

ДИФФУЗИЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ ИЗ ОБЛАСТИ УПРУГОГО ТОРМОЖЕНИЯ ИОНОВ ФОСФОРА В КРЕМНИИ

Колодин Л. Г., Мукашев Б. Н., Смирнов В. В., Чихрай Е. В.

Определены энергетические уровни и термическая устойчивость радиационных дефектов, возникающих за границей n - p -переходов, полученных имплантацией ионов фосфора в кремний p -типа. Предполагалось, что наблюдаемые на глубинах ~ 870 нм дефекты являются комплексами вакансий с атомами кислорода. Образование таких центров возможно вследствие диффузии вакансий из зоны генерации дефектов (20–25 нм) в объем материала с последующим захватом их атомами кислорода. Проведена оценка диффузионной длины вакансии $L \approx 0.01$ мкм.

Известно, что вследствие имплантации ионов происходит изменение различных свойств полупроводников на глубинах $\sim 10^3$ – 10^4 нм от облученной поверхности [1–3]. Однако до настоящего времени практически отсутствуют экспериментальные данные о свойствах дефектов, ответственных за изменения параметров кристаллов на больших глубинах. Целью настоящей работы является определение положения энергетических уровней, термической устойчивости и природы радиационных дефектов, возникающих за границей кремниевых n - p -переходов, полученных внедрением ионов фосфора. Измерения проводились методом нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (НЕСГУ), позволяющим получать информацию о свойствах дефектов с глубиной ≥ 10 нм от границы переходов [4].

Исходные образцы кремния, выращенного в кварцевых тиглях ($\rho \sim 5$ Ом·см), облучались ионами фосфора с энергиями 5 или 40 кэВ интенсивностью 0.1 мкА/см² и дозой до 10^{14} см⁻² при 300 К. После облучения образцы выдерживались при 300 °С в течение 15 мин. Глубина залегания перехода определялась из измерений поверхностной концентрации носителей и удельного сопротивления в сочетании с послойным удалением ионно-легированного слоя. Толщина стравливаемого окисла контролировалась по данным эллипсометрии. Для энергий внедренных ионов 5 и 40 кэВ глубины залеганий переходов оказались равными 20 ± 5 и 70 ± 10 нм соответственно. Для определения профиля дефектов производилась запись спектров НЕСГУ при различных величинах напряжения обратного смещения $U_{см}$. Времена считывающих стробоскопических импульсов, отсчитываемых от заднего фронта инжектирующего импульса, при определении профиля дефектов удовлетворяли соотношению $t_2/t_1 = 3$ [5], причем $t_2 = 1.64 \cdot 10^{-3}$ с. Следует отметить, что удаление слоя толщиной 150 нм для образцов, облученных ионами с энергией 5 кэВ, и запись спектров с использованием барьера Шоттки приводили к наблюдению уровней радиационных дефектов, которые были обнаружены в кристаллах с n - p -переходами.

На рис. 1 представлены данные по изохронному отжигу дефектов (центры захвата основных носителей — дырок) и спектры, записанные после выдержки кристаллов при температурах 320 и 400 °С. Указанные на рис. 1 концентрации соответствуют толщине обедненного слоя 860 нм и являются усредненными по этому слою. Значение толщины обедненного слоя определялось из вольтфарадных характеристик n - p -перехода. После отжига при 320 °С наблюдаются дефекты с уровнями $H1$ ($E_c + 0.18$ эВ), $H2$ ($E_c + 0.25$ эВ) и $H3$ ($E_c + 0.36$ эВ) (точ-

новость в определении уровней ± 0.01 эВ). При температурах ≥ 350 °C одновременно с исчезновением $H3$ наблюдается некоторое увеличение концентрации центров $H1$ и $H2$, а также появляются центры $H4$ ($E_v + 0.30$ эВ) и $H5$ ($E_v + 0.40$ эВ). Полный отжиг дефектов происходит при $T_{отж} \geq 500$ °C. В образцах, полученных внедрением ионов с энергией 40 кэВ, наблюдаются такие же центры, но эффективность их введения приблизительно в 5 раз выше.

Сравнение зависимости концентрации наблюдаемых дефектов от температуры отжига с данными работ [6, 7] позволяет предположить, что эти центры представляют собой комплексы вакансий с атомами кислорода, а доминирующий после облучения дефект $H3$ может быть идентифицирован как комплекс дивакансия—атом кислорода. Для определения областей локализации вне-

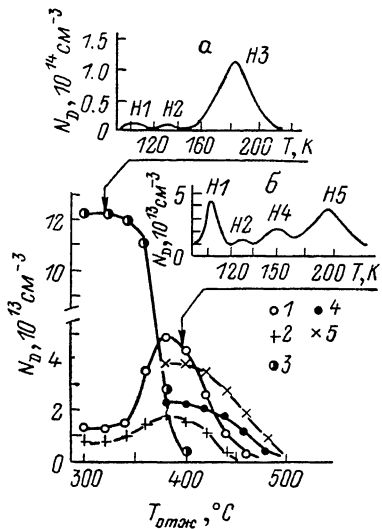


Рис. 1. Изохронный отжиг ($t=15$ мин) радиационных дефектов в кремнии p -типа, облученном ионами фосфора с энергией 5 кэВ, дозой 10^{14} см $^{-2}$.

а, б — спектры глубоких уровней дефектов после отжига образцов при 320 (а) и 400 °C (б), $U_{см}=5$ В. 1 — $H1$, 2 — $H2$, 3 — $H3$, 4 — $H4$, 5 — $H5$.

ренного фосфора и генерации дефектов изучались профили распределения атомов фосфора и радиационных нарушений для случая внедрения ионов с энергией 5 кэВ и дозой 10^{14} см $^{-2}$ (рис. 2). Распределение атомов фосфора измерялось путем непрерывной регистрации соответствующего оже-пика в ходе распыления поверхности кремния пучком ионов аргона, а распределение радиационных нарушений получено из измерений показателя преломления кремния методом эллипсометрии в сочетании с послойным стравливанием. На рис. 2

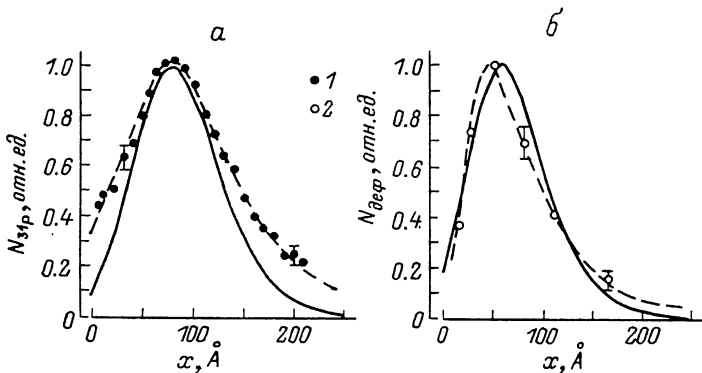


Рис. 2. Профили распределений атомов фосфора (а) и радиационных нарушений (б).

1 — данные оже-спектроскопии, 2 — данные эллипсометрии; сплошная кривая — расчет для случая внедрения ^{31}P с энергией 5 кэВ в аморфный кремний.

приведены теоретические и экспериментальные кривые распределений. Методика обработки экспериментальных данных подробно изложена в работе [8]. Полученные значения модального максимума $R_{мод}$ (расстояние от поверхности до максимума распределения), а также первых трех моментов распределения — среднепроективного пробега R_p , продольного страглинга ΔR_p и скошенности S_k -момента, учитывающего асимметрию распределения, оказались равными: а) для профиля атомов фосфора $R_{мод}=7.6$ нм, $R_p=9.4$ нм, $\Delta R_p=8.3$ нм, $S_k=1.37$; б) для профиля дефектов $R_{мод}=4.8$ нм, $R_p=7.5$ нм, $\Delta R_p=3.7$ нм, $S_k=0.71$.

Из результатов, представленных на рис. 2, видно, что внедренные атомы фосфора и связанные с ними радиационные нарушения в основном локализованы

в приповерхностном слое толщиной 20–25 нм, что достаточно хорошо соответствует глубине залегания n - p -перехода.

Профиль распределения дефекта с уровнем $H3$, полученный из измерений спектров методом НЕСГУ, приведен на рис. 3. Образование наблюдаемых вакансионных комплексов на глубинах до 870 нм возможно вследствие диффузии вакансий из зоны торможения ионов в объем кристалла и их захвата атомами кислорода, растворенными в кремнии. В работе [9] было получено выражение для установившегося профиля распределения, не зависящее от времени, для случая диффузии из тонкого приповерхностного слоя с учетом скорости распыления материала мишени v

$$C(x) = C_s \exp\{-vL/D_0 [\exp(x/L) - 1]\}, \quad (1)$$

здесь $C(x)$ — концентрация примеси (в нашем случае — концентрация дефектов на глубине x), L — диффузионная длина вакансий, D_0 — коэффициент

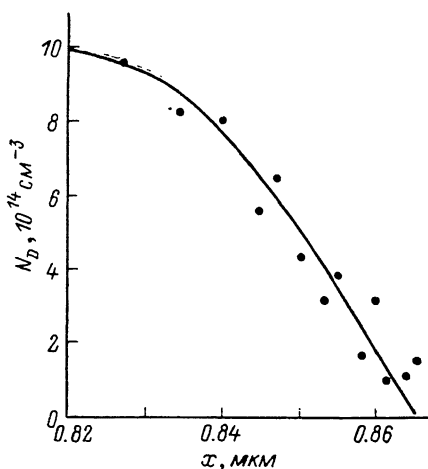


Рис. 3. Профиль распределения дефекта с уровнем $H3$ в кремнии p -типа, облученном ионами фосфора с энергией 40 кэВ, дозой 10^{14} см^{-2} , полученный по данным НЕСГУ, $U_{\text{max}}=8 \text{ В}$.

диффузии у поверхности, C_s — концентрация примеси на поверхности. Диффузионная длина вакансий, определенная графически по наклону прямой

$$\ln |d \ln C(x)/dx| = \ln(v/D_0) + (x/L), \quad (2)$$

уравнение которой получено из (1), оказалась равной $L=0.01$ мкм. В рамках упрощенной модели [9] найденная величина L находится в хорошем соответствии с данными работы [10].

Л и т е р а т у р а

- [1] Успенская Г. И., Абрашова Н. Н., Тетельбаум Д. И., Зорин Е. И., Павлов П. В. — В кн.: Физические основы ионно-лучевого легирования. Горький, 1972, с. 96–99.
- [2] Bertolotti M., Sette D., Stagni L., Vitali G. — Rad. Eff., 1977, v. 15, N 1, p. 31–37.
- [3] Аброян И. А., Дубро В. В., Ильин И. А., Привалова Е. А., Титов А. И. — Электрон. техн., 1981, сер. 2, № 4, с. 36–40.
- [4] Kimerling L. C. — J. Appl. Phys., 1974, v. 45, N 4, p. 1839–1845.
- [5] Колодин Л. Г., Кондратенко Г. А., Мукашев Б. Н., Смирнов В. В., Чихрай Е. В. — ПТЭ, 1985, № 4, с. 246.
- [6] Lee J. H., Corbett J. W. — Phys. Rev. B, 1976, v. 13, N 6, p. 2653–2666.
- [7] Козлов И. Н., Литвинко А. Г., Лугаков П. Ф., Мишук С. В., Ткачев В. Д. — ФТП, 1973, т. 6, в. 10, с. 2048–2050.
- [8] Мукашев Б. Н., Чокин К. Ш., Гусаинов Ж. А., Нусупов К. Х., Токмолдин С. Ж. — Поверхность, Физика, химия, механика, 1983, № 11, с. 131–137.
- [9] Strack H. — J. Appl. Phys., 1963, v. 34, N 8, p. 2405–2409.
- [10] Maby E. W. — J. Appl. Phys., 1976, v. 47, N 3, p. 830–837.

Институт физики высоких энергий
АН КазССР
Алма-Ата

Получена 5.07.1985
Принята к печати 14.10.1987