

05

Исследование диффузии европия в монокристаллическом сульфиде самария

© В.А. Дидик, Е.А. Скорятина, В.П. Усачева, А.В. Голубков,
В.В. Каминский

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
E-mail: didik@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 31 марта 2004 г.

Впервые исследована диффузия европия в сульфиде самария. Эксперименты проводились с использованием радиоактивного изотопа ^{152}Eu в интервале температур 950–1050°С. При указанных температурах коэффициент диффузии находится в интервале 10^{-12} – 10^{-9} см²/с. Температурная зависимость коэффициента диффузии описывается соотношением $D = 6 \cdot 10^{19} \exp(-6.18/kT)$. Сделан вывод о преимущественном перемещении примеси Eu в SmS по узлам кристаллической решетки.

Необходимость изучения диффузии европия в сульфиде самария (SmS) возникла в связи с исследованиями эффекта генерации электродвижущей силы в этом полупроводниковом материале, поскольку температура начала генерации и величина генерируемой эдс зависят от концентрации примесей [1]. С другой стороны, SmS и EuS кристаллизуются в структурном типе NaCl с необычайно близкими по величине постоянными решетки 5.967 и 5.968 Å соответственно. При этом полупроводники с рассогласованием параметра решетки менее 0.01 Å считаются наиболее перспективными с точки зрения создания гетероструктур [2]. Если учесть существенную разницу зонных структур и, в частности, глубины залегания 4*f*-уровней [3], сочетающуюся с совместимостью тепловых, электрических и кристаллохимических свойств, то становится очевидным интерес, который может представить исследование гетероструктур на основе SmS и EuS. Изучение же процессов взаимодиффузии в гетероструктурах является весьма важной научной задачей.

Образцы SmS представляли собой плоскопараллельные пластины, выколотые из монокристаллического слитка по плоскости спайно-

сти (100). Размеры пластин $8 \times 5 \times 3$ mm. Монокристаллы были выращены по методике [4]. Плоскопараллельность образцов, $\pm 2 \mu\text{m}$, обеспечивалась сухим прецизионным шлифованием на абразивных шкурках и контролировалась с помощью вертикального оптиметра ИКВ-1 с ценой деления $1 \mu\text{m}$.

Диффузия изучалась с применением радиоактивного изотопа ^{152}Eu . Радиоактивный изотоп европия из спиртового раствора наносился на одну из поверхностей образца. Образец с нанесенным слоем изотопа помещался в танталовый контейнер, не позволявший реагировать SmS с кварцем, а затем запаивался в кварцевую ампулу. Диффузионный отжиг образцов проводился в вакууме в интервале температур — от 950 до 1050°C . Время отжига составляло от 1 до 21 h. Отжиг проводился в печах типа СДО-125/4-4 с программным регулятором температуры РЕПИД, обеспечивающим точность поддержания температуры не хуже $\pm 2^\circ\text{C}$. Температура измерялась термопарой платинородий–платина. После отжига ампулы охлаждались на воздухе. Затем образцы извлекались из ампул и их торцы зачищались на глубину не менее $500 \mu\text{m}$, чтобы избежать влияния попадания радиоактивной примеси с торцов образца на активность измеряемых слоев. После зачистки проводилось радиографирование образцов, которое позволяло оценивать равномерность распределения примеси по площади образцов.

Для определения концентрационного профиля использовался метод секционирования, т.е. последовательного снятия слоев. Этот метод состоит в измерении активности тонких слоев, последовательно удаляемых с образца. Слои снимались механическим путем на шлифовальной бумаге с помощью специального притира. Толщина снятого слоя определялась на оптиметре ИКВ-1.

Радиоактивные измерения (определение гамма-активности снятых слоев) проводились с помощью детектора БДЗА2-01 со сцинтилляционным кристаллом NaI(Tl) в сочетании с комплектом электронно-измерительной аппаратуры.

Для нахождения абсолютных значений концентрации определялся коэффициент пропорциональности между измеренной активностью и концентрацией примеси. С этой целью использовались эталоны с известной концентрацией радиоактивного изотопа. Рассчитав количество атомов изотопа в эталоне, можно было определить коэффициент пропорциональности, с помощью которого измеренная радиоактивность пересчитывалась в концентрацию примеси. Учитывая толщину снятых

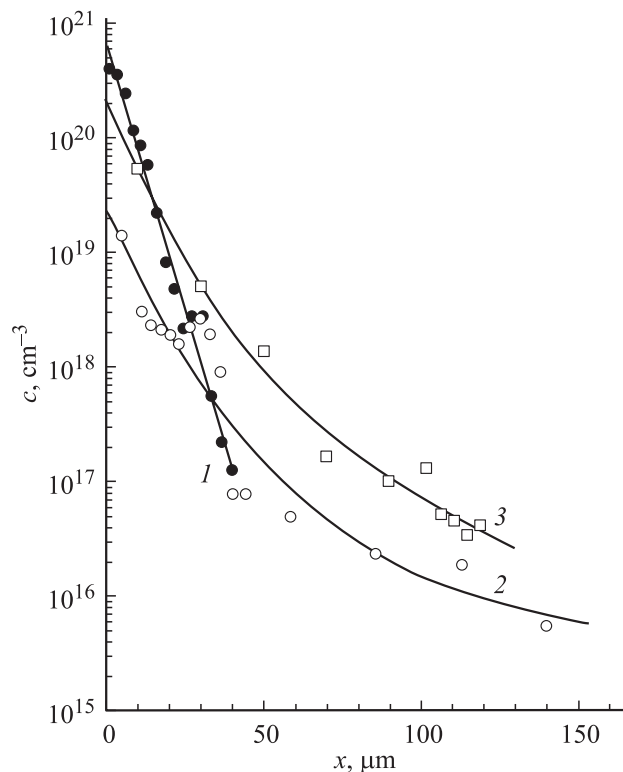


Рис. 1. Профили распределения европия в сульфиде самария: 1 — $T = 950^\circ\text{C}$, $t = 21$ h; 2 — $T = 1000^\circ\text{C}$, $t = 10$ h; 3 — $T = 1050^\circ\text{C}$, $t = 1$ h.

слоев, строился концентрационный профиль $c = f(x)$, где c — концентрация, x — координата.

В результате исследования были получены профили распределения радиоактивного изотопа ^{152}Eu в монокристаллических образцах SmS, представлявшие собой монотонно спадающие кривые.

Профили европия, полученные после отжига образцов SmS при температурах 950, 1000 и 1050°C , представлены на рис. 1. Как видно из полученных результатов, при данных условиях эксперимента профили распределения европия достигают глубины 40–150 μm . Следует отметить, что глубина профилей, как и следовало ожидать, увеличивается с

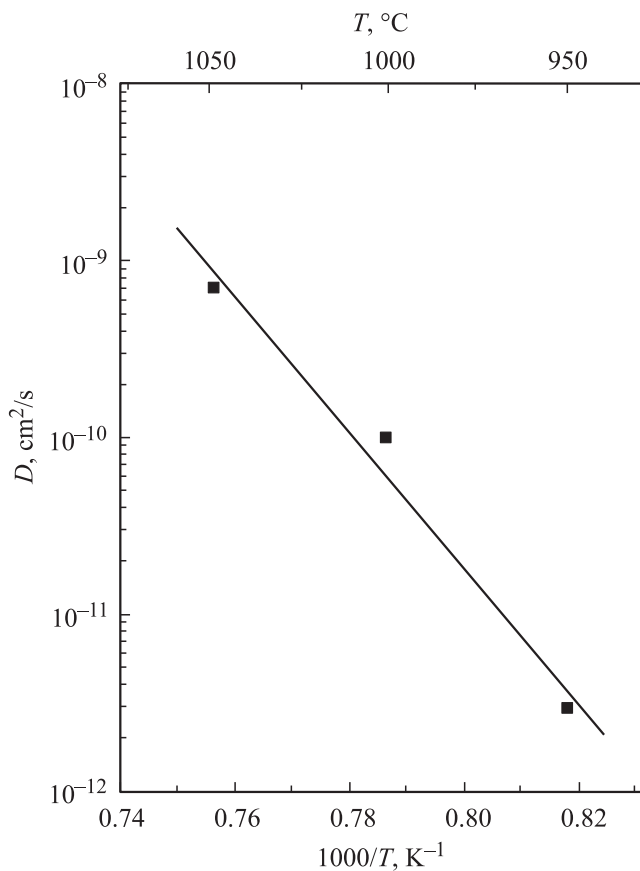


Рис. 2. Зависимость коэффициента диффузии европия в сульфиде самария от температуры.

ростом температуры. Концентрация европия составляет $10^{19} - 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ у поверхности образца и спадает до $10^{15} - 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ в глубине образца.

Процесс диффузионного переноса европия в SmS можно приближенно описать дифференциальным уравнением Фика, которое в одномерном случае имеет вид [5]

$$\partial c / \partial t = D(\partial^2 c / \partial x^2). \quad (1)$$

Поскольку толщина образца в выполненных нами экспериментах намного превосходит глубину диффузии примеси, образец можно было рассматривать как полуограниченное тело, до диффузии не содержащее примеси, т. е. мы полагали, что выполняются условия диффузии из так называемого постоянного источника.

Решением уравнения Фика в данном случае является выражение

$$c(x, t) = c_0 \operatorname{erfc}(x/2\sqrt{Dt}). \quad (2)$$

Используя методику вычисления коэффициента диффузии [6], мы определили D , точность определения которого оценивается величиной 25%. Наблюдающийся в эксперименте аррениусовский характер изменения коэффициента диффузии с температурой, описываемый соотношением

$$D = D_0 \exp(-\varepsilon/kT), \quad (3)$$

позволил нам определить основные диффузионные параметры — энергию активации ε и предэкспоненциальный множитель D_0 .

Как следует из результатов проведенных исследований, европий диффундирует в монокристаллический SmS при исследованных температурах с коэффициентами диффузии 10^{-12} – 10^{-9} см²/с. Энергия активации при этом составляет 6.18 eV, $D_0 = 6 \cdot 10^{19}$ см²/с (рис. 2). Диффузию европия в монокристаллический SmS можно описать уравнением $D = 6 \cdot 10^{19} \exp(-6.18/kT)$. Энергия активации и скорость диффузии позволяют нам сделать вывод о преимущественном перемещении европия по узлам кристаллической решетки.

Работа выполнена при финансовой поддержке ЗАО „Диал Инжиниринг“ (г. С.-Петербург).

Список литературы

- [1] Каминский В.В., Голубков А.В., Васильев Л.Н. // ФТТ. 2002. Т. 44. В. 8. С. 1501–1505.
- [2] Кремер Г. // УФН. 2002. Т. 172. № 9. С. 1087–1101.
- [3] Жүзе В.П. // ЖВХО им. Д.И. Менделеева. 1981. Т. XXVI. В. 6. С. 695–702.
- [4] Голубков А.В., Гончарова Е.И., Жүзе В.П. и др. Физические свойства халькогенидов редкоземельных элементов. Л.: Наука, 1973. 304 с.
- [5] Болтакс Б.И. Диффузия в полупроводниках. М.: Физматгиз, 1961. 462 с.
- [6] Малкович Р.Ш. Математика диффузии в полупроводниках. СПб.: Наука, 1999. 389 с.