# ДИФФУЗИЯ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭРБИЯ И ТУЛИЯ В КРЕМНИИ

**С. Зайнабидинов, Д.Э. Назыров, К.У. Бобохужаев, Ж.Р. Алиева**

*Биринчи марта электр ўтказувчанлик, Холл эффекти, сиғим ва токни изотермик релаксацияларини ўлчаш усуллари ёрдамида эрбий ва тунийнинг ҳар хил муҳитларда ва 1100-1280 даражалар оралиғида диффузияси ва электрофизик хусусиятлари ўргатилган. Киришмаларни диффузия параметрлари, эрувчанлиги кўрсатилди ва уларнинг кремнийда акусптор табиатга эга эканлиги аниқланди.*

*With the help of methods of measurement of conductivity and effect of Hall, as well as methods of measuring isothermal relaxation of the current and its volume diffusion and electrophysical properties of erbiya and thulium in silicon at various environment and under the temperatures (1100-12800 C) have been studied. As a result of these studies diffusive parameters, solubility have been displayed and the acusptory nature of silicon has been revealed.*

---

Кремний, легированный редкоземельными элементами (РЗЭ) обладает повышенной термической и радиационной стабильностью [1,2], что обусловило перспективу применения Si<РЗЭ> структур в кремниевой оптоэлектронике в качестве источников света (например, для Si<Er> на длине волны 1,54 мкм [3]). Эффективность примесей РЗЭ в кремнии, проявление оптических и других свойств структур зависят от концентрации общих от электрически активных частей центров, атомов РЗЭ, а также механизма их диффузии. В связи с этим заслуживает интереса исследование особенностей диффузии РЗЭ в кремнии. Проведенные [4-5] эксперименты по диффузии празеодима, скандия, гадолиния, самария, иттербия, прометия и др. указывают на то, что примеси этих атомов РЗЭ подобно другим элементам III группы (B, Al, Ga, In) перемещаются в кремнии по узлам кристаллической решетки. Ранее диффузия этих атомов в кремнии изучалась лишь косвенным методом – методом электропроводности [6], а также с использованием прямой, радиоактивной методики – метода меченых изотопов [7].

В настоящей работе приводятся данные, выполненных нами исследований диффузии РЗЭ эрбия и тулия в кремнии, с помощью методов измерения проводимости и эффекта Холла, изотермической релаксации емкости (ИРЕ) и тока (ИРТ). Источник диффузии создавался напылением металлического эрбия и тулия (чистота ~ 99,99) или нанесением слоя хлоридов эрбия и тулия из раствора на поверхность образцов кремния марки КДБ-15 или КЭФ-15 ($\rho = 15$ Ом·см, площадь ~ 1,5–3 см$^2$, толщина ~ 350–400 мкм). Ампулы с образцами помещались в диффузионную печь СУОЛ, обеспечивающую точность поддержания температуры $\pm$ 1 °С.

Диффузионный отжиг проводился в интервале температур 1100 – 1280°С на воздухе, в вакуумированных (~ $10^{-4}$ мм рт. ст.) ампулах, а также в рабочей камере ВУП-5 (~ $10^{-5}$ мм рт. ст.) или в кварцевой трубе, откаченной до рабочего давления ~ $10^{-6}$–$10^{-7}$ мм рт. ст. Длительность отжига варьировалась от 1 до 48 ч в зависимости от температуры и условий диффузии. После отжига образцы многократно промывались в плавиковой кислоте, царской водке, а также в кипящей смеси $H_2O_2$ : HCl. Такая промывка позволяет практически полностью удалять оставшийся на поверхности образца источник диффузии. После этого края образца зачищались на глубину ~ 100 мкм, значительно превышающую глубину диффузии. Профиль концентрации определялся методом стравливания тонких слоев (в растворе 1 HF : 50 $HNO_3$) и измерения проводимости и эффекта Холла. Предполагалась полная ионизация эрбия и тулия в кремнии, т.е. считалось, что концентрация примеси эрбия и тулия $c(x)$ 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 [7-8], 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]

$$p(x) = \frac{1}{e}\left(\frac{d\sigma_S}{dx}\right)^2 \cdot \left[\frac{d}{dx}\left(R_S\sigma_S^2\right)\right]^{-1}. \quad (1)$$

Здесь $R_s$ – измеряемый (эффективный) коэффициент Холла; $\sigma_s$ – поверхностная проводимость; $e$ – заряд электрона.

Анализ полученных данных проводился в предположении, что для данного случая выполняется закон Фика и поверхностная концентрация примеси не меняется со временем (диффузия из постоянного источника: $c$ (0, $t$) = const). При таких предположениях и с учетом того, что толщина образца намного превосходит глубину диффузии, кривая $c(x)$ описывается функцией erf$c$.

Как показали результаты измерений, эти распределения для эрбия и тулия в кремний представляют собой резко спадаю-

щую кривую, удовлетворительно аппроксимируемую *erfc*-функцией, соответствующей решению уравнения Фика для диффузии из постоянного источника в полуограниченное тело. Концентрация носителей заряда $p(x)$ в кремнии, легированном эрбием и тулием определялась с учетом подвижности носителей заряда.

Вычисленный из кривых $p(x)$ коэффициент диффузии эрбия и тулия в кремний изменяется, увеличиваясь от ~ $5\cdot10^{-14}$ см$^2\cdot$с$^{-1}$ при 1100°С до ~ $6\cdot10^{-13}$ см$^2\cdot$с$^{-1}$ при 1250°С. Температурные зависимости коэффициентов диффузии эрбия и тулия в кремнии могут быть описаны следующими соотношениями:

$$D_{Er}=6\cdot10^{-3}\exp(-3.0\ eV/kT)\ cm^2s^{-1},$$

$$D_{Tm}=3\cdot10^{-2}\exp(-3{,}1\ eV/kT)\ cm^2s^{-1}.$$

Анализ полученных результатов показывает, что способ нанесения диффузанта и среда диффузии существенно не влияют на диффузионные параметры РЗЭ эрбия и тулия в кремнии. Глубина проникновения эрбия и тулия в кремнии, для оценки которой нами использовалась величина $2\sqrt{Dt}$, во всем исследованном интервале температур не превышает нескольких микрометров. Поверхностные концентрации эрбия и тулия в кремнии составляют при этом величину ~ $3\cdot10^{18}\div5\cdot10^{19}$ см$^{-3}$ [7].

Как показали результаты исследований, эрбий и тулий в кремнии проявляют (как и другие РЗЭ) акцепторную природу. Подвижность носителей заряда в диффузионных слоях Si<Er> и Si<Tm> равна ~ 130 ÷ 240 см$^2$/В·с и уменьшается с увеличением концентрации эрбия и тулия в кремнии. Исследованиями температурных зависимостей коэффициента Холла, ИРЕ и ИРТ каких-либо глубоких уровней, связанных с эрбием и тулием, 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 и значений проводимости на этих образцах не наблюдалось. Это подтверждает, что при отжиге происходит диффузия именно эрбия и тулия в кремний.

Концентрационное распределение носителей заряда в кремнии, легированном эрбием и тулием, может быть описано соответствующими соотношениями:

$$C_{Er}\approx6\cdot10^{17}\,\mathrm{erfc}(x/2\sqrt{Dt}),\ см^{-3},$$

$$C_{Tm}\approx5\cdot10^{17}\,\mathrm{erfc}(x/2\sqrt{Dt}),\ см^{-3}.$$

Таким образом, концентрация электрически активных примесей эрбия и тулия в кремнии составляет менее 10 % от их общей концентрации. Электрически неактивное состояние примесей эрбия и тулия в кремнии может быть объяснено результатом взаимодействия атомов РЗЭ с фоновыми примесями, а также с дефектами структуры кремния с образованием электрически нейтральных комплексов.

Как следует из полученных данных, коэффициент диффузии и энергия активации эрбия и тулия в кремнии находятся в диапазоне значений, полученных с помощью метода меченых атомов [7] и характерных для элементов III группы, а также для других РЗЭ, являющихся примесями замещения и диффундирующих по узлам кристаллической постоянных решетки [9], который позволяет полагать, что эрбий и тулий (элементы этой же группы) также являются примесями замещения и диффундируют по узлам кристаллической решетки кремния.

При этом, значения коэффициентов диффузии эрбия и тулия в кремнии, полученные нами существенно превышают данные [6], значения энергии активации диффузии (4.96 эВ для эрбия и 6.08 эВ для тулия, а также 8.62 эВ для гадолиния и 9.03 эВ для тербия) выше завышены даже по сравнению с энергией активации самодиффузии атомов кремния (≈ 4.7 эВ [9]).

**Литература:**

1. Назыров Д.Э., Регель А.Р., Куликов Г.С. Препринт ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. – Л.,1987.– № 1122. – С. 1-56.
2. Глазов В.М., Потемкин А.Я., Тимошина Г.Г., Михайлова М.С. // ФТП. – 1997. – Т. 31. В. 9. – С. 1025.
3. Соболев Н.А. // ФТП. – 1995. – Т. 29. – В. 7. – С. 1153.
4. Назыров Д.Э., Усачева В.П., Куликов Г.С., Малкович Р.Ш. // Письма в ЖТФ.– 1988.– Т. 14.– В.12.– С. 1102.
5. Азимов Г.К., Зайнабидинов С., Назыров Д.Э. // ФТП. – 1989. – Т. 23.– В. 9. – С. 556.
6. Агеев В.В., Аксенова Н.С., Коковина В.Н., Трошина Е.П. // Известия ЛЭТИ. – 1977. – В. 211. – С. 80.
7. Назыров Д.Э., Куликов Г.С., Малкович Р.Ш. // ФТП. – 1991.– Т. 25. – В. 9. – С. 1653.
8. Зайнабидинов С., Назыров Д.Э. // Известия вузов. Физика.– 2007. – № 1.– С. 75.
9. Frank W., Gösele U., Mehrer H., Seeger A. Diffusion in crystalline solids, ed. by G.E.Murch, A.S.Nowic. N.Y. and et all. – 1984. – P. 90.

*Ўзбекистон Миллий университети,*
*Андижон давлат университети.*
*2012 йил 6 сентябрда қабул қилинган*