag-Pd$ на тонкой органической основе для формирования контакта к материалу с ВТСП ($Y-Ba-CuO$) с достаточно низким переходным сопротивлением.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] K u s a k a T., S u z u k i Y., Y o t s u y a T., O g a w a S., A o y a m a T., I m o k a w a H. // Proc. 5th Int. Workshop on Future Electron Devices. 1988. P. 205-208.
- [2] C a t o n R., S e l i m R., B u o n c r i s t i a n i A.M., B y v i k C.F. // Appl. Phys. Lett. 1988. V. 52. P. 1014-1016.
- [3] V a n d e r M a a s J., G a s p a r o v V.A., P a v u n a D. // Nature. 1987. V. 328. P. 603-604.
- [4] T z e n g Y. // J. Electrochem. Soc. 1988. V. 135. P. 1309-1310.
- [5] T a l v a c c h i o J. // IEEE Transactions on Componens, Hybrids, and Manufacturing Technology. 1989. V. 12. P. 21-31.

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

Поступило в Редакцию
10 июля 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 17, вып. 2

26 января 1991 г.

06.1; 06.2

© 1991

ТУННЕЛЬНЫЕ ЭФФЕКТЫ В КВАНТОВО-РАЗМЕРНОМ
КРЕМНИЕВОМ ТРАНЗИСТОРЕ

Н.Т. Б а г р а е в, Л.Е. К л я ч к и н,
В.Л. С у х а н о в

Диффузия легирующей примеси в полупроводниках контролируется избыточными потоками собственных междоузельных атомов (I) и вакансий (V) с поверхности монокристалла [1]. Использование тонких слоев окисла и высоких температур термообработки приводит

к преимущественной генерации собственных междоузельных атомов окисленной поверхностью и тем самым стимулирует механизм диффузии [1]:

$$X_i \rightleftharpoons X_S + I, \quad (1)$$

где X_i , X_S – легирующая примесь в междоузельной и узельной позициях соответственно. Напротив, применение толстых слоев окисла и низких температур термообработки способствует доминированию диссоциативного вакансионного механизма легирующей примеси [1]:

$$X_i + V \rightleftharpoons X_S. \quad (2)$$

В настоящей работе существование условий паритета *kick-out* и диссоциативного вакансионного механизмов диффузии было продемонстрировано на примере легирования кремния бором и фосфором в условиях варьирования толщины окисла и температуры диффузии. Обнаруженные условия баланса данных механизмов диффузии позволили впервые получить квантово-размерные диффузионные профили, р-п-переходы и p^+-p^+-p транзисторные структуры (рис. 1, 2).

Диффузия бора и фосфора проводилась в пластины монокристаллического кремния толщиной 350 мкм ориентации (100) как п-, так и р-типов проводимости с удельным сопротивлением 20–40 Ом·см. Рабочая и обратная стороны пластин маскировались слоем окисла. Полученные диффузионные профили определялись с помощью прецизионного послойного травливания. При этом на каждом этапе измерялись вольт-фарадные характеристики в системе полупроводник-электролит, а также поверхностное сопротивление с помощью четырехзондового метода.

На рис. 1 представлены диффузионные профили бора в кремнии п-типа, полученные при различных толщинах окисла и температурах диффузии. Было обнаружено аномальное уменьшение глубины залегания р-п-перехода при $d_{SiO_2}/d_o = 1$. Это свидетельствует о смене диффузионного механизма при увеличении толщины окисла. В образцах, маскированных тонким слоем окисла, диффузия осуществляется по *kick-out* механизму, благодаря чему наблюдаются максимальные глубины залегания р-п-перехода (см. кривые 1, 4, 7). С увеличением толщины окисла ($d_{SiO_2}/d_o \rightarrow 1$) стимулируется практически полная аннигиляция междоузельных атомов кремния и вакансий вблизи поверхности. В этих условиях наблюдается резкое торможение диффузии в объем монокристалла (см. кривые 3, 5, 8). Наиболее ярко это проявляется при низких температурах диффузии, где осуществляется паритет между *kick-out* и диссоциативным вакансионным механизмами диффузии. При $d_{SiO_2}/d_o > 1$ диссоциативный вакансионный механизм диффузии доминирует вплоть до 900 °С [1], поскольку в этих условиях индуцируется избыточный поток вакансий с поверхности, что снова приводит к наблюдаемому заглублению р-п-перехода (см. кривые 6, 9). При 950 °С, однако, наличие толстого окисла ($d_{SiO_2}/d_o > 1$) позволяет реализовать только паритет вышеуказанных механизмов (см. кривую 3).

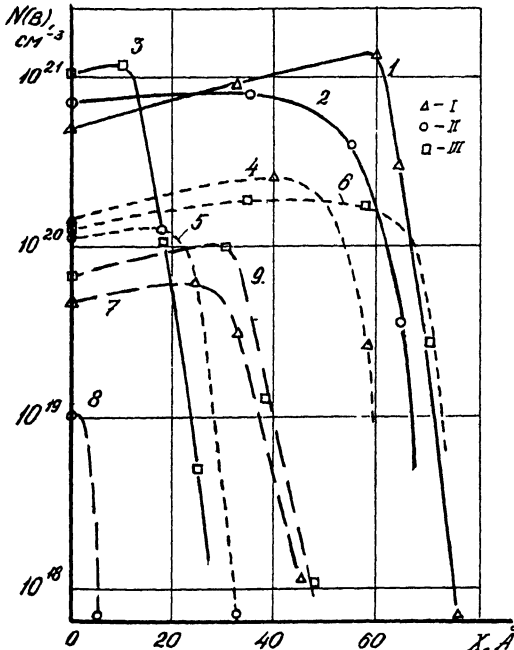


Рис. 1. Квантово-размерные диффузионные профили бора в кремнии p -типа, полученные при температурах диффузии 950°C (1-3), 900°C (4-6), 850°C (7-9). 1 - $d_{\text{SiO}_2}/d_o = 0.62$, II - 1.0, III - 1.28. d_o - критическая толщина окисла, при которой происходит смена типа собственных дефектов, генерируемых окисленной поверхностью кремния. Значение d_o определяется состоянием поверхности: состав атмосферы, предварительная обработка.

Таким образом, варьируя температурой диффузии и толщиной окисла, можно управлять глубиной диффузионного профиля и концентрацией легирующей примеси в широких пределах. Это позволило впервые создать квантово-размерные p^+-p^+-p транзисторные структуры с двумерной базой (см. рис. 2). Следует отметить, что концентрационные профили на рис. 1, 2 не являются классически диффузионными, и их резкость свидетельствует о фрактальном характере диффузии легирующей примеси [2]. Иными словами, диффузия легирующей примеси обусловлена эффектами увлечения, связанными с избыточными потоками вакансий или собственных междоузельных атомов.

Видно, что характеристики квантово-размерного транзистора отражают наличие туннельных процессов типа эмиттер-коллектор и эмиттер-база (рис. 2). Туннельный процесс эмиттер-коллектор через двумерную базу проявляется в плавном увеличении $I_K = f(U_K)$ (рис. 2, а). Резкое увеличение I_K при $U_K = 14$ В обусловлено лавинным пробоем p - p -перехода база-коллектор (рис. 2). При смене

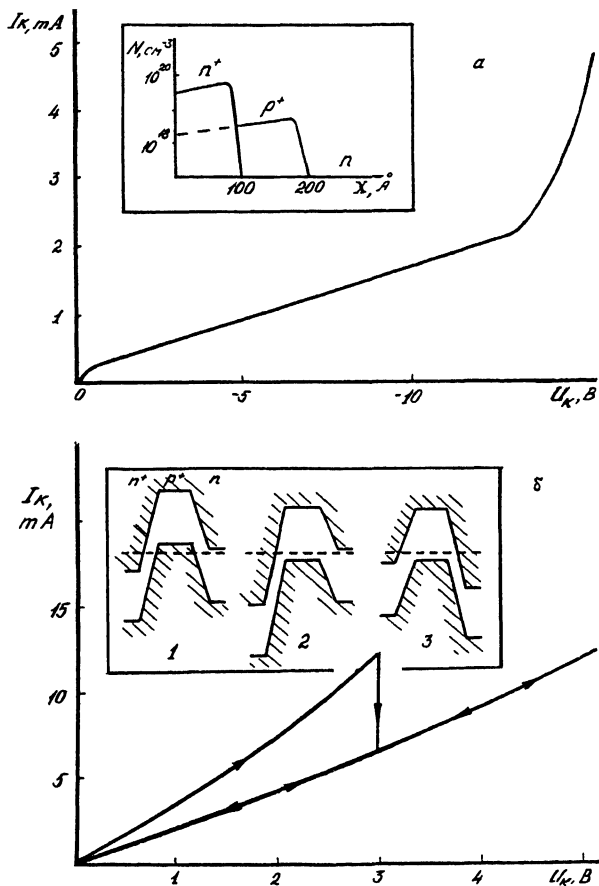


Рис. 2. Зависимость коллекторного тока при прямом (а) и обратном (б) включениях коллекторного напряжения. Вставки: квантово-размерная $n^+ - p^+ - n$ структура, полученная при $d_{SiO_2}/d_0 = 1.28$ (а); одноэлектронная зонная схема транзистора с двумерной базой: 1 - $U_K = 0$, 2 - $U_K < 0$, 3 - $U_K > 0$ (б).

знаков коллекторного напряжения (рис. 2, б) был обнаружен новый туннельный эффект типа эмиттер-база, который возникает только при наличии двумерной базы. В этом случае увеличение коллекторного напряжения сначала стимулирует рост I_K вследствие оптимизации условий тунnelирования эмиттер-база-коллектор. Однако при последующем росте U_K (см. вставку рис. 2, б) данный туннельный процесс срывается, что приводит к резкому уменьшению I_K , который ограничивается снизу прямым туннельным процессом типа эмиттер-коллектор (см. рис. 2, б). Интересно, что после дальнейших изменений U_K как в сторону уменьшения, так и увеличения

туннельный процесс эмиттер-база-коллектор имел метастабильный характер и восстанавливался только через десятки минут. Этот эффект обусловлен обеднением базы дырками вследствие ее двумерности. Восстановление туннелирования через базу определяется временем ухода электронов с отрицательно заряженных акцепторов в коллектор.

Таким образом, реализация условий фрактальной диффузии позволяет получать двумерные р-п-переходы и транзисторные структуры, демонстрирующие туннельные процессы как при прямом, так и при обратном включении.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Frank W., Gösele U., Mehrer H., Seeger A. - Diffusion in Silicon and Germanium. - Diffusion in Crystalline Solids. Academic Press Inc., 1984. P. 63-142.
- [2] Kolb M., Gauyet J.F., Saapovai B. // Europhys. Lett. 1987. V. 3. N 1. P. 33-38.

Поступило в Редакцию
20 ноября 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 17, вып. 2

26 января 1991 г.

05.4

© 1991

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАДИИ ОТЖИГА НА ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ КЕРАМИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ФАЗЫ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

А.Ю. Мусатенко, Р.Б. Туровский,
Н.А. Дрожко, Е.В. Благоев

Процесс изготовления изделий из ВТСП включает в себя стадию высокотемпературного отжига, в течение которой формируется микроструктура сверхпроводящих керамических образцов, обеспечивающая их прочностные и сверхпроводящие характеристики.

В данном сообщении приводятся данные о влиянии температуры отжига на процесс спекания образцов, спрессованных из порошка $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ в кислородной и инертной атмосферах.

Процессы спекания изучались на образцах, спрессованных из порошка $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ТУ 48-0531-375-87. Высокотемпературный отжиг образцов проводился в печи СУОЛ-2 в протоке кислорода на керамических подложках $\text{ZrO}_2 + \text{Y}_2\text{O}_3$. После выдержки при высокой температуре образцы охлаждались вместе с печью.