

## Диффузионные свойства пластически деформированных кристаллов кремния

© М.А. Алиев, Х.О. Алиева, В.В. Селезнев

Институт физики Дагестанского научного центра Российской академии наук,  
367003 Махачкала, Россия

(Поступила в Редакцию 7 апреля 1998 г.

В окончательной редакции 31 августа 1998 г.)

Экспериментально исследовано влияние дислокаций, вводимых в процессе электропластической деформации, на явление электропереноса примесных атомов индия в монокристаллах *P*-кремния. Установлено, что одновременная с деформацией реализация электродиффузии индия приводит к эффекту преимущественного увлечения ионов примеси в сторону анода.

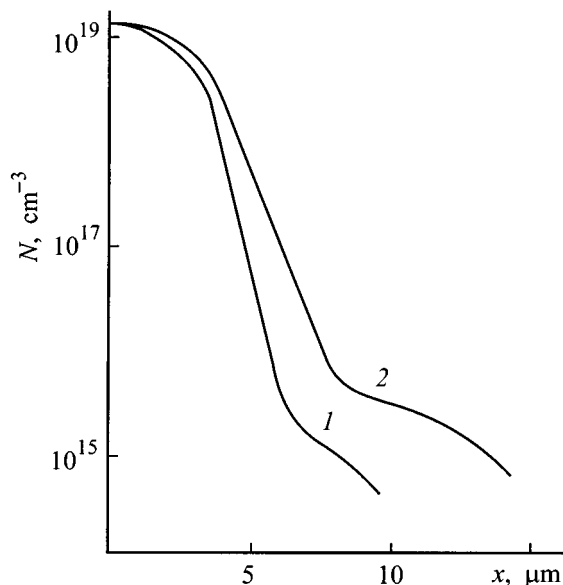
Исследование роли примесь-дислокационных взаимодействий в процессе электропластической деформации (ЭПД) кристаллов кремния выявило несколько этапов его влияния на их пластические свойства [1]. Поскольку данный эксперимент можно рассматривать как электродиффузионный процесс, то вполне закономерно было попытаться изучить влияние примесь-дислокационных взаимодействий в этом процессе и на диффузионные свойства монокристаллов *P*-кремния.

Известно, что структурные дефекты в полупроводниковых кристаллах, в особенности дислокации, значительно влияют на явления атомного переноса примесей в кристаллических телах [2,3]. Существует много противоречивых данных относительно характера миграции примесей при изучении электропереноса как в объеме растворителя, так и по структурным неоднородностям. В одних случаях наблюдалось ускорение переноса, в других — замедление [4,5]. Причина этих несовпадений, по-видимому, кроется в различной дефектности структур исследуемых кристаллов [6]. В то же время нет работ по исследованию характера миграции примесей в кристаллах, деформируемых в электрическом поле с одновременной реализацией электро-диффузионного процесса.

В настоящей работе методом электропластической деформации [7] в образцах монокристаллического *P*-кремния, исходно легированных галлием до концентрации дырок  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ , проводилась электродиффузия индия вдоль кристаллографического направления [110], которое служило одновременно и направлением сжатия кристалла. Образцы в виде параллелепипедов размером  $12 \times 10 \times 5 \text{ мм}$ , ребра которых совпадали с кристаллографическими направлениями [112], [111], [110] соответственно, деформировались в режиме стационарной ползучести при постоянном сдвиговом напряжении 12 МПа и температуре  $750^\circ\text{C}$  в течение 30 мин. Образцы широкими плоскостями (110) с предварительно напыленным слоем примеси из постоянного источника складывались попарно и зажимались между пуансонами деформационной установки. Постоянный ток, проходящий через образец, служил одновременно и для нагрева образца, и для создания постоянного электрического поля. По

окончании испытания образцы механически разделялись и для снятия профиля распределения концентрации по глубине вырезались полоски размерами  $10 \times 3 \times 1 \text{ мм}$  из его катодной и анодной частей. Контроль распределения примесей по глубине осуществлялся последовательным снятием слоев и измерением концентрации атомов индия методом Оже-спектроскопии.

На рисунке приведено концентрационное распределение примеси индия по глубине проникновения в анодной и катодной частях кремния, полученное как усредненный результат ряда идентичных экспериментов. Как видно из кривых, электродиффузия сопровождается преимущественным переносом индия к аноду. Ранее в работе [8] исследовалось влияние дислокаций роста на электроперенос индия в *P*-кремнии. Было обнаружено, что при температуре  $T = 900^\circ\text{C}$  примесь индия во внешнем постоянном электрическом поле переносится по дислокациям к катоду. Вероятным механизмом процесса диффузии авторы считали вакансионный механизм.



Распределение по координате  $x$  концентрации  $N$  индия в кремнии. 1 — катодная часть; 2 — анодная часть.

А направление преимущественного переноса примеси индия и высокие значения ее эффективного заряда вдоль дислокаций авторы связали с дырочным увлечением.

Перенос индия к аноду, наблюдаемый нами в эксперименте, в отличие от данных [8], обусловлен соответственно различием условий проведения диффузионного процесса. Основным отличием является осуществление процесса электродиффузии одновременно с пластической деформацией. Следовательно, мы имеем дело с подвижными дислокациями, коорые генерируются и одновременно перемещаются вместе с фронтом диффундирующей примеси. С другой стороны, различие типа проводимости объектов исследования и температурных условий проведения экспериментов также накладывает свои особенности на результаты опытов. В [9] обнаружено ускоренное проникновение атомов гелия в деформируемые в жидком гелии кристаллы фтористого лития. Аномально высокий коэффициент диффузии атомов гелия авторы [9] объясняют их проникновением по зарождающимся идвигающимся дислокациям за счет динамической трубочной диффузии. Взаимодействие диффундирующих примесей с подвижными дислокациями рассмотрено также в [10]. Было показано, что образующееся на дислокациях примесное облако существенно влияет на их перемещение и на характер формирования диффузионной зоны. Авторами введено понятие системы "дислокация–примесное облако", которая может передвигаться в режиме диффузионно-вязкого течения. Известно также, что легирование примесью меняет электронные состояния дислокаций, а следовательно, их электростатический заряд и потенциал Пайерлса [11,12]. В объектах с высоким потенциалом Пайерлса этот фактор взаимодействия примесей с дислокациями может сыграть существенную роль в изменении характера диффузионно-деформационных процессов [13].

Учитывая вышеизложенное, электроперенос индия, реализованный одновременно с электропластической деформацией в нашем эксперименте, мы связываем с вакансионным механизмом ввиду порождения значительной концентрации вакансий в области зарождающихся и перемещающихся дислокаций. Кроме того, перемещению диффузионного фронта примесей способствует не только обычный закон диффузии за счет градиента концентрации, но также и увлечение примесей движущимися дислокациями как вдоль дислокаций, так и в направлении их движения [14].

Как было указано выше, легирование меняет зарядовое состояние дислокаций, которое в условиях приложенного постоянного электрического поля может способствовать их перемещению за счет взаимодействия с носителями тока по механизму Фикса [15]. Так, в [16] наблюдался непосредственный перенос дислокаций электрическим полем (в направлении действия тока) к аноду. Этот фактор коррелирует с наблюдаемым в нашем случае фактором преимущественного переноса индия к аноду.

Таким образом, как нам представляется, диффузионный фронт примесных атомов индия в нашем экспе-

рименте формируется несколькими механизмами. Первый — обычный вакансионный механизм диффузии примеси в объеме кристалла за счет градиента концентрации. Второй — прямой перенос растворенного вещества движущимися дислокациями.

Факт налия двух составляющих компонентов диффузии отмечается, как видно на рисунке, в виде перегиба на экспериментальных кривых концентрационного распределения примеси. Согласно [17], эти составляющие компоненты диффузии именуется "медленной" и "быстрой", что свидетельствует о наличии двух одновременно действующих механизмов диффузии одной примеси.

"Медленная" составляющая в нашем случае обусловлена вакансионным механизмом замещения атомов растворителя в приповерхностной зоне. Поверхность деформируемого кристалла, покрытая электроактивной примесью, начинает работать, как генератор дислокаций с диффузионной накачкой. Диффузия самой примеси, вызывающей образование дислокаций за счет размерного фактора, замедляется. "Быстрая" составляющая отождествляется с диффузией примеси по дислокационным трубкам с последующим ее увлечением подвижными заряженными носителями пластической деформации.

Анализ возможных механизмов переноса примеси индия приводит к мысли об особой роли подвижных дислокаций в случае одновременно протекающих диффузионных и деформационных процессов.

## Список литературы

- [1] М.А. Алиев, Х.О. Алиева, В.В. Селезнев. ФТТ **38**, 11, 3372 (1996).
- [2] Б.И. Болтакс. Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках. Наука, Л. (1972). 382 с.
- [3] Г.С. Куликов, Р.Ш. Малкович. ФТП **29**, 5, 937 (1995).
- [4] Тонкие пленки. Взаимная диффузия и реакции / Под ред. Дж. Поут, К. Ту, Дж. Мейер. Мир, М. (1982). 575 с.
- [5] Атомная диффузия в полупроводниках / Под ред. Д. Шоу. Мир, М. (1975). 684 с.
- [6] В.И. Соколов. ФТП **29**, 5, 843 (1995).
- [7] М.А. Алиев, В.В. Селезнев. Физика и техника высоких давлений **30**, 46 (1989).
- [8] В.А. Стерхов, В.А. Пантелеев, П.В. Павлов. ФТТ **9**, 2, 681 (1967).
- [9] О.В. Клявин. ФТТ **35**, 3, 513 (1993).
- [10] Я.Е. Гегузин, В.П. Мацокин. УФЖ **26**, 4, 612 (1980).
- [11] А.Н. Орлов. ФТТ **22**, 12, 3580 (1980).
- [12] Б.В. Петухов. ФТТ **26**, 10, 3160 (1984).
- [13] М.И. Молоцкий. ФТТ **30**, 6, 1880 (1988).
- [14] В.Я. Кравченко. ФТТ **9**, 4, 1050 (1967).
- [15] В.Б. Фикс. ЖЭТФ **80**, 6, 2313 (1981).
- [16] Е.Е. Вдовин, А.Ю. Касумов. ФТТ **30**, 1, 31 (1988).
- [17] В.Е. Косенко. ФТТ **3**, 7, 2102 (1961).