

Диффузия тербия в кремнии

© Д.Э. Назыров[¶]

Национальный университет Узбекистана им. М. Улугбека,
700174 Ташкент, Узбекистан

(Получена 20 сентября 2005 г. Принята к печати 31 октября 2005 г.)

Исследована диффузия тербия в кремнии в интервале температур 1100–1250°C с использованием впервые прямого метода — метода радиоактивных изотопов. Установлены диффузионные параметры тербия в кремнии.

PACS: 61.72.Tt; 66.30.Jt; 81.40.Ef

Легирование кремния определенными примесями, в частности редкоземельными элементами (РЗЭ), представляет значительный интерес для разработки оптоэлектронных структур. РЗЭ, введенные в кремниевую матрицу, повышают термическую и радиационную стойкость, а также позволяют создать приборные структуры с люминесцентными свойствами в широком спектральном диапазоне для последующего развития кремниевой оптоэлектроники [1,2].

В данном сообщении приводятся результаты исследования диффузии тербия в кремнии с использованием впервые прямого метода — метода радиоактивных изотопов. Ранее диффузия этого элемента в кремнии изучалась косвенным методом [3,4], а также методом нейтронно-активационного анализа [4].

На поверхность образцов кремния *n*-типа ($\rho = 15 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, площадь $\sim 1.5 \text{ см}^2$, толщина $\sim 380 \text{ мкм}$) наносился слой хлорида тербия или напылялся слой примеси, содержащий окисел радиоактивного изотопа тербия — $^{160}\text{Tb}_2\text{O}_3$. Ампулы с расположенными в них образцами помещались в диффузионную печь СДО-1, снабженную программным регулятором температуры РЕПИД, обеспечивающим точность поддержания температуры $\pm 1^\circ\text{C}$.

Диффузионный отжиг проводился на воздухе, в вакуумированных ампулах ($\sim 10^{-4} \text{ мм рт.ст.}$), а также в откачанных ампулах в атмосфере аргона в интервале температур 1100–1280°C. Длительность диффузионного отжига изменялась в зависимости от температуры диффузии от 5 до 72 ч.

После диффузионного отжига образцы многократно промывались в плавиковой кислоте, царской водке, а также в кипящей смеси $\text{H}_2\text{O}_2:\text{HCl}$. Такая промывка обычно позволяет практически полностью удалить оставшийся на поверхности образца источник диффузии. После этого края образца зачищались травлением и промывкой на глубину $\sim 100 \text{ мкм}$, значительно превышающую глубину диффузии ($\sim 10 \text{ мкм}$). Профиль распределения примеси тербия в кремнии анализировался методом секционирования — стравливания тонких слоев (в растворе $1\text{HF}:50\text{HNO}_3$ с промывкой в смеси $\text{H}_2\text{O}_2:\text{HCl}$) и измерения остаточной активности образца.

Остаточная активность образца измерялась на установке малого фона УМФ-1500М с β -счетчиком СБТ-11 (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург). Толщина снятых слоев (0.05–0.5 мкм) определялась взвешиванием образца.

Авторадиограммы, полученные до и после отжига, а также в процессе снятия слоев, свидетельствовали о равномерном распределении примесей тербия по сечению образца и об отсутствии включений.

Коэффициент диффузии тербия в кремнии D_{Tb} определялся в наших опытах в предположении, что соблюдается закон Фика и что поверхностная концентрация примеси не изменяется со временем (диффузия из постоянного источника). С этой целью экспериментальная кривая остаточного количества примеси, как и в работе [5], аппроксимировалась теоретической кривой для диффузии из постоянного источника:

$$Q(x) = 2C_0\sqrt{Dt} \operatorname{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right),$$

где C_0 — поверхностная концентрация, x — суммарная толщина снятых слоев, t — время диффузии,

$$\operatorname{ierfc}(z) = \int_z^\infty \operatorname{erfc}(y) dy.$$

Как следует из полученных данных, коэффициент диффузии тербия в кремнии D_{Tb} увеличивается по мере роста температуры от $4 \cdot 10^{-14}$ до $10^{-12} \text{ см}^2/\text{с}$. Температурная зависимость коэффициента диффузии носит аррениусовский характер (см. рисунок) и может быть при $T = 1100\text{--}1280^\circ$ описана соотношением

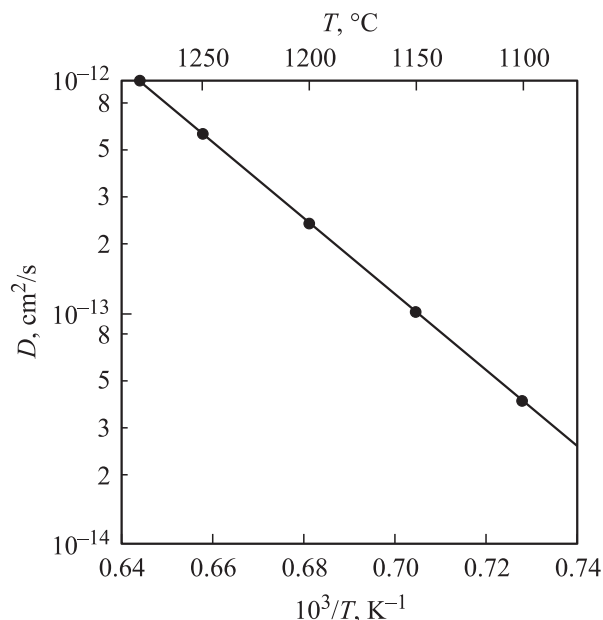
$$D_{\text{Tb}}[\text{см}^2/\text{с}] = 5 \cdot 10^{-2} \exp(-3.3 \text{ эВ}/kT),$$

где 3.3 эВ — энергия активации диффузии.

Поверхностная концентрация тербия составляет при этом величину $10^{18}\text{--}10^{19} \text{ см}^{-3}$. Глубина проникновения тербия в кремний, для оценки которой нами использовалась величина $2\sqrt{Dt}$, во всем исследованном интервале температур порядка нескольких микрометров.

Как показывает анализ полученных данных, коэффициент диффузии в зависимости от температуры, а также

[¶] E-mail: dnazirov2004@mail.ru



Температурная зависимость коэффициента диффузии тербия в кремнии.

энергия активации диффузии тербия в кремнии располагаются в диапазоне значений, характерных для диффузии типичных элементов IIIВ группы Периодической системы Менделеева (бора, алюминия, индия, галлия, таллия), являющихся примесями замещения и диффундирующих по узлам кристаллической решетки [6,7].

Сопоставление наших данных по диффузии тербия в кремнии с результатами по диффузии других РЗЭ в кремнии [5,8–12], полученными с помощью радиоактивной и других методик, показывает, что среда диффузии не влияет существенно на диффузионные параметры РЗЭ в кремнии. На основе полученных значений коэффициентов диффузии и энергии активации диффузии тербия можно сделать заключение, что примесь тербия диффундирует в кремнии по узлам кристаллической решетки.

Список литературы

- [1] Д.Э. Назыров, А.Р. Регель, Г.С. Куликов. Препринт ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН (Л., № 1122, 1987).
- [2] Н.А. Соболев. ФТП, **29** (7), 1153 (1995).
- [3] В.В. Агеев, Н.С. Аксенова, В.Н. Коковина, Е.П. Трошина. Изв. ЛЭТИ, **211**, 80 (1977).
- [4] В.А. Усков, А.И. Родионов, Г.Т. Власенко, А.Б. Федотов. В кн.: *Легированные полупроводниковые материалы* (М., Наука, 1985) с. 80.
- [5] Д.Э. Назыров, В.П. Усачева, Г.С. Куликов, Р.Ш. Малкович. Письма ЖТФ, **14** (12), 1102 (1988).
- [6] Б.И. Болтакс. *Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках* (Л., Наука, 1972).
- [7] W. Frank, U. Gösele, H. Mehrer, A. Seeger. *Diffusion in Crystalline Solids*, ed. by G.E. Murch, A.S. Nowick (N.Y., 1984) p. 76.

- [8] А.И. Борисенко, Ю.М. Волокобинский, В.Н. Коковина, Е.П. Трошина, Л.Ф. Чепик, Т.Н. Фролова. ДАН СССР. Сер. физ. химия, **262** (6), 1409 (1982).
- [9] Г.К. Азимов, С. Зайнабидинов, Д.Э. Назыров. ФТП, **23** (3), 556 (1989).
- [10] Д.Э. Назыров, Г.С. Куликов, Р.Ш. Малкович. ФТП, **25** (9), 1653 (1991).
- [11] Д.Э. Назыров. ФТП, **37** (5), 570 (2003).
- [12] Д.Э. Назыров. ФТП, **37** (9), 1056 (2003).

Редактор Т.А. Полянская

The diffusion of terbium in silicon

D.E. Nazyrova

M. Ulugbek National University of Uzbekistan,
700174 Tashkent, Uzbekistan

Abstract Diffusion of Tb in Si in the temperature range 1100–1280°C, by direct method of radioactive isotopes, has been first explored. The diffusion parameters of Tb impurity in Si were determined.