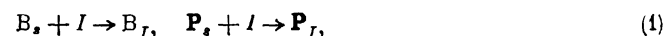


ИЗМЕНЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ АТОМОВ БОРА И ФОСФОРА В УЗЛАХ РЕШЕТКИ КРЕМНИЯ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ЭЛЕКТРОНАМИ

Ахметов В. Д., Болотов В. В., Камаев Г. Н., Смирнов Л. С.

Проведены ИК спектрометрические исследования изменения концентрации узлового бора (B_s) и фосфора (P_s) в узлах решетки кремния при облучении электронами с энергией 3.5 МэВ в температурном интервале 20÷700 °С. Показано, что во всем диапазоне температур концентрация легирующих примесей в узлах с дозой облучения уменьшается. Анализ результатов для температур облучения ниже и выше температуры отжига вакансионных комплексов с легирующими примесями позволяет сделать вывод об эффективном взаимодействии атомов B_s и P_s с междоузельными атомами кремния во всем исследованном температурном интервале. Отсутствие изменений концентрации B_s и P_s при $T \geq 700$ °С свидетельствует о достижении стационарной концентрации примесей в узлах и междоузлиях для данных условий облучения.

В настоящее время установлено, что облучение высокоэнергетическими электронами приводит, начиная с температур жидкого гелия, к вытеснению акцепторных примесей из узлов в междоузельное положение (реакция Уоткинса) [1]. Недавние результаты, полученные нами методом ИК спектроскопии [2], показывают наличие реакции с междоузельными атомами кремния и для атомов фосфора. При этом получены экспериментальные указания на то, что формируются междоузельные комплексы, включающие в себя атомы фосфора. Поскольку количество примеси, оставшейся в междоузельном положении, зависит от темпа двух реакций — вытеснения атомов примеси в междоузельное положение и обратного растворения их в вакансиях



то изменение числа свободных I и V за счет распада слабо связанных комплексов при температурах облучения, когда концентрация равновесных I и V еще низка, должно существенно влиять на результирующую концентрацию примеси в междоузельном положении.

В соответствии с этим целью данной работы было исследование кинетики изменений концентрации примеси бора и фосфора в замещающем положении в решетке кремния в зависимости от температуры облучения.

Методика эксперимента

Эксперименты проводились на кремнии, выращенном по методу Чохральского с $\rho=1$ Ом·см. Концентрации легирующих примесей, углерода и кислорода в исследуемых материалах, полученные по данным ИК спектроскопии, приведены в табл. 1. Образцы облучались электронами с энергией 3.5 МэВ в температурном интервале 20÷700 °С. Плотность тока электронов составляла 1 мкА/см.

Концентрации B_s , P_s в узлах после облучения определялись из совместных измерений ИК поглощения на электронных переходах в водородоподобной

Таблица 1

Содержание примесей в исследуемом кремнии

Материал	Концентрация леггирующей примеси $\cdot 10^{-18}$, см $^{-3}$	Концентрация углерода в узлах $\cdot 10^{-18}$, см $^{-3}$	Концентрация междуузельного кислорода $\cdot 10^{-18}$, см $^{-3}$
КЭФ-1	0.6	$\leq 3 \div 6$	$1.2 \div 1.6$
КДБ-1	2.6	70	0.4

серии, обусловленной мелкими уровнями фосфора и бора в узлах при $K=318$, 325 см^{-1} соответственно [3], и эффекта Холла. Температура измерений составляла $T=78 \text{ К}$. Расчет концентрации фосфора и бора в узлах проводился по формулам

$$N_P = \frac{\sigma_P S}{f_p}, \text{ см}^{-3}, \quad N_B = \frac{\sigma_B S}{1 - f_p}, \text{ см}^{-3},$$

где f_p — функция заполнения уровня электронами при 78 К , рассчитанная на основе холловских измерений в приближении слабой компенсации [4]; S , см $^{-2}$ — площадь под полосой поглощения, определяемая из пересчета спектров ИК пропускания на спектры поглощения; σ_P , σ_B , см $^{-1}$ — калибровочные множители, вычисленные из экспериментальных данных ряда измерений исходных образцов. Погрешность определения концентрации примеси В, и Р, составляет $\sim 15 \%$ [2]. Величины калибровочных множителей составляют

$$\sigma_B = 5.4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-1}, \quad \sigma_P = 3.7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-1}.$$

Спектры ИК пропускания регистрировались на двухлучевом спектрофотометре ИКС-22В. Омические контакты для электрофизических измерений изготавливались нанесением золота в электрическом разряде и втиранием индий-галлиевой пасты.

Результаты и их обсуждение

1. $p\text{-Si}\langle B \rangle$. Дозовые зависимости изменения концентрации бора в узлах при различных температурах облучения приведены на рис. 1, а. Видно, что во всем исследуемом интервале температур облучения $20 \div 700 \text{ }^\circ\text{C}$ наблюдается уменьшение концентрации атомов бора в замещающем положении с ростом дозы электронов. Сравнение концентрации свободных дырок (рис. 1, б) с концентрацией бора после облучения при различных температурах (рис. 1, а) показывает практически полное соответствие между убылью бора в узловом состоянии и убылью концентрации дырок. Поэтому следует считать, что изменение электропроводности $p\text{-Si}$ при облучении обусловлено уменьшением концентрации акцепторных состояний бора, а продукты комплексообразования с бором в $p\text{-Si}$ электронейтральны. Изменение концентрации атомов бора в узлах для различных $T_{обл}$ (рис. 2) достигает максимального значения при $T_{обл} \sim 180 \div 200 \text{ }^\circ\text{C}$.

Основными реакциями взаимодействия первичных дефектов с В, являются: 1) образование комплексов с вакансиями (B, V) и 2) вытеснение бора из узлов междуузельными атомами кремния [1]. Поскольку комплексы B, V нестабильны при $T > 300 \text{ К}$ [5], следует считать, что уменьшение концентрации В, связано прежде всего с вытеснением атомов бора из узлов.¹

Попадая в междуузельное положение, атомы бора могут создавать комплексы $B_I B_s$ (стабильные до 370 К) и междуузельные кластеры типа $B_I I_n$ [6, 7]. На наличие таких кластеров указывает резкое падение низкотемпературной под-

¹ Вытеснение акцепторной примеси из узлов (реакция Уоткинса [1]) обнаружено при температурах жидкого гелия и при $\sim 300 \text{ К}$, поэтому очевидна существенность этой реакции и при $\approx 200 \div 700 \text{ }^\circ\text{C}$.

вижности дырок ($T_{\text{взм}} \sim 77 \text{ K}$) в диапазоне температур облучения, соответствующих максимальной эффективности удаления B_2 ($20 \div 200 \text{ }^\circ\text{C}$) (табл. 2).

Как уже отмечалось, результирующее количество атомов бора в междоузлиях определяется реакциями (1) и (2). Наблюдаемое повышение эффективности

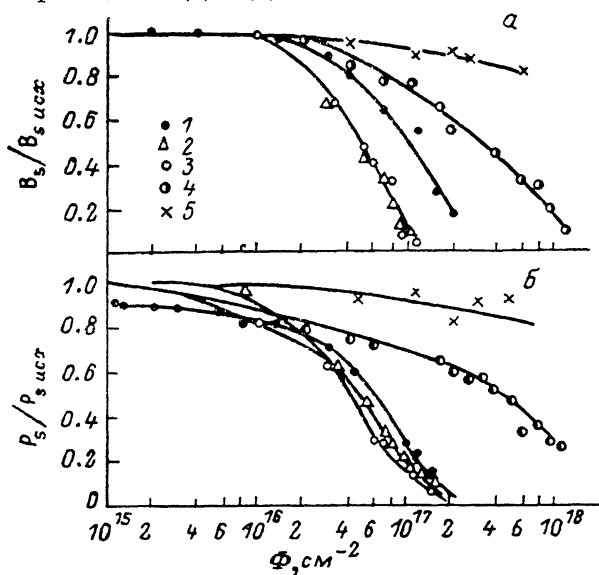


Рис. 1. Дозовые зависимости изменения концентрации атомов бора в узлах (а) и дырок (б).
 $T_{\text{обл}}$, $^\circ\text{C}$: 1 — 20, 2 — 180, 3 — 290, 4 — 400, 5 — 700.

удаления бора при увеличении температуры облучения от комнатной до $300 \text{ }^\circ\text{C}$ может быть связано с относительным увеличением темпа реакций междоузельных атомов с бором по сравнению с темпом реакции растворения междоузельных

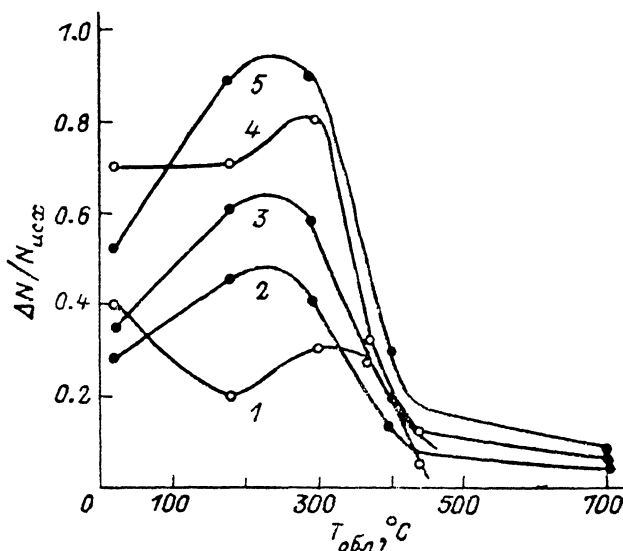


Рис. 2. Влияние температуры облучения на изменение концентрации атомов бора (2, 3, 5) и фосфора (1, 4) в узлах.

Дозы облучения $\cdot 10^{-16}$, см^{-2} : 1 — 1, 2 — 4, 3 — 6, 4 — 2, 5 — 10.

ных боросодержащих комплексов в вакансиях. Спад эффективности удаления бора из узлов при дальнейшем повышении температуры облучения до $400 \div 700 \text{ }^\circ\text{C}$ вызван, по-видимому, термической нестабильностью междоузельных боросодержащих комплексов и растворением атомов бора в узлах.

Таблица 2

Подвижность свободных носителей в кремнии ($T_{\text{изм}}=77$ К) в зависимости от температуры облучения *

Материал	$\Phi \cdot 10^{-17}, \text{см}^{-2}$	$T_{\text{обл}}, ^\circ\text{C}$	$\mu \cdot 10^{-3}, \text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
p-Si	1.5	20	0.78
		180	0.03
		290	0.10
		400	2.05
		700	4.20
n-Si<P>	0.24	20	—
		180	1.064
		300	0.268
		370	5.30
		500	7.60

Примечание. * До облучения $\mu_n \approx 9100$, $\mu_p \approx 4300$ $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

2. n-Si<P>. Из рис. 3 видно, что в процессе облучения идет уменьшение концентрации атомов фосфора в узлах при всех использованных $T_{\text{обл}}$. Причем, если $T_{\text{обл}} \leq 300$ $^\circ\text{C}$, концентрация P_s уменьшается во всем диапазоне доз облучения, а для $T_{\text{обл}} > 300$ $^\circ\text{C}$ дозовые зависимости имеют участки насыщения, по-

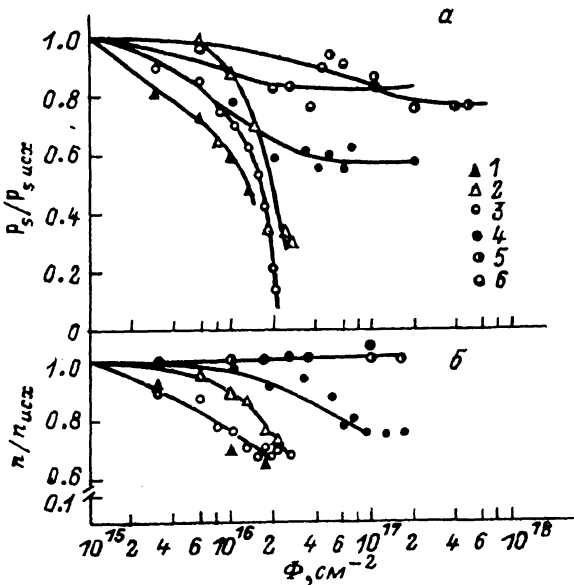


Рис. 3. Дозовые зависимости изменения концентрации атомов фосфора в узлах (а) и электронов (б).

$T_{\text{обл}}, ^\circ\text{C}$: 1 — 20, 2 — 180, 3 — 300, 4 — 370, 5 — 440, 6 — 500.

казывающие существенность процессов восстановления электрической активности атомов фосфора. Проведенные методом DLTS измерения показали, что концентрация А-центров (V_2) в температурном интервале свыше 300 $^\circ\text{C}$ снижается, а концентрация Е-центров при $T_{\text{обл}} > 150$ $^\circ\text{C}$ из-за термической диссоциации становится пренебрежимо малой. вновь образующиеся дефекты неизвестной природы (уровни $E_c - 0.18$; $E_c - 0.22$; $E_c - 0.23$; $E_c - 0.3$; $E_c - 0.36$; $E_c - 0.42$ эВ) содержатся в концентрациях, не превышающих 10^{14} см^{-3} , что значительно ниже изменений концентрации P_s . Поэтому можно предположить, что, как и при облучении при 20 $^\circ\text{C}$ [2], в основном с участием атомов фосфора формируются дефекты междоузельного типа, не имеющие глубоких уровней в верхней половине запрещенной зоны. По аналогии с кремнием р-типа наблюдаемое снижение подвижности электронов ($T_{\text{изм}} \approx 77$ К) после облучения при температурах 20-

300 °С (табл. 2) может быть интерпретировано как рассеяние на междоузельных дефектах. Данные на рис. 2 и 3 показывают снижение скорости удаления фосфора из замещающего положения при $T_{0.61} > 300$ °С, что, вероятно, обусловлено нестабильностью междоузельных дефектов и растворением P_I в вакансиях.

Из сравнения данных на рис. 3, а и б следует, что эффективность удаления фосфора из узлов выше, чем свободных электронов во всем температурном интервале $T_{0.61}$, что свидетельствует об образовании при облучении донорных центров. Сравнивая удаление фосфора и носителей при разных $T_{0.61}$, можно заключить, что с повышением температуры до 300 °С идет рост концентрации вводимых донорных центров радиационного происхождения, а при $T_{0.61} > 300$ °С — и спад.

Таким образом, на основе прямых измерений впервые исследовано изменение концентрации атомов бора и фосфора в узлах решетки кремния в зависимости от температуры облучения. Полученные результаты интерпретированы исходя из наличия двух процессов: 1) «реакции Уоткинса» и появления междоузельных комплексов, содержащих легирующие примеси; 2) растворения междоузельной примеси в вакансиях при достаточно высоких температурах. Отсутствие изменений концентрации примесей В_с и Р_с при высоких температурах облучения показывает, что их концентрация близка к стационарной для условий облучения.

В заключение авторы благодарят А. В. Карпова за помощь в измерениях методом DLTS.

Список литературы

- [1] Watkins G. D. // Inst. Phys. Conf. Ser. N 23. London—Bristol, 1975. P. 1—22.
- [2] Болотов В. В., Камаев Г. Н., Смирнов Л. С. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 2. С. 210—214.
- [3] Ramdas A. K., Rodrigues S. // Rep. Prog. Phys. 1981. V. 44. N 12. P. 1297—1387.
- [4] Киреев П. С. Физика полупроводников. М., 1969. 592 с.
- [5] Kimerling L. S. // Inst. Phys. Conf. Ser. N 31. London—Bristol, 1977. P. 221—230.
- [6] Laitwaite K., Newman R. S., Totterdell D. H. J. // J. Phys. C: Sol. St. Phys. 1975. V. 8. N 2. P. 236—242.
- [7] Akhmetov V. D., Bolotov V. V. // Phys. St. Sol. (a). 1982. V. 72. N 1. P. 61—68.

Институт физики полупроводников СО АН СССР
Новосибирск

Получена 30.03.1989
Принята к печати 11.08.1989