

## ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ДИФФУЗИЮ БОРА, ИМПЛАНТИРОВАННОГО В КРЕМНИЙ

*В.И.Окулич, А.С.Васин, В.А.Пантелеев*

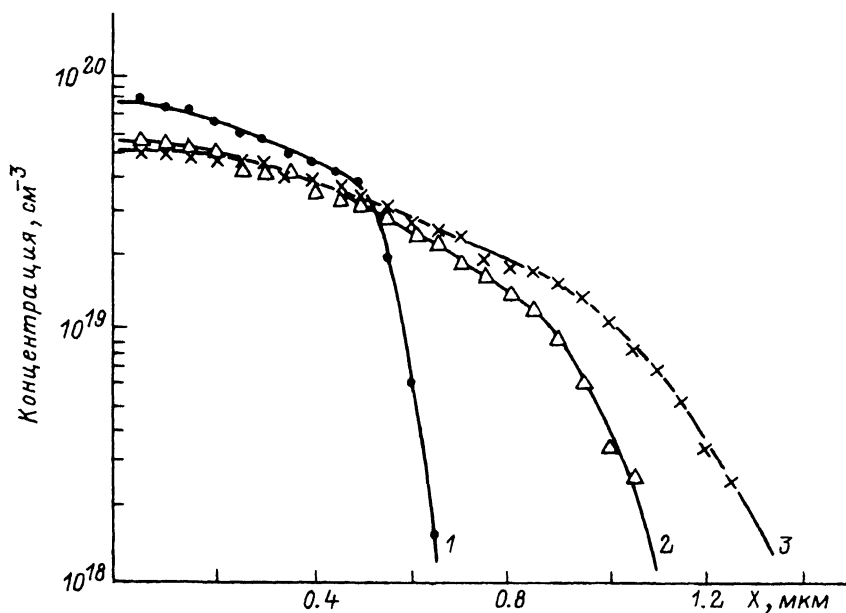
1. Исследованию влияния давления на диффузию примесей в кремнии в последние годы уделяется заметное внимание [1-3]. Ранее [4] мы наблюдали ускорение диффузии фосфора, имплантированного в кремний, под действием всестороннего газового давления  $\sim 200$  МПа. Эти результаты, а также данные по влиянию давления на кинетику изменения дефектной структуры в имплантированном слое [5] объясняются в рамках модели, согласно которой давление стимулирует распад вторичных дефектов междоузельного типа в имплантированном слое, что приводит к вытеснению примеси собственными междоузельными атомами из узлов в междоузлия и тем самым к ускорению диффузии [6-8].

Поскольку такой механизм диффузии имеет место для всех типичных примесей замещения в кремнии (элементы III и V групп) [9], мы предприняли исследование влияния давления на диффузию бора в кремнии. Одновременно мы исследовали эффект эмиттерного выдавливания, наблюдаемый при создании транзисторных структур.

2. Использовались кремниевые эпитаксиальные слои, однородно легированные фосфором с концентрацией  $2 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>. Бор вводился в такие образцы имплантацией (энергия 40 кэВ, доза  $8 \cdot 10^2$  мкКл/см<sup>2</sup>) с последующим отжигом (1000° С, 4 мин) либо диффузией из боросиликатного стекла (1150° С, 10 мин, в потоке аргона). Затем образцы подвергались отжигу в аргоне при давлении  $\sim 200$  МПа при 1000° С из имплантированного слоя и при 900° С из слоя, созданного диффузией. Контрольные образцы отжигались в тех же условиях при атмосферном давлении аргона. После отжигов с образцов снимались тонкие слои и четырехзондовым методом определялись профили носителей и глубины *p-n*-переходов.

Как следует из полученных результатов (см. рисунок и табл. 1), давление ускоряет диффузию бора из имплантированного слоя, но практически не влияет на диффузию в образцах, легированных из боросиликатного стекла. Относительная величина эффекта  $\epsilon$  (табл. 1) для бора несколько меньше, чем для фосфора [4]. Как и в случае фосфора, величина  $\epsilon$  со временем диффузии сначала несколько возрастает, а затем уменьшается.

3. Для исследования влияния давления на эффект эмиттерного выдавливания образцы после введения бора из имплантированного слоя (40 кэВ,  $8 \cdot 10^2$  мкКл/см<sup>2</sup>,  $N_s = 8 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>) или из боросиликатного стекла ( $N_s = 3 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>) покрывались защитной окисной маской, через окна в которой проводилась имплантация фосфора (40 кэВ,  $10^3$  мкКл/см<sup>2</sup>). Затем образцы отжигались в аргоне в интервале температур 900-1050° С при давлении  $\sim 200$  МПа; в тех же условиях отжигались контрольные образцы без давления.



Распределение бора в кремнии после диффузии из имплантированного слоя.  $T = 1000^\circ \text{C}$ ,  $t = 1 \text{ ч}$ , 40 мин.

1 — исходное распределение (после имплантации и отжига при  $1000^\circ \text{C}$  в течение 4 мин),  
 1 и 2 — без давления, 3 — при давлении 200 МПа.

Как следует из полученных данных, давление увеличивает глубину эмиттера, а также способствует диффузии бора из области, сформированной диффузией из имплантированного слоя. Характеризующая эффект эмиттерного выдавливания величина  $\Delta h = h_{BP} - h_B$  ( $h_B$  — глубина проникновения бора под маской,  $h_{BP}$  — под окном) практически не зависит от давления в случае диффузии бора из боросиликатного стекла, тогда как в случае диффузии бора из имплантированного слоя она заметно уменьшается при приложении давления.

Эти результаты также находятся в согласии с моделью влияния давления на диффузию [4,5].

4. Для оценки справедливости модели влияния давления на диффузию мы выполнили расчеты энергии образования собственных точечных дефектов при различных способах их генерации как при давлении, так и при его отсутствии (табл. 2). Расчет проводился методом молекулярной динамики для кристаллического кластера, содержащего свыше 500 узлов. Межатомное взаимодействие описывалось потенциалом Вукевича [10], учитывающим отклонение от равновесных значений как длины связей, так и углов между ними. Всестороннее давление моделировалось введением соответствующей силы, действующей на поверхностные атома и направленной к центру кристаллита.

Моделировались отдельная вакансия и междоузельный атом, плоские вакансионные поры из 13 и 22 узлов и дефект упаковки типа внедрения из 22 и 24 атомов. Выбор размеров и формы сложных дефектов определяется размерами кластера и симметрией дефектов. Распад дефектов моделировался путем уменьшения числа вакансий и междо-

Глубина  $p$ - $n$ -перехода для диффузии бора в кремний

$t$	$h_B$ , мкм	$h_B^P$ , мкм	$\epsilon$ , %
Диффузия из боросиликатного стекла, 900° С, $N_S = 8 \cdot 10^{18}$ см <sup>-3</sup> , $h_0 = 0.75$ мкм			
30 мин	0.81	0.83	0
2 ч	0.82	0.85	0
4 ч	0.84	0.86	0
Диффузия из имплантированного слоя, 1000° С, $N_S = 8 \cdot 10^{19}$ см <sup>-3</sup> , $h_0 = 0.65$ мкм			
20 мин	0.89	1.04	25
40 мин	0.96	1.17	30
1 ч	1.05	1.30	40
1 ч 40 мин	1.16	1.34	30

П р и м е ч а н и е.  $N_S$  — поверхностная концентрация бора,  $h_0$  — глубина  $p$ - $n$ -перехода после предварительного введения бора,  $h_B^P$  — глубина  $p$ - $n$ -перехода после отжига под давлением,  $h_B$  — то же без давления,  $\epsilon = (h_B^P - h_B)/h_0$  — относительное ускорение диффузии под давлением. Данные получены усреднением по 4-5 образцам. Погрешность определения глубины  $p$ - $n$ -перехода  $\pm 0.02$  мкм.

Таблица 2

Энергия образования собственных точечных дефектов (эВ)

Способ генерации	Без давления	Под давлением
Нейтральная вакансия		
при переходе атома из объема на поверхность	5.12	5.17
при переходе атома из объема в пору (пора 22 → пора 13 + 9 вакансий)	4.01	4.14
при переходе атома из объема на ДУ (ДУ 22 → ДУ 24 + 2 вакансии)	10.06	10.62
Дефект Френкеля	12.72	12.84
Нейтральный междоузельный атом		
при переходе с поверхности в объем	7.60	7.67
при переходе с поверхности поры в объем (пора 13 → пора 22 + 9 МА)	8.70	8.70
при переходе из ДУ в объем (ДУ 24 → ДУ 22 + 2 МА)	2.66	2.23

П р и м е ч а н и е. ДУ — дефект упаковки, МА — собственный междоузельный атом.

узельных атомов в них. Отметим, что минимальная энергия образования собственных междоузельных атомов наблюдается при распаде дефектов упаковки, для них же зафиксировано и наиболее существенное уменьшение энергии образования под давлением.

### Список литературы

- [1] Nygren E., Aziz M.J., Turnbull D. et al. // Impur. Diff. and Gettering Silicon Symp. Boston, Mass., Nov. 27-30, 1984. Pittsburgh (Pa), 1985. P. 101-104.
- [2] Antonelli A., Bernholl J. // Phys. Rev. B. 1989. V. 40. N 15. P. 10643-10646.
- [3] Sugino O., Oshiyama A. // Phys. Rev. B. 1992. V. 46. N 19. P. 12335-12339.
- [4] Васин А.С., Окулич В.И., Пантелеев В.А. // ФТП. 1989. Т. 23. № 3. С. 483-487.
- [5] Васин А.С., Окулич В.И., Пантелеев В.А., Кудрявцева Р.В., Куприянов Е.В., Тетельбаум Д.И. // Деп. ВИНТИ. 1990. № 4808-ВДО. 19 с.
- [6] Пантелеев В.А. // ФТТ. 1979. Т. 21. № 11. С. 3388-3391.
- [7] Fair R.B. // J. Appl. Phys. 1980. V. 51. N 11. P. 5825-5832.
- [8] Hu S.M., Fahej P., Dutton R.W. // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. N 12. P. 6912-6922.
- [9] Nichols C.S., van de Walle, Pantelidis S.T. // Phys. Rev. B. 1989. V. 40. N 8. P. 5484-5496.
- [10] Vuksevich M.L. // Phys. St. Sol. 1970. V. 40. N 1. P. 193-205.

Нижегородский государственный университет  
им. Н.И.Лобачевского

Поступило в Редакцию  
6 ноября 1992г.  
В окончательной редакции  
29 сентября 1993 г.

УДК 535.343.2

© Физика твердого тела, том 36, № 2, 1994  
Solid State Physics, vol. 36, N 2, 1994

## ПОЛЕВАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ФАРАДЕЕВСКОГО ВРАЩЕНИЯ ТЕРБИЙ-ИТТРИЕВОГО ФЕРРИТА-ГРАНАТА $Tb_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O_{12}$ В СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

У.В.Валиев

Хорошо известно, что характерные особенности магнитных, оптических свойств редкоземельных ферритов-гранатов (РЗФГ) обусловлены своеобразием электронной структуры  $4f$ -оболочки редкоземельного (РЗ) иона. Эта оболочка формируется в структуре граната кристаллическим окружением низкой симметрии (группа симметрии  $D_2$ ), полностью снимающим вырождение электронных энергетических уровней основного и возбужденных мультиплетов РЗ-ионов. Поэтому при гелиевых температурах, когда максимальна несферичность  $4f$ -оболочки, термодинамические свойства РЗФГ определяются самыми нижними шарковскими подуровнями основного мультиплета РЗ-иона. Особенно отчетливо это проявляется при исследовании магнитных [1], магнитооптических [2] свойств тербий-иттриевых ферритов-гранатов  $Tb_xY_{3-x}Fe_5O_{12}$  (ТИФГ) с малым содержанием ионов  $Tb^{3+}$  ( $x \leq 0.65$ ) в магнитных полях  $\sim 75$  кЭ при гелиевых температурах.

Скачкообразные изменения намагниченности и эффекта Фарадея интерпретировались с точки зрения «магнитного эффекта Яна-