

Диффузия иттербия в кремнии

© Д.Э. Назыров

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

(Получена 9 декабря 2002 г. Принята к печати 17 декабря 2002 г.)

Исследована диффузия иттербия в кремнии в интервале температур 1100–1250°C с использованием прямого радиоактивного метода. Установлены диффузионные параметры иттербия в кремнии.

В последнее время возрос интерес к исследованию свойств кремния, легированного редкоземельными элементами (РЗЭ), в связи с повышением термической и радиационной стойкости кремния при легировании его РЗЭ, а также с перспективой применения Si(РЗЭ)-структур в оптоэлектронике в качестве источников света [1–3]. Этим в существенной мере обуславливается интерес и внимание к исследованиям диффузии РЗЭ в кремнии.

В настоящем сообщении приводятся результаты выполненного исследования диффузии РЗЭ иттербия в кремнии с использованием прямого радиоактивного метода. Ранее диффузия этого элемента в кремнии изучалась в основном косвенным методом [4–8], а также методом нейтронно-активационного анализа [9].

На поверхность образцов кремния *n*-типа ($\rho = 15 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, площадь $\sim 1.5 \text{ см}^2$, толщина $\sim 350 \text{ мкм}$) напылялся металлический слой радиоактивного изотопа иттербия ^{175}Yb или наносился из раствора слой хлорида иттербия, содержащего радиоактивный изотоп ^{175}Yb . Активация атомов иттербия проводилась в ЛИЯФ им. Б.П. Константинова РАН.

Ампулы с расположенными в них образцами помещались в диффузионную печь СДО-I, снабженную программным регулятором температуры РЕПИД, обеспечивающим точность поддержания температуры $\pm 1^\circ\text{C}$. Диффузионный отжиг проводился на воздухе, в вакуумированных ампулах ($\sim 10^{-4}$ мм рт.ст.), а также в откачанных ампулах в атмосфере аргона в интервале температур 1100–1250°C. Длительность диффузионного отжига менялась в зависимости от температуры диффузии от 5 до 48 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 удалять оставшийся на поверхности образца источник диффузии. После этого края образца зачищались на глубину $\sim 100 \text{ мкм}$, значительно превышающую глубину диффузии ($\sim 10 \text{ мкм}$). Профиль распределения примеси иттербия 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 измерением остаточной активности образца. Остаточная активность образца измерялась на установке малого фона УМФ-1500М с β -счетчиком СБТ-11. Идентифи-

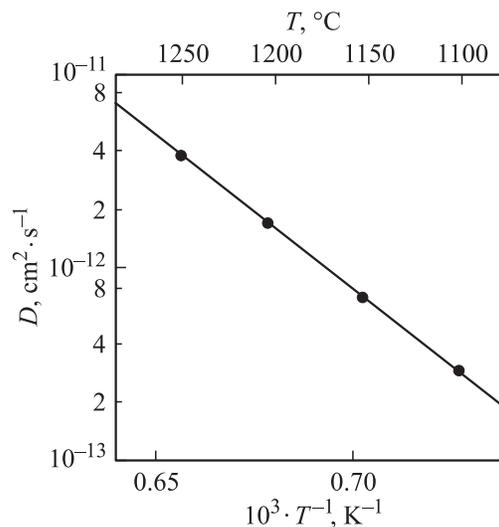
кация ^{175}Yb также осуществлялась проведением измерений на анализаторе импульсов АИ-1024 (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург). Толщина снятых слоев (0.05–0.5 мкм) определялась взвешиванием образца. Авторадиограммы, полученные до и после отжига, а также в процессе снятия слоев, свидетельствовали о равномерном распределении примесей иттербия по сечению образца и об отсутствии включений.

Коэффициент диффузии D иттербия в кремнии определялся в наших опытах в предположении, что соблюдается закон Фика и что поверхностная концентрация примеси не меняется со временем (диффузия из постоянного источника). С этой целью экспериментальная кривая остаточного количества примеси, как и в работе [10], аппроксимировалась теоретической кривой для диффузии из постоянного источника:

$$Q(x) = 2C_0\sqrt{Dt} \cdot \text{ierfc}(x/2\sqrt{Dt}),$$

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

Как следует из полученных данных (см. рисунок), коэффициент диффузии иттербия в кремнии увеличивается по мере роста температуры от $3 \cdot 10^{-13}$ до $4 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Температурная зависимость коэффициента диффузии носит Аррениусовский характер



Температурная зависимость коэффициента диффузии иттербия в кремнии.

и может быть при этом описана соотношением

$$D_{Yb} = 3 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-3.0 \text{ эВ}/kT) \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1} \quad (1100-1250^\circ\text{C}).$$

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

Как показывает анализ полученных данных, коэффициент диффузии в зависимости от температуры и энергии активации иттербия в кремнии располагаются в диапазоне значений, характерных для диффузии типичных элементов III B группы Периодической системы — бора, алюминия, индия, галлия, таллия, являющихся примесями замещения и диффундирующих по узлам кристаллической решетки. Как известно, элементы III и V групп Периодической системы при термическом равновесии располагаются в Si и Ge в узлах решетки. На основании теоретических расчетов принято считать, что равновесные концентрации межузельных атомов этих элементов на несколько (3 и более) порядков меньше их концентраций в узлах решетки [11]. Однако даже в случаях, когда элементы III группы — гольмий, эрбий, иттербий [12–14] и другие вводятся в кремний методом ионной имплантации, т. е. когда неравновесные межузельные атомы имеются в значительных концентрациях, также не наблюдается существенная диффузия РЗЭ, диффузионные параметры которых отличались бы от классических. Таким образом, можно предположить, что иттербий — элемент третьей группы Периодической системы также является примесью замещения и диффундирует по узлам кристаллической решетки кремния (вакансионный механизм диффузии).

Сопоставление наших данных по диффузии иттербия в кремнии с ранними результатами по диффузии других РЗЭ в кремнии [10,14–16], полученными с помощью радиоактивной и других методик, показывает, что способ нанесения диффузанта и среда диффузии существенно не влияет на диффузионные параметры резкоземельных элементов в кремнии.

Список литературы

- [1] В.М. Глазов, А.Я. Потемкин, Г.Г. Тимошина, М.С. Михайлова. ФТП, **31** (9), 1025 (1997).
- [2] Н.Т. Баграев, Л.С. Власенко, В.М. Волле, В.Б. Воронков, И.В. Грехов, В.В. Добровенский, А.И. Шагун. ЖТФ, **54** (5), 917 (1984).
- [3] Н.А. Соболев. ФТП, **29** (7), 1153 (1995).
- [4] 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).
- [5] М.К. Бахадырханов, Ф.М. Талипов, У.С. Джурабеков, Н.В. Султанова, У. Эгамов. Электрон. техн. Сер. 6. Материалы, вып. 5 (190), 79 (1984).
- [6] В.Н. Абросимова, Е.П. Трошина, Л.Ф. Чепик. Свойства легированных полупроводниковых материалов (М., 1990).
- [7] В.В. Агеев, В.Н. Коковина, Н.Е. Приходько, Е.П. Трошина. Изв. ЛЭТИ, **186**, 51 (1976).
- [8] А.Г. Козлов. Изв. ЛЭТИ **338**, 79 (1984).
- [9] М.К. Бахадырханов, Ф.М. Талипов, Н.В. Султанова, У.С. Джурабеков, Ш.Ш. Шасаидов, А.С. Лютович, А.А. Касымов. Изв. АН СССР. Неорг. матер., **26** (3), 458 (1990).
- [10] Д.Э. Назыров, В.П. Усачева, Г.С. Куликов, Р.Ш. Малкович. Письма ЖТФ, **14** (12), 1102 (1988).
- [11] *Атомная диффузия в полупроводниках*, под ред. Д. Шоу (М., 1975).
- [12] В.В. Емцев, В.В. Емцев (мл.), Д.С. Полоскин, Н.А. Соболев, Е.И. Шек, Й. Михель, Л.С. Кимерлинг. ФТП, **33** (6), 649 (1999).
- [13] О.В. Александров, А.О. Захарьин, Н.А. Соболев. ФТП, **36** (2), 134 (2002).
- [14] Д.Э. Назыров, С.А. Гончаров, А.В. Суворов. Письма ЖТФ, **26** (8), 24 (2002).
- [15] Д.Э. Назыров, Г.С. Куликов, Р.Ш. Малкович. ФТП, **25** (9), 1653 (1991).
- [16] Г.К. Азимов, С. Зайнабидинов, Д.Э. Назыров. ФТП, **23** (3), 556 (1989).

Редактор Л.В. Беляков

Diffusion of ytterbium in silicon

D.E. Nazirov

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

Abstract The diffusion of Yb in Si within the temperature interval 1100–1250°C, with use of direct method of radioactive isotopes, has been explored. Diffusion parameters of Yb impurity in Si are determined.