

05;06;12

## Диффузия прометия в кремнии

© Д.Э. Назыров, Г.С. Куликов, Р.Ш. Малкович

Ташкентский государственный университет им. М. Улукбека  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 4 октября 1996 г.

Впервые исследована диффузия прометия в кремнии. В интервале температур 1100–1250°С коэффициент диффузии прометия увеличивается от  $\sim 1 \cdot 10^{-13}$  до  $\sim 1.5 \cdot 10^{-12}$  см<sup>2</sup> · с<sup>-1</sup>. Температурная зависимость коэффициента диффузии может быть описана соотношением

$$D = 5 \cdot 10^{-3} \exp \left[ -\frac{3.3 \text{ эВ}}{kT} \right] \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}.$$

Одним из основных путей повышения надежности полупроводниковых приборов, особенно при эксплуатации их в экстремальных условиях, является создание полупроводниковых материалов, устойчивых к термическим и радиационным воздействиям. В последнее время в целом ряде отечественных и зарубежных исследований было установлено, что термическая и радиационная стойкость кремния, являющегося основным материалом современной полупроводниковой микроэлектроники, зачастую существенно повышается при введении в него редкоземельных элементов [1–3]. Результаты этих и других исследований с одной стороны, в значительной мере стимулировали интерес к легированию кремния редкоземельными элементами, а с другой стороны, к изучению поведения этих примесей в кремнии и их влияния на физические и физико-химические свойства материала.

В настоящем сообщении приводятся результаты впервые выполненного исследования диффузии прометия в кремнии.

При проведении диффузии использовались плоскопараллельные полированные пластины кремния *n*-типа КЭФ-15 толщиной  $\sim 380$  мкм, из которых вырезались прямоугольные образцы площадью  $\sim 1.5$  см<sup>2</sup>. Образцы перед нанесением диффузанта промывались в ацетоне, толуоле, плавиковой и царской кислотах, кипящей смеси H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> : HCl и дистиллированной воде.

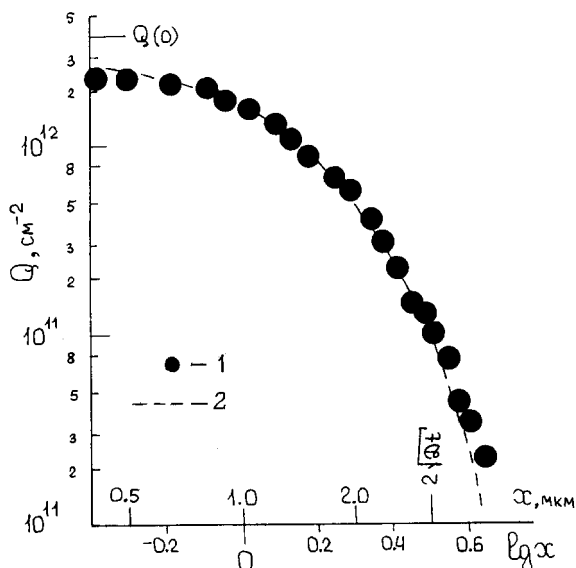


Рис. 1. Профиль остаточного количества радиоактивного прометия в кремнии.  $T = 1200^\circ\text{C}$ ,  $t = 10$  ч: ● — эксперимент, --- — расчет (теория).

Диффузия проводилась из слоя диффузанта, нанесенного на поверхность образца в виде спиртового раствора хлорида радиоактивного прометия  $^{147}\text{Pm}$ . Образцы, после нанесения на поверхность диффузанта, подсушивались на воздухе. Равномерность нанесения контролировалась автордиографическим методом.

Диффузионный отжиг проводился на воздухе в открытых ампулах. Ампулы с образцами помещались в диффузионную печь СДО-1, снабженную программным регулятором температуры РЕПИД, обеспечивающим точность поддержания температуры  $1^\circ\text{C}$ . Температурный интервал диффузии — от  $1100$  до  $1250^\circ\text{C}$ . Продолжительность отжига менялась от 8 до 48 ч.

После диффузионного отжига образцы подвергались последовательной многократной промывке в плавиковой кислоте, кипящей смеси  $\text{H}_2\text{O}_2 : \text{HCl}$  и дистиллированной воде. Такая промывка обычно позволяла практически полностью удалять оставшуюся на поверх-

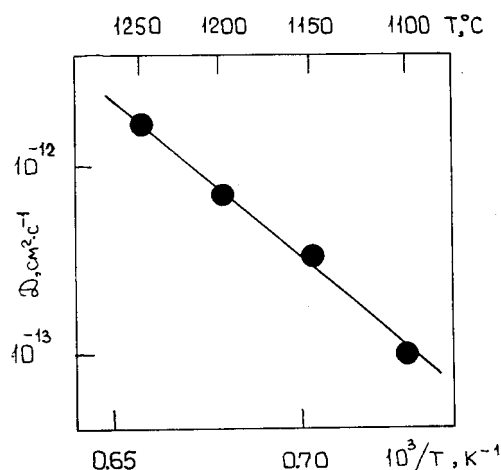


Рис. 2. Температурная зависимость коэффициента диффузии прометия в кремнии.

ности образца радиоактивную примесь. После этого края образца зачищались на глубину ( $\sim 80\text{--}100\text{ мкм}$ ), значительно превышающую глубину диффузии ( $\sim 10\text{ мкм}$ ).

Профиль примеси определялся методом последовательного снятия слоев и измерения остаточной активности образца. Слои снимались химическим способом — в травителе  $1\text{HF} : 40\text{HNO}_3$ . После снятия каждого слоя образцы промывались в кипящей смеси  $\text{H}_2\text{O}_2 : \text{HCl}$  и дистиллированной воде. Толщина снятого слоя определялась взвешиванием образца на полумикроаналитических весах ВЛР-20 г. Обычно она составляла величину  $0.1\text{--}0.5\text{ мкм}$ . Остаточная активность образца измерялась на установке малого фонда УМФ-1500 М с  $\beta$ -счетчиком СБТ, на установке БДБСЗ-1 еМ со сцинтилляционным счетчиком  $\text{NaI}(\text{Tl})$ , а также на анализаторе импульсов АИ-1024.

С целью контроля равномерности распределения радиоактивного изотопа по сечению образца в процессе снятия слоев проводилось автордиографирование образца.

Данные автордиографических исследований показали: однородность нанесения, равномерность распределения продиффундиро-

вавшего изотопа прометия по поверхности сечений на различной глубине от исходной поверхности сечений на различной глубине от исходной поверхности образцов, а также отсутствие каких-либо включений второй фазы, как было и с другими РЗЭ, исследованными нами [4–6].

Как показывают полученные результаты, кривые остаточного количества примеси (см., например, рис. 1) могут быть описаны функцией  $\operatorname{erfc}$ , соответствующей решению уравнения Фика для диффузии из бесконечно тонкого источника. Вычисленный из кривых остаточного количества примеси коэффициент диффузии прометия в кремнии увеличивается по мере роста температуры от  $\sim 1 \cdot 10^{-13}$  до  $\sim 1.5 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ . На рис. 2 представлена температурная зависимость коэффициента диффузии прометия в кремнии. Температурная зависимость коэффициента диффузии носит аррениусовский характер и может быть описана соотношением

$$D = 5 \cdot 10^{-3} \exp\left(-\frac{3.3 \text{ эВ}}{KT}\right) \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Глубина проникновения прометия в кремний, как показывают результаты, определяется величиной  $2\sqrt{Dt}$ , во всем исследованном интервале температур не превышает нескольких микрон.

Как показывает анализ полученных нами данных, коэффициенты диффузии и энергия активации прометия в кремнии располагаются в диапазоне значений, характерных для диффузии типичных элементов III группы — бора, алюминия, индия, галлия, таллия, являющихся примесями замещения и диффундирующих по узлам кристаллической решетки [7]. Таким образом, полученные нами результаты подтверждают аналогичные выводы, сделанные нами ранее о механизме диффузии редкоземельных элементов в кремнии [4–6].

## Список литературы

- [1] Mandelkorn J., Schwartz L., Broder J., Kautz H., Ulman R. // J. Appl. Phys. 1964. V. 35. N 7. P. 2258–2260.
- [2] Баграев Н.Т., Власенко Л.С., Волле В.М., Воронков В.Б., Грехов И.В., Добровенский В.В., Шагун А.И. // ЖТФ. 1984. Т. 54. В. 5. С. 917–928.

- [3] Назыров Д.Э., Регель А.Р., Куликов Г.С. // Препринт ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. Л., 1987. № 1122.
- [4] Назыров Д.Э., Куликов Г.С., Малкович Р.Ш. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 12. С. 1102–1104.
- [5] Назыров Д.Э., Куликов Г.С., Малкович Р.Ш. // ФТП. 1991. Т. 25. В. 9. С. 1653–1654.
- [6] Азимов Г.К., Зайнабидинов С.З., Назыров Д.Э. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 3. С. 556–557.
- [7] Frank W., Gösele U., Mehrer H., Seeger A. // Diffusion in Crystalline Solids / Ed. by G.E. Murch and A.S. Nowick. N.Y., 1984. P. 76.