

ДИФФУЗИЯ ФОСФОРА В КАРБИДЕ КРЕМНИЯ

Е. Н. Мохов, Е. Д. Горнушкина, В. А. Дидик, В. В. Козловский

Фосфор [^{1, 2}] является донорной примесью в карбиде кремния. Однако его влияние на свойства этого материала изучено слабо, что объясняется значительными трудностями контролируемого получения образцов SiC <P>. Монокристаллы и эпитаксиальные слои SiC, легированные фосфором при выращивании, обычно содержат в качестве фоновой примеси азот на уровне, сравнимом с концентрацией фосфора [²], растворимость которого в карбиде кремния относительно невелика ($C_p < 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$). Проблему получения образцов SiC <P> с малым содержанием азота частично удалось решить, вводя фосфор в SiC методом нейтронного трансмутационного легирования [³]. При этом удалось определить энергию ионизации фосфора в SiC, его положение в решетке [³]. Фосфор в карбид кремния может быть введен также путем диффузии. Однако до сих пор в литературе отсутствуют сведения о параметрах диффузии фосфора в SiC. Известно [⁴], что заметная скорость диффузии примесей в карбиде кремния наблюдается лишь при температурах выше 2000 °С, при которых возможно частичное испарение образца. Скорость испарения заметно возрастает в присутствии паров фосфора [¹], что сильно затрудняет изучение диффузии фосфора в SiC из паровой фазы. Чтобы избежать этого, в настоящей работе для оценки диффузионной подвижности фосфора в SiC использовались образцы, содержащие фосфор, введенный методом трансмутационного легирования на заряженных высокоэнергетических частицах. Исследовалось изменение концентрационного профиля фосфора в образце при высокотемпературном отжиге.

Результаты, полученные подобной методикой, более адекватно отражают процесс твердофазной диффузии, поскольку в данном случае примесные центры не вводятся через границу раздела фаз, а диффузия осуществляется только за счет термической активации атомов, находящихся в регулярных позициях в объеме кристалла. Тем самым сводится к минимуму вероятность участия в диффузионном потоке состояний примеси, генерируемых на поверхности. Полученные данные характеризуют диффузию в собственном полупроводнике, так как концентрация трансмутированного фосфора $C_p \ll n_i$ (n_i — плотность собственных носителей заряда).

При трансмутационном легировании вводятся также радиационные дефекты. Однако они в основном отжигаются при $T < 2000$ °С [⁵] и их влиянием на скорость миграции примеси при более высоких температурах, очевидно, можно пренебречь.

Ранее проведенное таким образом исследование диффузии фосфора в кремнии с применением ядерно-легированных слоев позволило получить данные, неплохо коррелирующие с известными из литературы [⁶].

Использовались образцы SiC политаипа 6Н, выращенные методом Лели, преимущественно *n*-типа проводимости, легированные азотом, с концентрацией нескомпенсированных доноров $(N_D - N_A) = (2 \div 4) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. В ряде экспериментов применялись также сильно легированные алюминием ($C_{Al} = 5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$) образцы дырочного SiC.

Для трансмутационного введения фосфора образцы облучались альфа-частицами с энергией 16 и 20 МэВ при плотности тока $j = 0.1 \text{ мкА/см}^2$. Для получения более резкого концентрационного профиля фосфора облучение проводилось при косом падении пучка под углом $\varphi = 6 \div 30^\circ$. Трансмутационное легирование осуществлялось за счет ядерной реакции $^{29}\text{Si}(\alpha, p)^{32}\text{P}$.

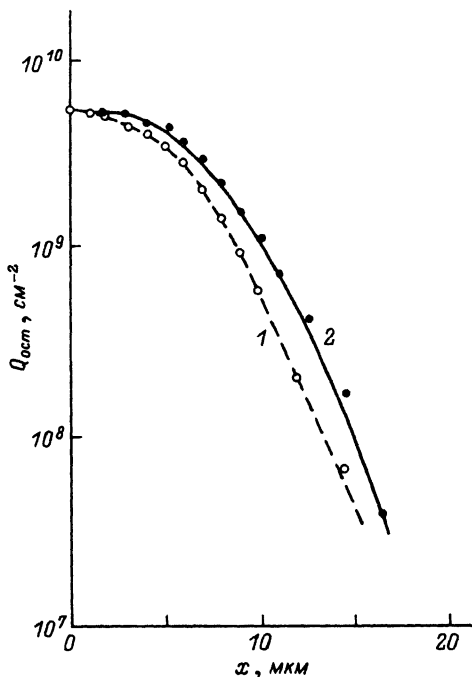


Рис. 1. Профиль остаточной концентрации фосфора в n -SiC, облученном альфа-частицами.

Энергия альфа-частиц 20 МэВ, угол падения пучка $\varphi = 6^\circ$. 1 — до отжига, 2 — после отжига при 2450 °C в течение 3 ч.

После облучения образцы отжигались в замкнутых графитовых контейнерах в атмосфере аргона при температуре 2000—2600 °C. Для уменьшения испарения образцы располагались в изотермической зоне, окруженной со всех сторон мелкодисперсным порошком SiC. Время отжига варьировалось от 30 мин до 10 ч. Толщина испаренного слоя SiC в процессе отжига не превышала 2—3 мкм.

Концентрационный профиль фосфора определялся путем измерения остаточной β -активности образцов при последовательном снятии поверхностных слоев методом химического травления в расплаве щелочи КОН. Толщина слоев ~1 мкм. Профиль радиоактивного фосфора одновременно анализировался и в контрольном образце, который не подвергался диффузионному отжигу.

Согласно полученным результатам, заметные изменения концентрационного профиля выявляются лишь при температурах отжига выше 2400 °C (рис. 1). Из полученных данных определялся коэффициент диффузии в предположении, что выполняется закон Фика. Для этого рассматривалась одномерная диффузия в полупространстве с непроницаемой границей. Для остаточного количества вещества $Q(x, t)$ имеем [6]

$$Q(x, t) = Q_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} + \frac{1}{2\sqrt{\pi Dt}} \int_0^\infty Q(\xi, 0) \left[\exp\left(-\frac{(x-\xi)^2}{4Dt}\right) - \right.$$

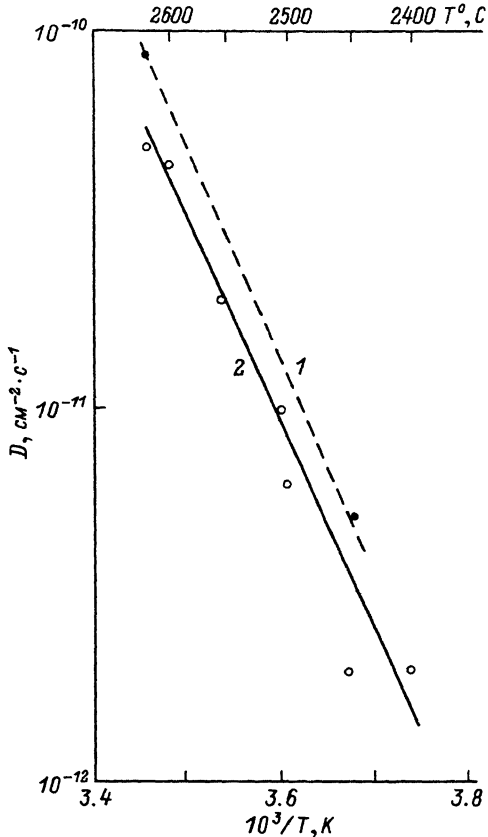


Рис. 2. Зависимость коэффициента диффузии фосфора в SiC от температуры.

1 — p -тип проводимости, легированный Al с $(N_A - N_D) = 5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$; 2 — n -тип проводимости, легированный азотом с $(N_D - N_A) = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

$$- \exp \left(- \frac{(x + \xi)^2}{4Dt} \right) d\xi,$$

где $Q(\xi, 0)$ — исходный профиль остаточного количества примеси. Граничные условия: $Q(0, t) = Q_0 = \text{const}$, $Q(x, 0) = Q(\xi, 0)$, $Q(\infty, t) = 0$.

Из этого соотношения был найден коэффициент диффузии фосфора, температурная зависимость которого для n -SiC <N> описывается выражением

$$D_p = 1.3 \cdot 10^{10} \exp(-11.6 \text{ эВ}/kT) \text{ см}^2/\text{с}.$$

В сильнолегированном алюминии p -SiC скорость диффузии фосфора несколько выше (рис. 2).

Обращает на себя внимание очень высокая величина энергии активации диффузии фосфора, которая выше, чем для самодиффузии в n -SiC кремния ($\Delta E = 8.18$ эВ) [7] и углерода ($\Delta E = 8.2$ эВ) [8].

Отметим, что в исследованном диапазоне температур D_p по величине ближе к значению коэффициента самодиффузии кремния. В то же время коэффициент самодиффузии углерода на 2—3 порядка выше [8]. Отсюда можно было бы предположить, что миграция фосфора осуществляется по вакансиям Si. Однако в рамках этой модели трудно понять причину более высокой скорости миграции фосфора в сильнолегированном p -SiC <Al> по сравнению с образцами n -типа проводимости. Известно, что вакансии кремния в SiC заряжены отрицательно [4, 7, 8] и, следовательно, их концентрация должна снижаться с увеличением концентрации акцепторной примеси, приводя к уменьшению подвижности P. На самом деле наблюдается обратный эффект, свидетельствующий скорее в пользу механизма диффузии фосфора с участием углеродных вакансий. В этой связи отметим, что энергия активации диффузии фосфора не сильно отличается от ранее установленной величины ΔE для диффузии азота [9], который замещает в решетке SiC углерод и, очевидно, мигрирует по вакансиям углерода.

Список литературы

- [1] Lilov S. K. // Cryst. Res. and Technol. 1982. V. 17. N 1. P. K17—K20.
- [2] Мохов Е. Н., Усманова М. М., Юлдашев Г. Ф., Махмудов Б. С. // Изв. АН СССР. Неорг. мат. 1981. Т. 17. № 2. С. 258—261.
- [3] Вейнгер А. И., Забродский А. Г., Ломакина Г. А., Мохов Е. Н. // ФТТ. 1986. Т. 28. № 6. С. 1659—1664.
- [4] Vodakov Yu. A., Mokhov E. N. // Silicon Carbide-1973. South Carolina Univ. Press, 1974. P. 508—519.
- [5] Гирка А. И., Мокрушин А. Д., Мохов Е. Н., Осадчиев В. М., Свирида С. В., Шишкин А. В. // ЖЭТФ. 1990. Т. 97. № 2. С. 578—590.
- [6] Горнушкина Е. Д., Дидик В. А., Козловский В. В., Малкович Р. Ш. // ФТП. 1991. Т. 25. № 11. С. 2044—2046.
- [7] Hong J. D., Davis R. F., Newbury D. E. // J. Mater. Sci. 1981. V. 16. N 9. P. 2485—2496.
- [8] Hong J. D., Davis R. F. // J. Amer. Ceram. Soc. 1980. V. 63. N 5. P. 546—552.
- [9] Kroko L. J., Milnes A. G. // Sol. St. Electron. 1966. V. 9. N 11/12. P. 1125—1134.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе РАН
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
28 января 1992 г.