

кривая 3), которая в несколько раз меньше дозы аморфизации кремния [5]. Отметим, что в этом случае метод РОР оказывается не приемлемым для обнаружения ОД из-за низкой его чувствительности ( $\sim 10^{21}$  см<sup>-3</sup> [6]).

Таким образом, представленные результаты показывают возможность качественного обнаружения и контроля остаточных дефектов в ИЛС кремния с помощью измерения диффузионных профилей электрически активных атомов натрия, введенных в эти слои имплантацией.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Риссел Х., Рунге И. Ионная имплантация. М., 1983. 360 с.
- [2] Беликова М. Н., Король В. М. — Письма ЖТФ, 1977, т. 3, в. 6, с. 250—254.
- [3] Ковалева Е. А., Король В. М., Меррик Б. Р. — Электрон. техн., сер. 2, Полупроводн. приборы, 1976, в. 3 (105), с. 33—38.
- [4] Skristodoulides C. E. et al. — Rad. Eff., 1978, v. 36, p. 73—82.
- [5] Зорин Е. И., Павлов П. В., Тетельбаум Д. И. Ионное легирование полупроводников. М., 1975. 128 с.
- [6] Мейер Дж., Эриксон Л., Дэвис Дж. Ионное легирование полупроводников. М., 1973. 296 с.

Научно-исследовательский институт  
физики РГУ  
Ростов-на-Дону

Получено 6.05.1988  
Принято к печати 8.06.1988

ФТП, том 22, вып. 11, 1988

### ДИФФУЗИЯ ФОСФОРА В ПРОФИЛИРОВАННОМ КРЕМНИИ, ПОЛУЧЕННОМ СПОСОБОМ А. В. СТЕПАНОВА

Абдурахманов К. П., Закс М. Б., Касаткин В. В., Куликов Г. С.,  
Першеев С. К., Ходжаев К. Х.

Профилированный кремний, выращиваемый по способу, предложенному А. В. Степановым, представляет большой практический интерес как дешевый материал, являющийся основой для производства солнечных элементов и некоторых других полупроводниковых приборов [1-3]. При этом для создания  $p-n$ -переходов в таком материале используется стандартная диффузионная технология, применяемая обычно для монокристаллического кремния. В то же время изучение структурных особенностей профилированного кремния, проведенное рядом исследователей [4-6], показало, что этот материал содержит специфические дефекты структуры — границы монокристаллических блоков, ростовые борозды, сростки SiC и др. Наличие таких дефектов может оказать существенное влияние на процессы диффузии примесей. Однако опубликованных данных по исследованию диффузии примесей в профилированном кремнии до настоящего времени не имелось.

Целью данной работы было экспериментальное определение диффузионных параметров примеси фосфора в таком материале. Объектом исследования служил профилированный кремний, выращенный по способу Степанова. Диффузия фосфора изучалась в интервале температур 1015—1200 °С. Для устранения концентрационной зависимости коэффициента диффузии, а также с целью приближения условий эксперимента к технологии изготовления приборов в диффузионных опытах мы использовали ограниченный источник примеси. Ограниченным источником диффузанта служил тонкий (0.9 мкм) слой вблизи поверхности образцов, полученный путем предварительной диффузионной загонки фосфора в образцы при температуре 1015 °С в течение 25 мин. Поверхностная концентрация фосфора в таком слое составляла  $2 \cdot 10^{21}$  см<sup>-3</sup>. Диффузионные профили фосфора, полученные разгонкой ограниченного источника, определялись послыйным радиоактивным анализом после нейтронной активации об-

разцов. С целью идентификации радиоактивного изотопа  $^{32}\text{P}$  измерения радиоактивности контролировались на амплитудном анализаторе АИ-1024.

На рис. 1 представлен типичный диффузионный профиль примеси фосфора в образце профилированного кремния, полученный в результате диффузии при  $1200^\circ\text{C}$  в течение 3 ч. Коэффициент диффузии фосфора вычислялся путем сравнения экспериментального диффузионного профиля с расчетной кривой, соответствующей решению диффузионного уравнения Фика для случая диффузии из слоя конечной толщины в полуграниченное тело с отражающей границей [7]:

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2} \left( \operatorname{erf} \frac{h-x}{2\sqrt{Dt}} + \operatorname{erf} \frac{h+x}{2\sqrt{Dt}} \right),$$

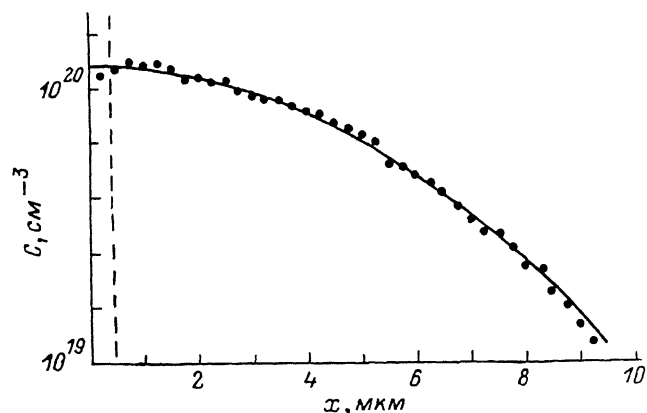


Рис. 1. Концентрационное распределение примеси фосфора в профилированном кремнии в результате диффузии при  $1200^\circ\text{C}$  в течение 3 ч.

Штриховая линия соответствует границе источника диффузанта, полученного предварительной диффузией этой примеси при  $1015^\circ\text{C}$  в течение 25 мин.

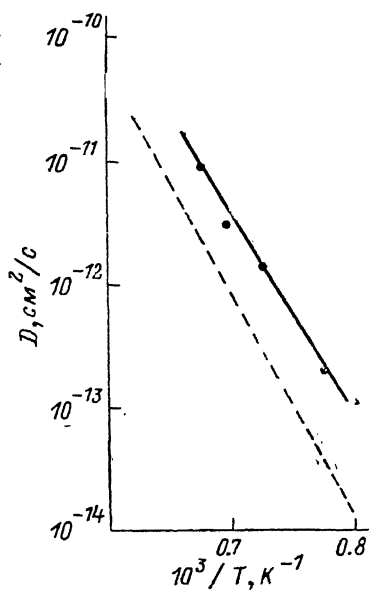


Рис. 2. Температурная зависимость коэффициентов диффузии фосфора в профилированном (сплошная линия) и монокристаллическом (штриховая [8, 9]) кремнии.

где  $C$  — распределение концентрации примеси по глубине  $x$  в результате диффузии в течение времени  $t$  с коэффициентом диффузии  $D$ , а  $C_0$  — концентрация примеси в слое ограниченного источника толщиной  $h$ . Полученные таким образом для различных температур значения коэффициентов диффузии фосфора в профилированном кремнии подчиняются аррениусовской зависимости и определяются выражением  $D = 1.9 \exp(3.3 \pm 0.08/kT)$   $\text{cm}^2/\text{c}$ . Соответствующий график температурной зависимости коэффициента диффузии приведен на рис. 2.

Из сравнения полученных нами диффузионных параметров фосфора в профилированном кремнии с некоторыми часто цитируемыми в литературе аналогичными данными для диффузии фосфора в монокристаллическом кремнии, выращенном по Чохральскому, а также с данными для пленок поликремния, приведенными в таблице, можно сделать вывод о том, что наши результаты незначительно отличаются от диффузионных параметров для монокристаллов

Диффузионные параметры фосфора в поли-, монокристаллическом и профилированном кремнии

Структура	$D_0$ , $\text{cm}^2/\text{c}$	$\Delta E$ , эВ	Литература
Моно	10.5	3.69	[8, 9]
	0.074	3.3	[10]
	29.0	3.88	[11]
Поли Профилиро- ванный	1.75	3.69	[12]
	1.9	3.3	Наши данные

кремния. Однако это отличие отчетливо выявляется при более низких температурах, где коэффициенты диффузии  $P$  в профилированном кремнии несколько выше, чем в монокристаллах. По нашему мнению, это объясняется наличием ускоренных диффузионных потоков в профилированном кремнии по специфическим дефектам такого материала, влияние которых сказывается при более низких температурах [4-6]. Это подтверждается полученными в наших экспериментах автордиограммами сечений образцов профилированного кремния, на которых были выявлены скопления примеси фосфора на дефектах структуры.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Пашков Ю. М. — В кн.: Итоги науки и техники, сер. Электроника и ее применение. М., 1979, с. 84—100.
- [2] Абросимов Н. В., Брантов С. К., Ерофеева С. А. и др. — Изв. АН СССР, сер. физ., 1979, т. 43, в. 9, с. 1989—1991.
- [3] Степанов А. В. — ЖТФ, 1959, т. 29, в. 3, с. 381—393.
- [4] Ши Дж., Гейтос Г., Абросимов Н. В. — Изв. АН СССР, сер. физ., 1979, т. 43, в. 9, с. 1992—1994.
- [5] Абросимов Н. В., Брантов С. К., Татарченко В. А., Эпельбаум Б. М. — Изв. АН СССР, Неорг. матер., 1982, т. 18, в. 2, с. 181—184.
- [6] Евтодий Б. Н., Егоров Л. П., Гринюте Г. А. — Изв. АН СССР, сер. физ., 1985, т. 49, в. 12, с. 2349—2354.
- [7] Болтакс Б. И. Диффузия в полупроводниках. Л., 1961. 462 с.
- [8] Fuller C. S., Ditzenberger J. A. — J. Appl. Phys., 1956, v. 27, N 5, p. 544—553.
- [9] Mackintosh I. M. — J. Electrochem. Soc., 1962, v. 109, N 5, p. 392—401.
- [10] Ghoshtagore R. N. — Phys. Rev. B, 1971, v. 3, N 2, p. 389—396.
- [11] Барышев Р. С. — ФТТ, 1977, т. 19, в. 3, с. 882—884.
- [12] Колешко В. М., Ковалевский А. А. Поликристаллические пленки полупроводников в микроэлектронике. Минск, 1978. 344 с.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Получено 17.05.1988  
Принято к печати 8.06.1988

ФТП, том 22, вып. 11, 1988

## ДВУМЕРНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ГАЗ В ПРОСТРАНСТВЕННО НЕОДНОРОДНОЙ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЯМЕ

Кальфа А. А., Пашковский А. Б.

Для исследования свойств двумерного ( $2D$ ) электронного газа в полупроводниках часто бывает удобно использовать структуры полевых транзисторов с селективным легированием, поскольку параметрами их потенциальных ям легко управлять, изменяя напряжение  $V_G$  на барьерном контактном электроде — затворе. При увеличении отрицательных значений  $V_G$  потенциальная яма расширяется и расстояние между размерными подзонами может стать сравнимым с тепловой энергией электронов или меньшим ее. При этом происходит заполнение высших подзон, что соответствует переходу электронного газа из  $2D$  в трехмерное ( $3D$ ) состояние. Условия такого перехода исследовались в приближении пространственно однородной потенциальной ямы [1].

Вместе с тем в ряде экспериментов, например, связанных с исследованием дрейфовых характеристик  $2D$ -электронов, представляет интерес изменение не только  $V_G$ , но и напряжения  $V_D$  между омическими контактами — истоком и стоком. Это вызывает, с одной стороны, изменение параметров потенциальной ямы вдоль канала, а с другой — разогрев электронов, дрейфовая энергия которых  $\epsilon_D$ , зависящая от той же координаты, может стать значительно больше тепловой. Дрейф электронов в пространственно неоднородных ямах обсуждался в связи с моделированием структур селективно легированных полевых транзисторов [2, 3]. Однако при этом учитывались 1—2-размерные подзоны.