

усиливается. При концентрациях выше 0.1 % Mn полоса в области 700 нм исчезает, усиливается полоса в области 628 нм и смещается в длинноволновую область спектра. Полоса в области 700 нм ярко проявляет себя также при $T = 4.2$ К в неактивированных кристаллах. По-видимому, эта полоса обусловлена мелкими локальными состояниями, которые с ростом температуры полностью высвобождаются. С ростом температуры от 77 до 300 К происходит сильное тушение люминесценции, при комнатной температуре свечение практически отсутствует.

Кристаллы $\text{Ga}_2\text{S}_3\langle\text{Eu}\rangle$ также светятся ярким зеленым свечением при их возбуждении постоянным и переменным электрическими полями. Были изучены полевая и частотная зависимости интенсивности электролюминесценции [7]. С ростом частоты f от 50 до 3500 Гц яркость свечения увеличивается, а при высоких частотах яркость не зависит от частоты.

Список литературы

- [1] Жузе В. П., Сергеева В. М., Шелых А. Н. // ФТТ. 1960. Т. 2. В. 11. С. 2558—2871.
- [2] Nasredinov F. S., Masterov V. F., Saidov C. S., Seregin P. P., Troitskya N., Tshirner H. U. // Phys. St. Sol. (a). 1988. V. 107. P. 291.
- [3] Askerov J. M., Aslanov G. K., Tagiev B. G., Mekhrabov A. O., Nakhmetov S. M. // Phys. St. Sol. (a). 1988. V. 105. N 2. P. K151—K154.
- [4] Аскеров И. М., Асламов Г. К., Насреддинов Ф. С., Тагиев Б. Г. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 6. С. 1083—1087.
- [5] Аскеров И. М., Мастеров В. Ф., Романов В. В., Штельмах К. Ф. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 7. С. 1305—1307.
- [6] Аскеров И. М., Кобелев В. Ф., Мастеров В. Ф., Тагиев О. Б., Штельмах К. Ф., Лихолит И. Л. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 7. С. 1307—1309.
- [7] Вершагин И. К., Ковалев Б. А., Косяченко Л. А., Кокоев С. М. Электролюминесцентные источники света. М., 1990. 168 с.

Азербайджанский
инженерно-строительный институт
Баку

Получено 10.06.1991
Принято к печати 19.06.1991

ФТП, том 25, вып. 11, 1991

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФОСФОРА, СОЗДАННОГО В КРЕМНИИ ОБЛУЧЕНИЕМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫМИ α -ЧАСТИЦАМИ

Горнушкина Е. Д., Дидик В. А., Козловский В. В., Малкович Р. Ш.

Наряду с традиционными методами легирования полупроводников — в процессе выращивания, посредством диффузии, путем ионной имплантации — все большее внимание привлекает в последнее время метод трансмутационного легирования. Обычно такое легирование осуществляется на тепловых нейтронах. Перспективным представляется использование для этой цели высокоэнергетичных заряженных частиц, в частности ядер гелия и протонов, что не только позволяет расширить круг легирующих примесей, но и в отличие от нейтронов, обладающих высокой проникающей способностью, дает возможность локального легирования материала. Указанная возможность была использована в настоящей работе для создания профиля примеси и исследования диффузионного перераспределения этой примеси в объеме кристалла.

Образцы монокристаллического кремния КЭФ-5 облучались α -частицами с энергиями $E = 12, 16$ и 20 мэВ дозой $\sim 10^{15}$ см $^{-2}$ на малогабаритном циклотроне МГЦ-20 при плотности тока 0.1 мкА/см 2 [1]. Облучение проводилось как при нормальном, так и при косом падении пучка (углы наклона к поверхности образца 18 и 6 град).

В результате ядерных реакций $^{29}\text{Si}(\alpha, p)^{32}\text{P}$ ($E_{\alpha} = 2.8$ МэВ), $^{30}\text{Si}(\alpha, p)^{33}\text{P}$ ($E_{\alpha} = 3.4$ МэВ) и $^{30}\text{Si}(\alpha, pn)^{32}\text{P}$ ($E_{\alpha} = 44.6$ МэВ, E_n — порог ядерной реакции)

В кремнии образовывались радиоактивные β -изотопы фосфора [2]. Профиль фосфора определялся методом снятия тонких слоев и измерения остаточной β -активности образца. Слои снимались в смеси 1 HCl : 10HNO₃, толщина слоев варьировалась от 0.2 до 3 мкм. Используемая методика позволяла выделять излучение изотопа ³²P. Равномерность легирования по сечению образца контролировалась автордиографическим методом.

Как показывают полученные результаты, профили концентрации изотопа ³²P простираются до глубины 10–60 мкм, при этом глубина профиля уменьшается с уменьшением энергии α -частиц и угла наклона пучка к поверхности образца (рис. 1). Обращает на себя внимание максимум на профиле концентрации фосфора при $E = 20$ МэВ. Такой вид профиля обусловлен немонотонным характером зависимости сечения ядерной реакции σ от энергии α -частиц — наличием максимума на кривой $\sigma(E)$ [3]. Отсутствие максимума на профиле фосфора при 16 и 12 МэВ связано, по-видимому, с тем обстоятельством, что этим энергиям соответствуют положительные значения производной $d\sigma/dE$. Отметим, что максимум на профиле концентрации ранее наблюдался нами при трансмутационном легировании арсенида галлия [4].

Для исследования диффузии фосфора, введенного в кремний трансмутацион-

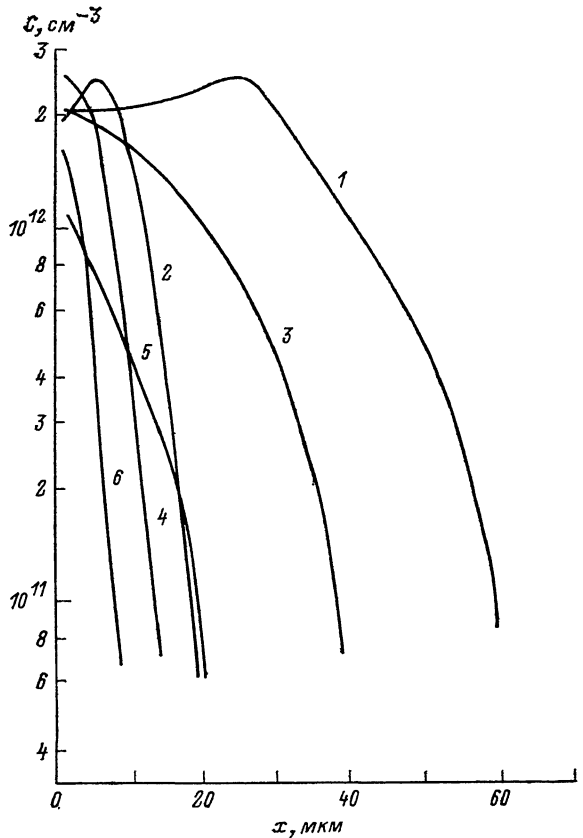


Рис. 1. Концентрационные профили изотопа ³²P в кремнии. Энергия α -частиц, МэВ: 1, 2 — 20; 3, 4 — 16; 5, 6 — 12. Угол наклона пучка, град: 1–3 — 18, 4–6, — 6.

ным легированием, образцы подвергались отжигу при 1100 и 1150 °C на воздухе в течение 25, 50 и 75 ч. Отжиг приводил к более глубокому проникновению фосфора в глубь образца, однако общее количество фосфора в образец оставалось практически постоянным (рис. 2). Предполагая, что диффузия фосфора подчиняется закону Фика, мы определили коэффициент диффузии фосфора в кремнии D . Рассматривая одномерную диффузию в полупространстве с непроницаемой границей, мы решали при этом уравнение для остаточного количества вещества $Q(x, t) = \int_x^\infty C(\xi, t) d\xi$:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2}$$

(C — концентрация фосфора). Полученное решение имеет вид

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

где $Q(\xi)$ — исходный профиль остаточного количества фосфора, Q_0 — общее количество фосфора, $Q_0 = Q(0, t) = \text{const}$.

Сопоставляя экспериментальные профили $Q(x, t)$ с расчетными (рис. 2), мы определили значение коэффициента диффузии фосфора в кремнии: $D = 3 \cdot 10^{-13}$ см²/с для 1100 °С и $1 \cdot 10^{-12}$ см²/с для 1150 °С.

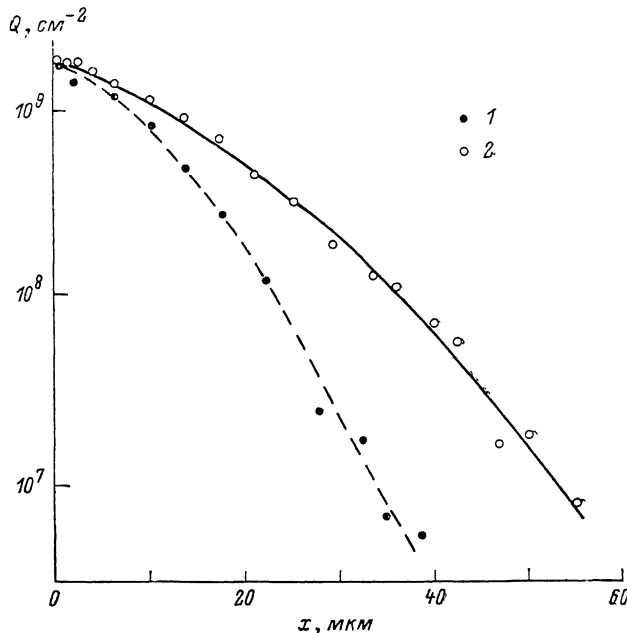


Рис. 2. Распределение остаточного количества изотопа ^{32}P в кремнии.

Исходное распределение: 1 — после облучения α -частицами с энергией 16 МэВ (угол 6 град), 2 — после отжига ($T=1150$ °С, $t=75$ ч). Точки — экспериментальные данные, сплошная линия — расчет, штриховая линия проведена по экспериментальным точкам.

Учитывая, что концентрация фосфора, введенного трансмутационным легированием (рис. 1), была намного ниже собственной концентрации носителей тока при температуре диффузии, мы сравнили полученные значения D с литературными данными для коэффициента диффузии фосфора в собственном кремнии [5]: $D = (4.5 \div 7.4) \cdot 10^{-14}$ и $(1.2 \div 2) \cdot 10^{-13}$ см²/с соответственно. Как видно, наши значения D в несколько раз превосходят значения, приведенные в литературе. Такое различие, на наш взгляд, может быть связано с обусловленной воздействием α -облучения дефектностью структуры кремния, приводящей к ускорению диффузии примесей.

Список литературы

- [1] Афонин О. Ф., Викторов Б. В., Забродин Б. В., Козловский В. В., Марущак Н. В., Шустров Б. А. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 1. С. 56—61.
- [2] Селинов И. П. // Изотопы. М., Т. 1. 623 с.
- [3] Münzel H., Lange I. // Uses of Cyclotrons in Chemistry, Metallurgy and Biology / Ed. by C. V. Amphlett. London, Buttersworths, 1969. P. 373—380.
- [4] Дидик В. А., Козловский В. В., Малкович Р. Ш., Скоряткина Е. А., Шустров Б. А. // Письма ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 12. С. 19—21.
- [5] Ghoshtagore R. N. // Phys. Rev. B. 1971. V. 3. N 2. P. 389—396.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Санкт-Петербург

Получено 10.06.1991
Принято к печати 19.06.1991