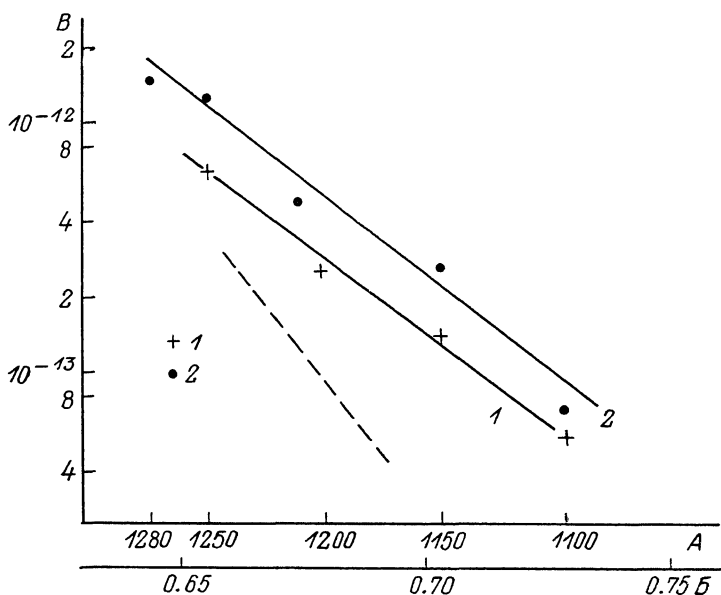


ДИФФУЗИЯ ЭРБИЯ И ТУЛИЯ В КРЕМНИИ

Назыров Д. Э., Куликов Г. С., Малкович Р. Ш.

Перспективы повышения термической и радиационной стабильности кремния в существенной мере обусловили интерес к легированию кремния редкоземельными элементами (РЗЭ) [1-3]. В связи с этим заслуживает внимания исследование диффузии РЗЭ в кремнии. Пока, однако, число таких исследований ограничено, а их результаты в ряде случаев противоречивы или же сомнительны. Выполненные нами эксперименты по диффузии празеодима [4], а также результаты исследования диффузии скандия в кремнии [5] указывают на то, что обе эти примеси подобно другим элементам III группы (B, Al, Ga, In) перемещаются



Температурная зависимость коэффициентов диффузии эрбия (1) и тулия (2) в кремнии. Штриховая линия — то же для эрбия по данным [6]. А — температура, °C; B — $10^3/T$, K⁻¹; B — D, см²/с.

в кремнии по узлам кристаллической решетки. В настоящем сообщении приводятся данные выполненного нами исследования диффузии РЗЭ эрбия и тулия в кремнии. Ранее диффузия этих элементов изучалась лишь косвенным методом [6], в настоящем же сообщении использован прямой, радиоактивный, метод.

На поверхность образцов кремния *n*-типа ($\rho = 15$ Ом·см, площадь ~ 1.5 см², толщина ~ 350 мкм) наносился из раствора слой хлорида эрбия или тулия, содержавшего радиоактивный изотоп ^{169}Er или ^{170}Tm соответственно. Диффузионный отжиг проводился на воздухе в интервале 1100—1280 °C в течение 5—24 ч. После отжига образцы многократно промывались в плавиковой кислоте, а также в смеси $\text{H}_2\text{O}_2 : \text{HCl}$. Профиль диффузанта определялся методом секционирования — травливания тонких слоев (в растворе $1\text{HF} : 40\text{HNO}_3$ с промывкой в смеси $\text{H}_2\text{O}_2 : \text{HCl}$) и измерения остаточной β -активности образца. Толщина снятых слоев (0.1—0.5 мкм) определялась взвешиванием образца. Авторадиограммы, снятые в процессе секционирования образца, свидетельствовали о равномерном распределении примесей по сечению образца и об отсутствии включений.

В предположении, что соблюдается закон Фика и что поверхностная концентрация примеси не меняется со временем (диффузия из постоянного источника

в полограниченном теле), мы определили коэффициенты диффузии D эрбия и тулия в кремнии. С этой целью экспериментальная кривая остаточного количества примеси, как и в работе [4], аппроксимировалась теоретической кривой для диффузии из постоянного источника:

$$Q(x) = 2c_0 \sqrt{Dt} \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}},$$

где c_0 — поверхностная концентрация, x — суммарная толщина снятых слоев, t — время диффузии.

Как следует из полученных данных (см. рисунок), коэффициент диффузии эрбия в кремнии увеличивается по мере роста температуры от $\sim 6 \cdot 10^{-14}$ до $\sim 7 \cdot 10^{-13}$ см²/с, а тулия — от $\sim 7 \cdot 10^{-14}$ до $\sim 2 \cdot 10^{-12}$ см²/с. Температурная зависимость коэффициента диффузии может быть при этом описана соотношениями

$$D_{\text{Er}} = 2 \cdot 10^{-8} \exp\left(-\frac{2.9 \text{ эВ}}{kT}\right) \text{ см}^2/\text{с} \quad (1100-1250 \text{ }^\circ\text{C}),$$

$$D_{\text{Tm}} = 8 \cdot 10^{-8} \exp\left(-\frac{3.0 \text{ эВ}}{kT}\right) \text{ см}^2/\text{с} \quad (1100-1280 \text{ }^\circ\text{C}).$$

Поверхностные концентрации эрбия и тулия располагаются в интервале $3 \times 10^{18} - 5 \cdot 10^{19}$ см⁻³.

Полученные нами значения коэффициентов диффузии эрбия и тулия существенно превышают данные [6], согласно которым в интервале 1100—1250 °С коэффициент диффузии эрбия располагается в диапазоне значений $6 \cdot 10^{-15} - 4 \cdot 10^{-13}$ (см. рисунок), а тулия — $1 \cdot 10^{-18} - 2 \cdot 10^{-16}$ см²/с. Достоверность данных [6], на наш взгляд, представляется, однако, сомнительной, поскольку полученные в [6] значения энергии активации диффузии (4.96 для Er и 6.08 эВ для Tm, а также 8.62 для Gd и 9.03 эВ для Tb) явно завышены даже по сравнению с энергией активации самодиффузии кремния (~ 4.7 эВ [7]).

Мы полагаем, что полученные нами значения как коэффициентов диффузии, так и энергии активации диффузии эрбия и тулия свидетельствуют о том, что эти примеси, как и упомянутые выше празеодим и скандий, мигрируют в кремнии подобно другим элементам III группы по узлам кристаллической решетки.

Список литературы

- [1] Mandelkorn J., Schwartz L., Broder J., Kautz H., Ulman R. // J. Appl. Phys. 1964. V. 35. N 7. P. 2258—2260.
- [2] Баграев Н. Т., Власенко Л. С., Волле В. М., Воронков В. Б., Грехов И. В., Добровенский В. В., Шагун А. И. // ЖТФ. 1984. Т. 54. В. 5. С. 917—928.
- [3] Назыров Д. Э., Регель А. Р., Куликов Г. С. // Препринт ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР. Л., 1987. № 1122.
- [4] Назыров Д. Э., Усачева В. П., Куликов Г. С., Малкович Р. Ш. // Письма ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 12. С. 1102—1104.
- [5] Азимов Г. К., Зайнабидинов С., Назыров Д. Э. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 3. С. 556—557.
- [6] Агеев В. В., Аксенова Н. С., Коковина В. Н., Трошина Е. П. // Изв. ЛЭТИ. 1977. В. 241. С. 80—85.
- [7] Frank W., Güsele U., Mehrer H., Seeger A. // Diffusion in Crystalline Solids / Ed. by G. E. Murch and A. S. Nowick. N. Y., 1984. P. 76.

Научно-исследовательский институт
прикладной физики
при ТГУ им. В. И. Ленина
Ташкент

Получено 18.04.1991
Принято к печати 23.04.1991