

Диффузия иттрия в кремнии

© Д.Э. Назыров[¶], М.И. Базарбаев, А.А. Иминов

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

(Получена 24 ноября 2005 г. Принята к печати 12 декабря 2005 г.)

Впервые исследована диффузия иттрия в кремнии. Диффузия проводилась на воздухе или в вакууме в интервале температур 1100–1250°С. Температурная зависимость коэффициента диффузии иттрия в кремнии описывается соотношением $D = 8 \cdot 10^{-3} \exp(-2.9 \text{ эВ}/kT) \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$. Выявлена акцепторная природа иттрия в кремнии.

PACS: 66.30.Jt; 71.55.Cn

Повышение термической и радиационной стабильности кремния при легировании его редкоземельными элементами (РЗЭ) [1,2], а также перспектива использования легированных РЗЭ материалов в оптоэлектронике [3] обусловили интерес к исследованию диффузии РЗЭ в кремнии. Настоящая работа посвящена исследованию диффузии РЗЭ иттрия в кремнии. Ранее диффузия иттрия в кремнии не исследовалась.

Источник диффузии создавался напылением металлического иттрия (чистота ~ 99.99) или нанесением слоя хлорида иттрия из раствора на поверхность образцов кремния марки КДБ-15 или КЭФ-15 ($\rho = 15 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, площадь $\sim 1.5\text{--}3 \text{ см}^2$, толщина $\sim 350\text{--}400 \text{ мкм}$). Ампулы с образцами помещались в диффузионную печь СУОЛ, обеспечивающую точность поддержания температуры $\pm 1^\circ \text{С}$.

Диффузионный отжиг проводился в интервале температур 1100–1250°С на воздухе либо в вакуумированных ($\sim 10^{-4}$ мм рт.ст.) ампулах, а также в рабочей камере ВУП-5 ($\sim 10^{-5}$ мм рт.ст.) или в кварцевой трубе, откачанной до рабочего давления $\sim 10^{-6}\text{--}10^{-7}$ мм рт.ст. Длительность отжига варьировалась от 1 до 48 ч в зависимости от температуры диффузии. После 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 удалять оставшийся на поверхности образца источник диффузии. После этого края образца зачищались на глубину $\sim 100 \text{ мкм}$, значительно превышающую глубину диффузии. Профиль концентрации определялся методом травли тонких слоев (в растворе $\text{HF} : 50\text{HNO}_3$) и измерения проводимости и эффекта Холла. Предполагалась полная ионизация иттрия в кремнии, т.е. считалось, что концентрация примеси иттрия $c(x)$ равна концентрации носителей заряда $p(x)$: $c(x) = p(x)$. Толщина снятых слоев определялась взвешиванием образца на весах ВЛР-20 и изменялась в пределах 0.02–0.5 мкм. Как и при исследовании примесей других РЗЭ в кремнии [4–8], электрические измерения, проведенные в нескольких точках поверхности, свидетельствовали о равномерном

распределении примеси по сечению образца и об отсутствии включений второй фазы.

Концентрация носителей заряда $p(x)$ определялась по формуле [9]

$$p(x) = \frac{1}{e} \frac{\left(\frac{d\sigma_s}{dx}\right)^2}{\frac{d}{dx}(R_s \sigma_s^2)}.$$

Здесь R_s — измеряемый (эффективный) коэффициент Холла, σ_s — поверхностная проводимость, e — заряд электрона. Отметим, что эта формула приведена в работе [9] в более общем виде, учитывающем различие холловской и дрейфовой подвижностей.

Анализ полученных данных (см. рис. 1) проводился в предположении, что выполняется закон Фика и что поверхностная концентрация примеси не меняется со временем (диффузия из постоянного источника: $c(0, t) = \text{const}$). При таких предположениях, а также с учетом того обстоятельства, что толщина образца намного превосходит глубину диффузии, кривая $c(x)$ описывается функцией erfc .

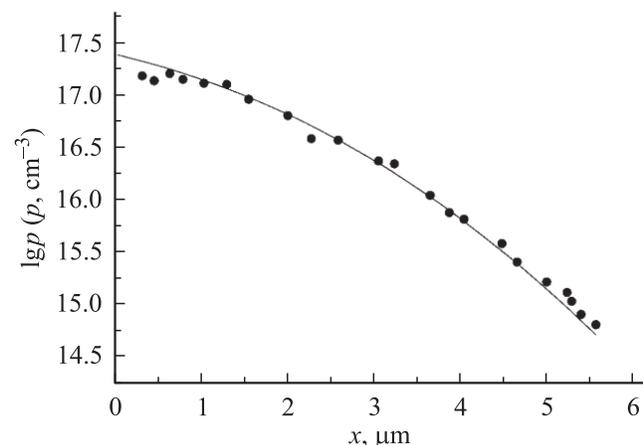


Рис. 1. Типичный профиль распределения концентрации носителей заряда в Si(Y). $T = 1150^\circ \text{С}$, $t = 10$ ч. Диффузионный отжиг в вакууме $\sim 10^{-7}$ мм рт.ст. Точки — эксперимент, сплошная кривая — функция $c = c_0 \text{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$. $c_0 = 2.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $D = 4.5 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$.

[¶] E-mail: dnazirov2004@mail.ru

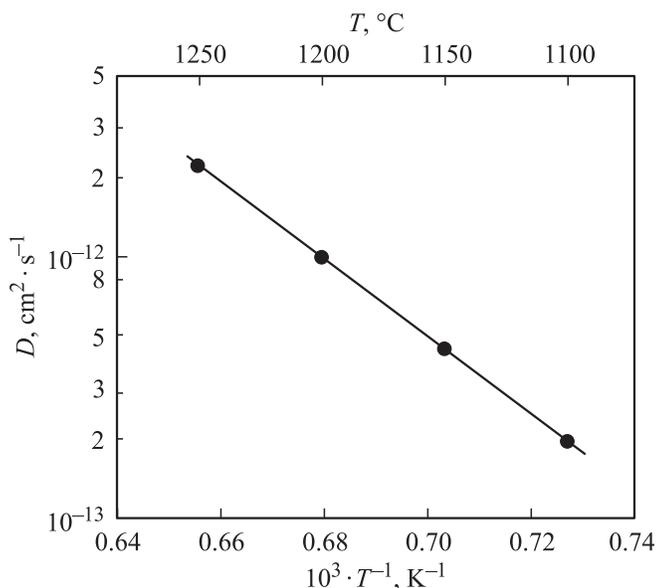


Рис. 2. Температурная зависимость коэффициента диффузии иттрия в кремнии.

Вычисленный из кривых $p(x)$ коэффициент диффузии иттрия в кремнии увеличивается от $\sim 2 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ при 1100°C до $\sim 2 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ при 1250°C . Температурная зависимость коэффициента диффузии иттрия в кремнии (рис. 2) может быть описана соотношением

$$D = 8 \cdot 10^{-3} \exp(-2.9 \text{ эВ}/kT) \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}.$$

Как показали результаты исследования, иттрий в кремнии проявляет, как и другие РЗЭ, исследованные нами [4–8], акцепторную природу.

По температурной зависимости коэффициента Холла каких-либо глубоких уровней, связанных с иттрием, в запрещенной зоне кремния не обнаружено. Отметим, что одновременно с легированными образцами нами исследовались и контрольные образцы p -типа (КДБ-15) и n -типа (КЭФ-15). Изменений типа проводимости на этих образцах не наблюдалось.

Как следует из полученных данных, коэффициент диффузии и энергия активации иттрия в кремнии располагаются в диапазоне значений, характерных для элементов III группы, а также для других РЗЭ, являющихся примесями замещения и диффундирующих по узлам кристаллической решетки [4–8,10,11]. Это позволяет утверждать, что иттрий, элемент этой же группы, также является примесью замещения и диффундирует по узлам кристаллической решетки кремния.

Авторы выражают благодарность Р.Ш. Малковичу за обсуждение результатов и ценные замечания.

Список литературы

- [1] В.М. Глазов, А.Я. Потемкин, Г.Г. Тимошина, М.С. Михайлова. ФТП, **31** (9), 1025 (1997).
- [2] Д.Э. Назыров, А.Р. Регель, Г.С. Куликов. Препринт № 1122, ФТИ им. А.Ф. Иоффе АН СССР (Л., 1987).
- [3] Н.А. Соболев. ФТП, **29** (7), 1153 (1995).
- [4] Д.Э. Назыров, В.П. Усачева, Г.С. Куликов, Р.Ш. Малкович. Письма ЖТФ, **14** (12), 1102 (1988).
- [5] Д.Э. Назыров, Г.С. Куликов, Р.Ш. Малкович. ФТП, **25** (9), 1653 (1991).
- [6] С. Зайнабидинов, Д.Э. Назыров, А.Ж. Акбаров, А.А. Иминов, Т.М. Тоштемиров. Письма ЖТФ, **24** (2), 68 (1998).
- [7] Д.Э. Назыров. ФТП, **37** (5), 570 (2003).
- [8] Д.Э. Назыров. ФТП, **37** (9), 1056 (2003).
- [9] R. Baron, G.A. Shifrin, O.J. Marsh, J.W. Mayer. J. Appl. Phys., **40** (9), 3702 (1969).
- [10] C. Polop, E. Vasco, J.A. Martin-Gago, J.L. Sacedón. Phys. Rev. B, **66**, 085324 (2002).
- [11] W. Frank, U. Gösele, H. Mehrer, A. Seeger. *Diffusion in Crystalline Solids*, ed. by G.E. Murch, A.S. Nowick (N. Y., 1984).

Редактор Л.В. Беляков

Diffusion of yttrium in silicon

D.E. Nazyrova, M.I. Bazarbaev, A.A. Iminov

M. Ulugbek National University of Uzbekistan
700174 Tashkent, Uzbekistan

Abstract Diffusion of yttrium in silicon has been studied in the air and in the vacuum in the temperature range $1100\text{--}1250^\circ\text{C}$. Temperature dependence of the diffusion coefficient of Y in Si can be described by the relationship $D = 8 \cdot 10^{-3} \exp(-2.9 \text{ eV}/kT) \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$. There has been established that Y is an acceptor impurity in silicon.