

В.И. ПЛЕБАНОВИЧ, А.Р. ЧЕЛЯДИНСКИЙ, В.Б. ОДЖАЕВ

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ИМПЛАНТИРУЕМЫХ ПРИМЕСЕЙ БОРА И УГЛЕРОДА В КРЕМНИИ

Localization of implanted boron and carbon in the silicon crystal nodes depending on current ions density was investigated by *X-ray* diffraction and electrophysical methods. With increase of current ions density, localization of boron atoms in the nodes grows that is defined by increase of instantaneous vacancy concentration and suppression of impurity replacement from the nodes by interstitial Si atoms.

Локализация в решетке имплантируемых примесей определяется ее взаимодействием с точечными радиационными дефектами. Примесно-дефектное взаимодействие является одной из важнейших проблем физики реального кристалла. Ее практическая значимость наряду с другими факторами определяется тем, что знание исходного распределения внедренной примеси по узлам и междоузлиям необходимо при моделировании процессов ее диффузии при высокотемпературной термообработке. Управление локализацией дополнительно внедряемой примеси углерода важно для подавления остаточных протяженных нарушений в ионно-легированных слоях кремния. Только расположенные в узлах решетки атомы С являются ловушками для междоузельных атомов Si. Количество работ по локализации внедренных примесей в кремнии велико, но ясности в этом вопросе еще нет. По данным разных авторов, количество бора в узлах решетки кремния сразу после имплантации при комнатной температуре составляет от 20 до 70 %, имеются сообщения о практически 100 % локализации бора в узлах [1-3]. Что касается имплантации фосфора, то его доля в узлах в целом несколько больше, чем бора, но результаты также сильно различаются [3-5]. Причина расхождений остается не ясной. Некоторые авторы связывают это с неточностями эксперимента либо с некорректной обработкой полученных результатов [1]. Нам представляется, что расхождения определяются условиями имплантации.

В данной работе мы исследовали роль плотности тока имплантации на локализацию внедренной примеси бора и углерода в кремнии.

Методика эксперимента

Исследовали имплантацию бора и углерода в кремний *n*-типа с исходным удельным сопротивлением $\rho_0=0,5$ Ом·см, фосфора в кремний *p*-типа с $\rho_0=10$ Ом·см, а также имплантацию бора в кремний, сильно легированный при выращивании бором ($\rho_0=0,005$ Ом·см). Имплантацию проводили сканирующим пучком ионов с энергией 100 кэВ при эффективных плотностях тока ионов $J_{эф}$ от 0,04 до 2 мкА·см⁻². Был использован рентгенодифракционный метод в режиме двухкристального спектрометра при параллельном расположении кристалла-монокроматора и исследуемого образца на излучении $\text{CuK}\alpha_1$ в четвертом порядке отражения от плоскостей (111).

Электрическую активацию внедренных примесей в процессе изохронного отжига исследовали методом измерения эффекта Холла и проводимости по методике Ван-дер-Пау [6].

Результаты и их обсуждение

Установлено, что имплантация приводит к увеличению периода решетки (ПР) кремния. Его изменение определяется двумя факторами: радиационными дефектами, увеличивающими ПР, и сжимающими решетку атомами примеси (бора и углерода), если они располагаются в узлах. Уменьшение ПР обусловлено тем, что ковалентные радиусы атомов В (0,08 нм) и С (0,07 нм) меньше ковалентного радиуса атома Si (0,1175 нм).

На рис. 1 (кривая 7) показано изменение периода решетки Δa кремния в результате имплантации ионов B^+ дозой $1,8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ при различных значениях эффективной плотности тока ионного пучка $J_{\text{эф}}$, которая варьировалась от $0,04$ до $2 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$. Очевидно, что с увеличением $J_{\text{эф}}$ от $0,04$ до $1 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$ происходит существенное уменьшение Δa , но затем кривая $\Delta a(J_{\text{эф}})$ выходит на насыщение. Отметим, что при имплантации в указанных пределах плотности тока ионов температура образцов заметно не повышалась. Изменение ПР кремния в результате имплантации ионов C^+ дозой $4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ в зависимости от плотности тока ионного пучка показано на рис. 1 кривой 2. Эта зависимость аналогична зависимости для ионов B^+ .

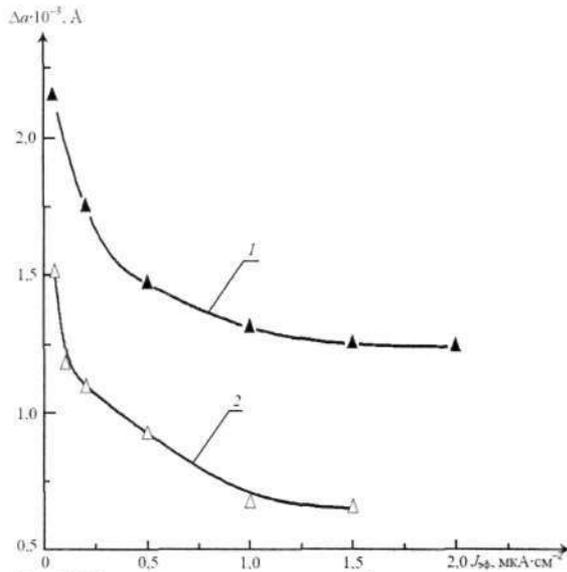


Рис. 1. Изменение периода решетки Δa в имплантированном кремнии в зависимости от плотности тока ионов $J_{\text{эф}}$: 1 – B^+ , 2 – C^+

Уменьшение Δa может быть обусловлено тем, что с ростом плотности тока ионов большее число атомов бора (кривая 7) и углерода (кривая 2) располагается в узлах решетки. Локализация примесей определяется захватом их на вакансии и вытеснением из узлов междоузельными атомами кремния, возникающими при имплантации (эффект Воткинса [7]). С ростом плотности тока ионов возрастает мгновенная концентрация вакансий, что может способствовать переходу атомов бора и углерода в узлы решетки. Если выход зависимости $\Delta a(J_{\text{эф}})$ на насыщение в случае ионов B (кривая 7) обусловлен тем, что при $J_{\text{эф}} > 1,0 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$ весь внедренный бор располагается в узлах решетки, то из различия в ковалентных радиусах B и Si и наблюдаемого изменения в Δa можно определить количество бора в узлах решетки при всех значениях плотности тока ионов. Например, при $J_{\text{эф}} = 0,04 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$ количество бора в узлах решетки составляет 10 %. В случае имплантации углерода наблюдаемое различие в Δa для максимального и минимального значений плотности тока ионов требует, чтобы разница в концентрациях углерода в узлах решетки составляла $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Но при дозе $4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и энергии ионов 100 кэВ средняя концентрация углерода по профилю внедрения составляет $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$. Из этого следует, что при плотности тока, равной $1,5 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$, весь внедренный углерод локализован в узлах решетки, при $0,05 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$ - в междоузлиях.

На рис. 2 представлены кривые восстановления ПР в процессе изохронного отжига для кремния, имплантированного ионами B^+ с плотностью тока $0,04 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$ (кривая 7) и $2 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$ (кривая 2). Кривой 3 показано восстановление ПР в сильно легированном бором кремнии и имплантированном ионами B^+ при плотности тока $0,2 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$, которое (кривая 7) протекает в три стадии: первая - 100 ± 280 , вторая - 380 ± 600 и третья - 700 ± 900 °С. Первая стадия связывается с отжигом главным образом дивакансий, на второй отжигаются преимущественно многовакансионные комплексы [8]. Аналогичные стадии наблюдаются и в кремнии, имплантированном ионами Si [9]. Третья стадия от-

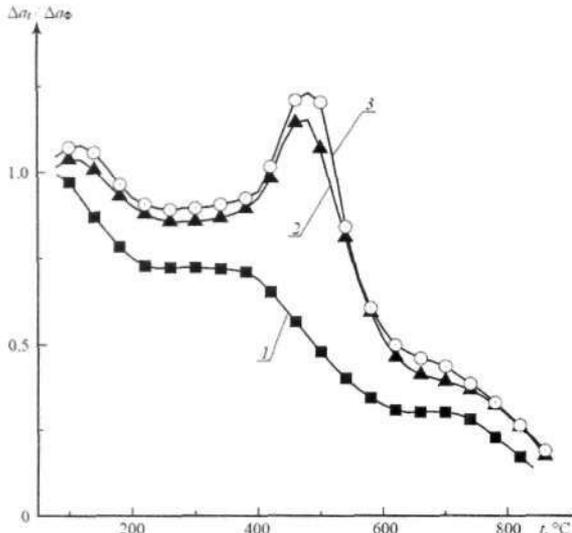


Рис. 2. Восстановление периода решетки в кремнии, имплантированном ионами В⁺ (Δa_ϕ – изменение ПР в результате имплантации дозой Ф, Δa_i – изменение ПР в результате имплантации и отжига при температуре t):
 1 – Si:P, $\rho_0=0,5$ Ом·см, $J_{эф}=0,04$ мкА·см⁻²; 2 – Si:P, $\rho_0=0,5$ Ом·см, $J_{эф}=2$ мкА·см⁻²; 3 – Si:B, $\rho_0=0,005$ Ом·см, $J_{эф}=0,2$ мкА·см⁻²

кремния образуются при развале междоузельных комплексов. При 120 °С отжигаются Si-P6-центры, при 480 °С - Si-B3 [10]. Существование стадий «обратного» отжига свидетельствует об увеличении количества атомов бора в узлах

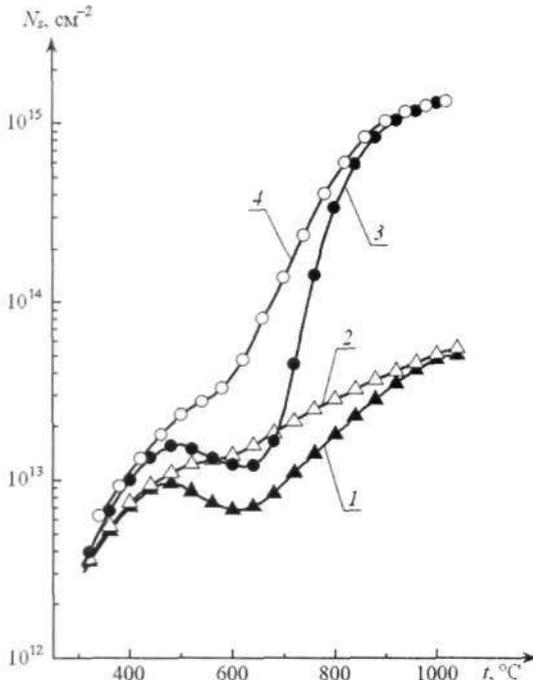


Рис. 3. Электрическая активация имплантированных атомов бора (1, 2) и фосфора (3, 4); 2, 4 – отжиг с подсветкой электронами

жига характерна только для кремния, имплантированного ионами бора. Согласно результатам [8] на этой стадии отжигаются комплексы атома бора с дивакансией.

В кремнии, имплантированном ионами В при $J_{эф}=2$ мкА·см⁻², на кривые восстановления ПР накладываются стадии «обратного» отжига при температурах 120 и 480 °С (кривая 2). Аналогичные стадии «обратного» отжига наблюдаются в сильно легированном бором кремнии, облученном ионами В с плотностью тока, равной 0,2 мкА·см⁻² (кривая 3). Характерные стадии «обратного» отжига связываются с вытеснением бора из узлов междоузельными атомами Si [9]. Свободные атомы

кремния образуются при развале междоузельных комплексов. При 120 °С отжигаются Si-P6-центры, при 480 °С - Si-B3 [10]. Существование стадий «обратного» отжига свидетельствует об увеличении количества атомов бора в узлах решетки с ростом плотности тока имплантации, что предполагалось на основе зависимостей $\Delta a(J_{эф})$, представленных на рис. 1.

Характерным для процесса ионного легирования, особенно легких ионов, является высокий уровень неупругих потерь. При имплантации в кремний ионов В и С с энергией 100 кэВ они составляют около 80 %, и с увеличением плотности тока ионов уровень ионизации в кристалле возрастает. Мы полагаем, что при высоком уровне ионизации процесс вытеснения примесей замещения подавляется. Это подтверждается результатами электрофизических исследований имплантированного кремния.

На рис. 3 приведены кривые электрической активации имплантированного бора в кремнии, т. е. зависимость сло-

евои концентрации носителей заряда N_s от температуры изохронного отжига (15 мин) - кривая 1. Кривая 2 соответствует зависимости $N_s(t)$, полученной при изохронном отжиге с одновременным облучением имплантированного слоя электронами с энергией 10 кэВ и плотностью тока $5 \text{ мкА}\cdot\text{см}^{-2}$. В случае «подсветки» электронами зависимость $N_s(t)$ не содержит стадии «обратного» отжига, характерной для кривой электрической активации бора в кремнии (кривая 7). Стадия «обратного» отжига, как известно [11], обусловлена вытеснением бора из узлов междоузельными атомами Si, образующимися при отжиге междоузельных комплексов Si-B3. Повышая уровень ионизации в кристалле путем облучения электронами, мы подавляем процесс замещения по Воткинсу.

Стадия «обратного» отжига на кривой $N_s(t)$ наблюдалась в работе [12] и для имплантированного фосфора. Поскольку сечение вытеснения фосфора значительно меньше, чем бора [12], то для ее наблюдения необходима доза фосфора больше $1\cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. При таких дозах имплантированный слой становится аморфным. Поэтому для наблюдения вытеснения фосфора из узлов решетки междоузельными атомами Si (кривая 3) образцы кремния после имплантации указанной дозой фосфора отжигались для рекристаллизации аморфного слоя и затем облучались ионами Si^+ дозой $1\cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ для введения радиационных дефектов. Если изохронный отжиг проводился при одновременном облучении имплантированного слоя электронами с энергией 10кэВ, то стадия «обратного» отжига не наблюдалась (кривая 4).

Можно было предположить, что подавление вытеснения примесей из узлов в междоузлия обусловлено зарядовым состоянием компонентов. Если при высоком уровне ионизации междоузельный атом Si захватывает неравновесный носитель заряда, например, электрон и заряжается отрицательно, то он не сможет вытеснить в силу электростатического барьера атом бора, который в узле является отрицательно заряженным ионом. Но такая схема, видимо, не работает, поскольку с увеличением уровня ионизации подавляется вытеснение и положительного иона фосфора (см. рис. 3, кривая 4).

В работе [12] развито представление, согласно которому из узлов решетки вытесняются междоузельными атомами Si все примеси замещения, у которых ковалентный радиус не совпадает с радиусом атома решетки. Междоузельные атомы Si движутся к источнику искажения (атом замещения) в поле упругих деформаций, создаваемых этим атомом. На атомном уровне это представляется следующим образом. Атомы решетки, смещенные из равновесных положений относительно атома замещения, поляризуются, т. е. на каждом из них образуется электрический диполь. Под влиянием диполей смещенных атомов решетки на междоузельном атоме индуцируется дипольный момент. В результате диполь-дипольного взаимодействия междоузельный атом Si притягивается к поляризованным атомам решетки. Поскольку величина дипольного момента на смещенных атомах решетки нарастает к источнику деформации, то междоузельный атом Si движется к атому замещения. Если теперь в слое создается высокий уровень ионизации, то неравновесные электроны и дырки экранируют диполи на смещенных атомах решетки, и описанный механизм миграции не работает. Таким образом, повышая уровень ионизации, мы можем подавить вытеснение примесей из узлов решетки как в процессе имплантации, так и при последующем отжиге.

Поэтому имплантацию ионов бора и углерода в кремний целесообразно проводить при максимально возможных плотностях тока ионов, не превышающих значений, при которых происходит разогрев образцов. При высокой плотности тока ионов практически весь бор и углерод будут располагаться в узлах решетки, и тем самым при последующем отжиге междоузельные атомы бора и углерода будут ловушками для междоузельных атомов кремния. Это должно подавлять формирование дислокационных петель внедренного типа.

Результаты исследований показывают: количество примесей бора и углерода, располагающихся в узлах решетки кремния непосредственно при имплантации при комнатных температурах, зависит от плотности тока ионов. Во-первых, потому, что с ростом плотности тока имплантации растет мгновенная концентрация вакансий, и это способствует переходу примеси в узлы решетки. Во-вторых, с ростом плотности тока ионов и соответствующим повышением концентрации неравновесных носителей заряда подавляется процесс вытеснения примесей замещения из узлов решетки междоузельными атомами кремния.

1. North J. C., Gibson W.M. // Appl. Phys. Lett. 1970. Vol. 16. № 3. P. 126.
2. Fladda G., Bjorkqvist K., Eriksson L., Sigard D. // Ibid. 1970. Vol. 16. № 8. P. 313.
3. Erikson L., Davis J.A., Denhartog J. et al. // Can. Nucl. Tech. 1966. Vol. 5. № 1. P. 40.
4. Скакун Н.А., Дикий Н.П., Матяш Н.П., Светашев П.А. // ФТП. 1975. Т. 9. Вып. 4. С. 755.
5. Mayer J.W., Eriksson L., Picraux S.T., Davis J.A. // Can. J. Phys. 1968. Vol. 46. P. 663.
6. Vander Pauw L. J. // Philips Res. Repts. 1958. Vol. 13. № 1. P. 1.
7. Watkins G.D., Corbett J. W. // Disc. Faraday Soc. 1961. № 31. P. 86.
8. Стельмах В.Ф., Ткачев В.Д., Челядинский А.Р. // ФТТ. 1978. Т. 20. Вып. 7. С. 2196.
9. Berezhnov N.I., Stelmakh V.F., Chelyadinskii A.R. // Phys. Stat. Sol. A. 1983. Vol. 78. №2. P. 121.
10. Hirvonen J.K., Eisen F.H. // Appl. Phys. Lett. 1971. Vol. 19. № 1. P. 14. 11. Емцев В.В., Маргорян М. А. // Письма в ЖТФ. 1984. № 10. С. 1063.
12. Berezhnov N.I., Chelyadinskii A.R., Jadan M., Suprun-Belevich Yu.R. // Nucl. Instr. Meth. B. 1993. Vol. 73. № 3. P. 357.

Поступила в редакцию 11.04.06.

Владимир Иванович Плебанович - технический директор НПО «Интеграл».

Алексей Романович Челядинский - доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник кафедры физики полупроводников и наноэлектроники.

Владимир Борисович Оджаев - доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики полупроводников и наноэлектроники.