

ПОВЕДЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ БОРА И ФОСФОРА В КРЕМНИИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ НЕЙТРОНАМИ И ПОСЛЕДУЮЩИХ ОТЖИГАХ

Ахметов В. Д., Болотов В. В.

В p -Si и n -Si<P> с содержанием легирующей примеси $\approx 10^{19}$ см $^{-3}$ методом ИК поглощения в сочетании с электрофизическими измерениями изучены накопление радиационных дефектов, поведение примесей В и Р при облучении нейтронами и последующих отжигах.

Установлено, что фосфор в основном остается в замещающем положении как в ходе облучения, так и при последующих отжигах до ≈ 200 °С, в то время как около 95 % примеси В после облучения оказывается в дефектных ассоциациях. Восстановление концентрации узлового В начинается с 350–400 °С.

При облучении Si наблюдаются повышенный рост концентрации дивакансий и дополнительное ушпрение колебательных полос поглощения по сравнению с n -Si и p -Si с уровнем легирования $\sim 10^{15}$ см $^{-3}$. Общее же разупорядочение решетки, регистрируемое по однофоновому поглощению, а также накопление VO-комплексов не чувствительны к присутствию $\approx 10^{19}$ см $^{-3}$ примеси В или Р.

Различия в поведении В и Р объясняются преобладающим действием реакций междоузельного кластерообразования для В и реакциями аннигиляции компонентов пар Френкеля в случае Р.

Обнаружены новые полосы поглощения в области спектра 1–20 мкм, возникающие в Si, Si<P> в ходе облучения и последующих отжигов, высказаны предположения об их природе.

Введение. Несмотря на многолетний период изучения радиационного дефектообразования в кремнии, к настоящему времени не имеется исчерпывающих и прямых данных о перестройке состояний основных легирующих примесей (В и Р) в решетке Si под действием нейтронного облучения и последующих отжигов, а также о роли В и Р в общей картине накопления и отжига дефектов, вызванных облучением нейтронами. Причиной этого являются методические трудности в применении селективных методов наблюдения данных примесных состояний на фоне преобладающих на порядки по концентрации технологических загрязнений (О, С) и собственных радиационных дефектов, распределенных неоднородно по кристаллу.

В то же время вопрос о реакциях с участием В и Р при облучении нейтронами и последующих отжигах остается актуальным в связи с развитием методов нейтронного легирования, а также в связи с проблемами радиационной стойкости.

Результаты работы [1] по имплантации в сильно легированный Si показывают, что роль легирующей примеси в общем разупорядочении решетки может быть значительной.

Целью данной работы является детальное выяснение состояния примесей В и Р (при их концентрации $\approx 10^{19}$ см $^{-3}$), их вклада в общую дефектность кремния в ходе нейтронного облучения и последующих отжигов на основе применения ИК спектроскопии идентифицированных колебательных и электронных полос поглощения на примесях и дефектах в кремнии.

Методика эксперимента. Использовался бездислокационный кремний, выращенный по методу Чохральского, марок КДБ-0.01 (Si) и КЭФ-0.005 (Si<P>) с концентрацией носителей $(1.0 \div 1.1) \cdot 10^{19}$ и $(1.2 \div 1.3) \cdot 10^{19}$ см $^{-3}$ соответственно. Для сравнения в ряде случаев применялся относительно слабо

легированный тигельный кремний КДБ-7.5 и КЭФ-7.5 с концентрацией легирующей примеси $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Облучение реакторными нейтронами осуществлялось в водном канале при температуре $60 \div 80 \text{ }^\circ\text{C}$ с соотношением тепловых и быстрых нейтронов 1 : 1. Исследуемые образцы вырезались из заранее облученных шайб, причем с поверхности каждой шайбы снимался слой не менее $\sim 1 \text{ мм}$, после чего они проходили шлифовку и химическое травление.

Измерение спектров пропускания проводилось при 78 и 300 К в дифференциальном режиме на спектрофотометрах Specord-75IR (в диапазоне длин волн $2.5 \div 25 \text{ мкм}$) и СФ-8 (в диапазоне $1 \div 2.5 \text{ мкм}$). В качестве образца сравнения использовался высокочистый зонно-плавленый «силановый» кремний. В некоторых случаях при измерениях на Specord-75IR создавалась дополнительная подсветка образца сфокусированным излучением лампы накаливания с падающей на образец мощностью $\approx 1 \text{ Вт/см}^2$. Толщина образцов для достижения наилучшей точности в определении коэффициента поглощения выбиралась из соотношения $d \sim 1/\alpha$ и составляла $0.02 \div 2 \text{ мм}$ в зависимости от интенсивности регистрируемого участка спектра. Точность измерения коэффициента пропускания составляла 1—3 %.

Из спектров пропускания вычислялись интенсивности полос поглощения на дивансиях ($V_2^- - 1.8 \text{ мкм}$; $V_2^- - 3.46$ и 3.61 мкм), А-центрах ($VO^0 - 12 \text{ мкм}$; $VO^- - 11.3 \text{ мкм}$), углероде ($C_s - 17.5 \text{ мкм}$), боре ($B_s^- - 16.1 \text{ мкм}$), фосфоре ($P_s^+ - 22.7 \text{ мкм}$), в замещающих положениях, боре в составе междоузельных кластеров ($12.5 \div 14.3 \text{ мкм}$), а также величины однофононного погло-

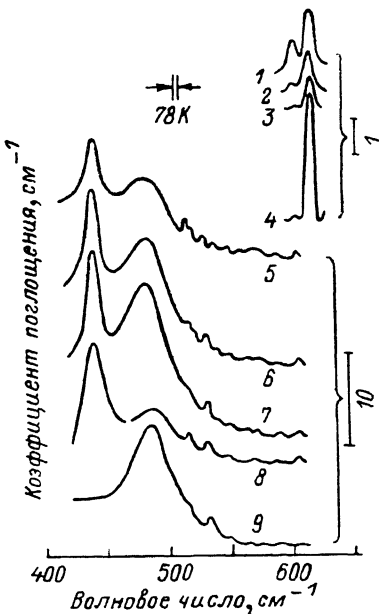


Рис. 1. Спектры колебательного поглощения бора (1—4) и фосфора (5—9) в замещающем положении после облучения нейтронами (1—3, 5—7, 9) и последующего отжига (4, 8).

Материал: 1—4 — КДБ-0.01; 5—8 — КЭФ-0.005; 9 — КЭФ-7.5. Доза облучения, см^{-2} : 1, 5 — $5 \cdot 10^{18}$; 2, 6 — 10^{19} ; 3, 4 — 10^{20} ; 7—9 — $2 \cdot 10^{19}$. $T_{\text{отж}}$, $^\circ\text{C}$: 4 — 400, 8 — 200. Длительность отжига 1 ч.

щения ($\alpha_{488} - 20.1 \text{ мкм}$). Калибровочные множители для определения абсолютной концентрации B_s и P_s из интенсивностей соответствующих полос поглощения определялись из работы [2], где приведен спектр $\text{Si}\langle B, P \rangle$ с содержанием $[B], [P] = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ после облучения электронами с энергией $E = 2 \text{ МэВ}$, дозой $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Предположив, что скорость удаления B_s, P_s при облучении близка к 1 см^{-1} [3], получаем $N_{B_s} = \alpha_{16.1 \text{ мкм}} \cdot 2.85 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$; $N_{P_s} = \alpha_{22.7 \text{ мкм}} \times 1.6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$.

Удельное сопротивление ρ , концентрация n и подвижность носителей μ определялись при комнатной температуре из электропроводности и эффекта Холла в геометрии Ван-дер-Пау. Для получения больших сигналов на образцах размером $0.2 \times 1 \times 2 \text{ см}$ с малым сопротивлением ток через образец повышался до $\approx 1 \text{ А}$.

Результаты и обсуждение. Минимальные дозы облучения, начиная с которых образцы $\text{Si}\langle P \rangle, \text{Si}\langle B \rangle$ компенсировались настолько, что поглощение на свободных носителях не маскировало отдельных полос поглощения, составляли $\sim 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Раскомпенсация при последующих отжигах ограничивала диапазон по температуре отжига $T_{\text{отж}} \approx 400 \text{ }^\circ\text{C}$ для $\text{Si}\langle B \rangle$ и $\approx 200 \text{ }^\circ\text{C}$ для $\text{Si}\langle P \rangle$.

На рис. 1 приведены полосы поглощения на колебаниях B_s ($K = 622 \text{ см}^{-1}$) и P_s ($K = 441 \text{ см}^{-1}$) в кремнии марок КДБ-0.01 и КЭФ-0.005 соответственно после различных доз облучения (полоса 441 см^{-1} наблюдается на фоне однофононного поглощения 488 см^{-1} , форма которого показана кривой 9 на рис. 1). Спек-

тры свидетельствуют о том, что концентрация узлового В в облученном Si⟨B⟩ составляет незначительную долю от полного содержания В (около 5 %). Концентрация же узлового фосфора в облученном Si⟨P⟩ сопоставима с его полной концентрацией $\approx 10^{19}$ см⁻³.

Дозовые зависимости μ_p , μ_n , концентрации P_s , V_s , n , p приведены на рис. 2. Характер изменения концентрации и подвижности носителей с дозой хорошо согласуется с тем, что фосфор в основном остается в узлах после облучения, а бор переходит в другое состояние. Действительно, в Si⟨P⟩ в момент достижения 99%-й компенсации проводимости (доза $\Phi \approx 2 \cdot 10^{18}$ см⁻²) наблюдается двухкратное падение μ — от ≈ 100 до ≈ 50 см²/В·с (рис. 2, б). С учетом того, что в сильно легированном Si μ обратно пропорциональна концентрации заряженных центров, спад μ вдвое при достижении компенсации должен иметь место при введении компенсирующих центров в том же количестве, что и полное содержание Р. В то же время в Si⟨B⟩ при достижении практически полной компенсации μ уменьшалась всего на ≈ 10 % (рис. 2, а), что и следовало ожидать, если количество компенсирующих центров ниже исходной концентрации V_s .

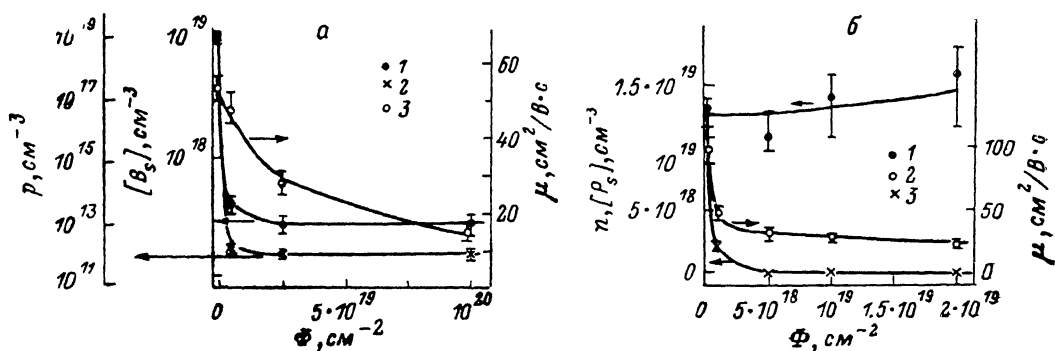


Рис. 2. Дозовые зависимости концентрации легирующей примеси в замещающем положении (1), концентрации носителей заряда (2) и подвижности (3).

Материал: а — КДБ-0.01; б — КЭФ-0.005.

Установленное поведение В и Р при нейтронном облучении находится в соответствии с имеющимися литературными данными по облучению сильно легированных Si⟨B+P⟩, Si⟨B⟩, Si⟨P⟩ электронами [3, 4] и Si⟨B+P⟩ нейтронами [5]. Так, в [4] получено, что в Si⟨P⟩ с $N_P = 2 \cdot 10^{18}$ см⁻³, облученном электронами дозой $1.2 \cdot 10^{20}$ см⁻², в узлах остается более половины от исходного содержания P_s . Результат объяснялся реакциями аннигиляции вакансий (V) и междоузельных атомов (I) на фосфоре: $P_s + V \rightarrow VP$; $VP + I \rightarrow P_s$. В [3, 5] наблюдалось эффективное удаление V_s из узлов при облучении электронами образцов, содержащих $10^{19} - 10^{20}$ см⁻³ В либо В совместно с компенсирующими примесями Р, Li в том же количестве. Интерпретация быстрого ухода V_s из узлов основывалась на гипотезе о формировании междоузельных боросодержащих кластеров [3, 5], наблюдаемых по ИК поглощению (Q-полосы, 733 и 760 см⁻¹ [2]). Как и в [5], мы регистрировали Q-полосы, растущие, а затем спадающие по мере набора дозы, что свидетельствует о непрерывной перестройке междоузельных боросодержащих комплексов [5], вероятнее всего, в сторону их укрупнения.

Таким образом, присутствие разупорядоченных областей (РО) не повлияло существенно на поведение В и Р при облучении. Это представляется естественным, поскольку при высоких дозах облучения начиная с $\Phi \approx 5 \cdot 10^{18}$ см⁻² наступает перекрытие РО [6] и, следовательно, неоднородности в распределении радиационных дефектов сглаживаются. При меньших же дозах облучения (до перекрытия РО) вакансионные дефекты, согласно модели Ухина [7], локализованы в ядре РО, следовательно, в остающейся вне ядер РО большей части объема кристалла I преобладают по концентрации над V, что приведет только к относительному усилению темпа реакций, приводящих к удалению V_s из узлов и возврату фосфора из состояния VP в P_s .

Поскольку неизменность состояния V_2 в ходе облучения объясняется их эффективным взаимодействием с V и I , представляется интересным установить, насколько сильно изменится общая картина радиационного дефектообразования в присутствии $\approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$ V либо P . Для выяснения проводилось сравнение дозовых зависимостей концентрации дивакансий (V_2), A -центров (VO), а также интенсивности однофононного поглощения (α_{488})¹ и полуширины колебательной полосы поглощения кислорода в составе A -центра (Δk_{V_2}). Результаты сравнения представлены на рис. 3. Обращает на себя внимание практическое совпадение дозовых зависимостей однофононного поглощения для всех исследуемых материалов, означающее, что введение $\approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$ V либо P не изменило характера напряжений, создаваемых РО. Кинетика накопления A -центров у всех материалов также совпадает. Наибольшие различия наблюдаются в накоплении V_2 . В $\text{Si}\langle B \rangle N_{V_2}$ в 2—3 раза больше, нежели в слабо легированном Si . Абсолютные различия N_{V_2} между $\text{Si}\langle B \rangle$ и слабо легированным n - и p - Si достигают $\approx 4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, что в 4 раза превосходит концентрацию бора в $\text{Si}\langle B \rangle$. Столь эффективное влияние V на накопление V_2 трудно объяснить чем-либо иным, кроме последовательного захвата собственных I на бор (реак-

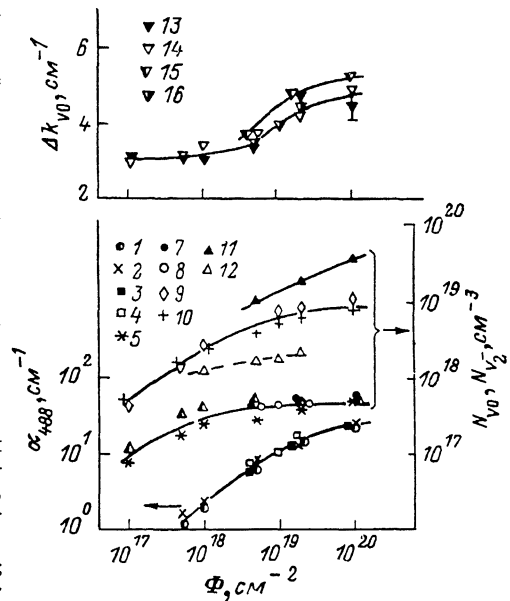


Рис. 3. Дозовые зависимости интенсивности однофононного поглощения (1—4), концентрации A -центров (5—8), дивакансий (9—12), полуширины полосы поглощения на A -центрах (13—16).

Материал: 1, 5, 9, 13 — КДБ-7.5; 2, 6, 10, 14 — КЭФ-7.5; 3, 7, 11, 15 — КДБ-0.01; 4, 8, 12, 16 — КЭФ-0.005.

ции $V_n + I \rightarrow V_n I$; $V_I + I \rightarrow V_I I$; $V_I I + I \rightarrow V_I I_2$; ...; $V_I I_{n+1}$, где $n = 1, 2, \dots$), в результате чего значительное количество I (порядка nV_n) перестает участвовать в других реакциях, в том числе и в реакции $V_2 + I \rightarrow V$.

Понижение концентрации I в $\text{Si}\langle B \rangle$ должно было бы привести и к росту другого вакансионного комплекса, A -центра, чего, однако, нет. Возможно, что, во-первых, концентрация O_I в $\text{Si}\langle B \rangle$ ниже, чем в слабо легированном Si ; во-вторых, A -центры формируются неоднородно по объему. В пользу второго предположения свидетельствует дополнительное уширение полосы поглощения на A -центрах в $\text{Si}\langle B \rangle$ по сравнению с $\text{Si}\langle P \rangle$ и слабо легированным Si (рис. 3, верхние кривые).

Относительно концентрации V_2 в $\text{Si}\langle P \rangle$ (рис. 3, штриховая кривая) однозначного заключения сделать нельзя. В отличие от $\text{Si}\langle B \rangle$ и слабо легированного Si , где подавляющее большинство V_2 находится в одном зарядовом состоянии V_2^- , в $\text{Si}\langle P \rangle$, значительная доля V_2 находится в состоянии V_2^{\pm} в силу большей близости уровня Ферми к зоне проводимости [12, 13]. V_2^{\pm} имеет другую (дублеты 2770 и 2890 см^{-1} [12, 13]), нежели V_2^- , полосу поглощения, калибровочный множитель для которой неизвестен. Если же предположить равенство калибровочных множителей для определения концентрации V_2 из интегральной интенсивности полос поглощения на V_2^- и V_2^{\pm} , то оказывается, что полная концентрация дивакансий в $\text{Si}\langle P \rangle$ после $\Phi = 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ практически такая же, как и в слабо легированном Si .

¹ Однофононное поглощение не существует в совершенных ковалентных кристаллах и становится возможным при создании неоднородных по объему деформаций, нарушающих периодичность решетки [6, 8, 9]; уширение полосы локального колебания также вызвано неоднородными механическими напряжениями [10, 11].

Отжиг облученных Si⟨B⟩ и Si⟨P⟩ показал следующее. Концентрация P_s в Si⟨P⟩, облученном дозой $\Phi = 2 \cdot 10^{19}$ см⁻², остается неизменной с точностью $\approx 20\%$ при изохронном отжиге от 100 до 200 °C с шагом 20 °C. На рис. 1 приведена полоса поглощения P_s после отжига при 200 °C. Видно, что она имеет ту же интенсивность, что и до отжига. Отжиг однофазонного поглощения и дивакансий также не показал различий между Si⟨P⟩ и слабо легированным Si. При отжиге начиная с $T = 100$ °C n и μ непрерывно растут с ростом $T_{отж}$, полное восстановление n и μ (с точностью 5—7 %) до исходного значения происходит при $T_{отж} = 500 \div 600$ °C в зависимости от дозы облучения. Этот температурный интервал на 100—200 °C ниже того, при котором достигается максимальное значение n в слабо легированном Si, облученном нейтронами [14]. Снижение температуры отжига в кремнии КЭФ-0.005 указывает на то, что восстановление концентрации носителей обусловлено не встраиванием атомов фосфора в узлы, а отжигом компенсирующих дефектов; вклад последних в компенсацию проводимости падает с ростом уровня легирования.

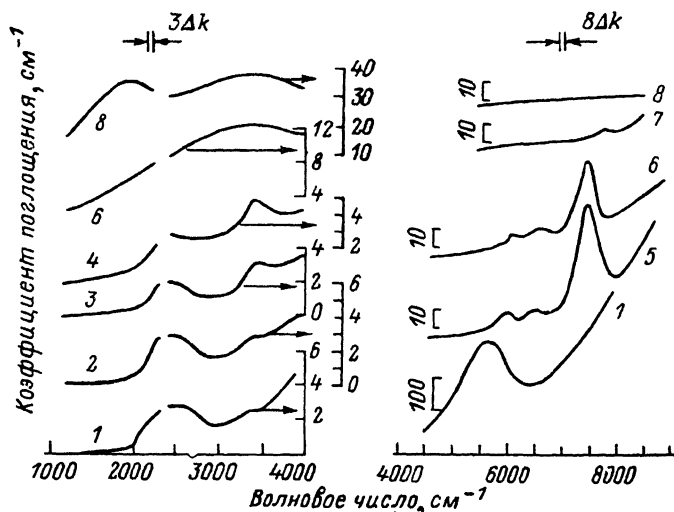


Рис. 4. Спектры поглощения в кремнии КДБ-0.01 после облучения дозой 10^{20} см⁻² (нижние кривые) и последующих отжигов.

$T_{изм}$, К: правая нижняя кривая — 300, остальные — 78. Длительность отжига 1 ч. $T_{отж}$, °C: 1 — 20, 2 — 150, 3 — 200, 4 — 300, 5 — 325, 6 — 350, 7 — 375, 8 — 400.

В p -Si⟨B⟩ проводимость при отжиге нарастала слабее, чем в n -Si⟨P⟩, что позволило провести ИК измерения до $T_{отж} = 400$ °C. Оказалось, что концентрация узлового В_s плавно растет с повышением $T_{отж}$, причем тем сильнее, чем выше доза облучения. Так, после отжига (300 °C, 1 ч) в образцах Si⟨B⟩, облученных дозами $2 \cdot 10^{19}$ и 10^{20} см⁻², концентрация узлового бора составила $\approx 3.5 \cdot 10^{18}$ и $\approx 6 \cdot 10^{18}$ см⁻³ соответственно. Этот факт можно понять, если обратиться к обнаруженному Ньюменом снижению $T_{отж}$ дивакансий по мере увеличения дозы [15]. Действительно, если предполагать, что отжиг обусловлен взаимной аннигиляцией вакансионных и междоузельных дефектов при их встрече, инициируемой отжигом, то рост концентраций реагирующих компонентов по мере набора дозы приведет к увеличению скорости отжига дефектов.

Наряду с известными полосами поглощения в Si⟨B⟩ и Si⟨P⟩ на различных этапах облучения и отжига обнаружены новые полосы поглощения, краткая характеристика которых приведена в таблице. Спектры наиболее интенсивных полос, возникающих при отжиге Si⟨B⟩, показаны на рис. 4. Интерпретация полос (см. таблицу) предположительна и в основном базируется на энергетическом положении полос, их близости к идентифицированным полосам поглощения, на анализе полуширин полос, зависимости их интенсивности от температуры измерения и интенсивности внешней подсветки. Так, в Si⟨P⟩ полоса 538 см⁻¹ находится рядом с полосами поглощения на колебаниях собственных междоузельных кластеров [15], полоса 1057 см⁻¹ — рядом с локальным колеба-

Положение максимума полосы, см^{-1}	Полуширина, см^{-1}	Коэффициент поглощения, см^{-1}	Механизм поглощения	Условия наблюдения	Предполагаемая природа дефекта
Кремний с примесью 10^{19} см^{-3} фосфора					
538	~ 3	~ 0.2	Колебательная мода	$T_{\text{изм}}=78 \text{ К}$ $\Phi \leq 10^{19} \text{ см}^{-2}$ $T_{\text{отж}} \leq 140 \div 160 \text{ }^\circ\text{C}$	Междоузельные кластеры, содержащие фосфор
855	~ 4	~ 0.4	То же	$T_{\text{изм}}=78 \text{ К}$ $T_{\text{отж}}=140 \div 200 \text{ }^\circ\text{C}$	VO+P? CO+P?
1057	~ 4	$\sim 0.1-0.2$	» »	$T_{\text{изм}}=78 \text{ К}$ $\Phi=10^{19} \text{ см}^{-2}$ $T_{\text{отж}}=160 \text{ }^\circ\text{C}$	CO+P?
Кремний с примесью 10^{19} см^{-3} бора					
700÷950	3÷5	$\sim 0.2-0.4$	Колебательная мода	$T_{\text{изм}}=78 \text{ К}$ $T_{\text{отж}}=250 \div 375 \text{ }^\circ\text{C}$	Междоузельные кластеры, содержащие бор
3420	≥ 200	~ 2	Электронный переход	$T_{\text{изм}}=78 \text{ К}$ Растет при отжиге, при подсветке $h\nu > E_g$	$V_2+B?$
1000÷4000	?	~ 100	То же	$T_{\text{изм}}=78 \text{ К}$ Растет при отжиге до $350 \text{ }^\circ\text{C}$, растет при подсветке $h\nu > E_g$?
6100	~ 300	~ 200	» »	$T_{\text{изм}}=78 \text{ К}$ $T_{\text{отж}}=300 \div 350 \text{ }^\circ\text{C}$	Междоузельный комплекс, включающий бор
6530	~ 300	~ 100	» »	То же	То же
7520	≥ 500	~ 600	» »	» »	» »

нием 1052 см^{-1} CO-комплексов термического происхождения [16], полоса 855 см^{-1} — рядом с локальными колебаниями комплексов VO^- (884 см^{-1}), VO^0 (835 см^{-1}), CO (865 см^{-1}) радиационного происхождения [17] и возникает при $140 \text{ }^\circ\text{C}$, т. е. на стадии отжига VP-комплексов [18]. Концентрация дефектов, вызывающих появление данных трех полос, сравнительно невелика $\sim 10^{16} \div 10^{17} \text{ см}^{-3}$, если ориентироваться на значения калибровочных множителей для полос поглощения на локальных колебаниях V_s , C_s , O_I .

Полосы, обнаруженные в p -Si, на 2 порядка интенсивнее, нежели новые полосы в n -Si<P>, что и следовало ожидать, поскольку практически весь бор оказывается в дефектных ассоциациях как при облучении, так и после отжигов. Полосы $700 \div 950 \text{ см}^{-1}$ формируются при отжиге полос $700 \div 800 \text{ см}^{-1}$, связываемых с колебаниями В в междоузельных кластерах [5]. Полоса 3420 см^{-1} (рис. 4) находится рядом с дивакансионными полосами 2770 , 2890 и 2564 см^{-1} , растет при отжиге V_2 . Три полосы 6100 , 6530 и 7520 см^{-1} ($h\nu=0.755$, 0.809 и 0.931 эВ соответственно) возникают и исчезают одновременно (рис. 4). Концентрация дефектов, ответственных за полосу 7520 см^{-1} , оказывается $\approx 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, если использовать калибровочный множитель для близлежащей дивакансионной полосы 1.7 мкм .

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Примесь фосфора остается в основном в замещающем положении как в ходе облучения, так и при последующих отжигах по крайней мере до $T=200 \text{ }^\circ\text{C}$.

2. Основное количество атомов бора оказывается после облучения в дефектных ассоциациях, в узлах его остается $\sim 5 \%$. Восстановление концентрации узлового бора начинается при $T_{\text{отж}}=350 \div 400 \text{ }^\circ\text{C}$.

3. Присутствие примеси В либо Р в концентрации $\approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$ не оказывает влияния на общее разупорядочение решетки и кинетику накопления А-центров, в то же время легирование бором увеличивает накопление дивакансий.

4. Различия в поведении В и Р объясняются преобладанием действиием реакций междуузельного кластерообразования для В и реакций аннигиляции компонентов пар Френкеля применительно к Р.

5. Обнаружены слабые полосы поглощения $538, 855, 1057 \text{ см}^{-1}$ в $\text{Si}\langle\text{P}\rangle$ и интенсивные полосы поглощения $700\div 950, 2500, 3420, 1000\div 4000, 6100, 6530, 7520 \text{ см}^{-1}$ в $\text{Si}\langle\text{B}\rangle$. Предполагается, что большая часть из обнаруженных полос связана с фосфоросодержащими дефектами в концентрации $\sim 10^{16}\div 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и боросодержащими комплексами в концентрации $\sim 10^{18}\div 10^{19} \text{ см}^{-3}$, возникающими на различных стадиях облучения и последующих отжигов.

Авторы благодарят В. А. Харченко за проведение облучений.

Л и т е р а т у р а

- [1] Dvurechenskii A. V., Groetzschel R., Popov V. P. — Phys. Lett. A, 1986, v. 116, N 6, p. 399—402.
- [2] Smith S. D., Angress J. F. — Phys. Lett., 1963, v. 6, N 2, p. 131—132.
- [3] Bean A. R., Morrison S. R., Newman R. C., Smith R. S. — J. Phys. C: Sol. St. Phys., 1972, v. 5, N 4, p. 379—400.
- [4] Akhmetov V. D., Bolotov V. V., Dvurechenskii A. V., Kashnikov B. P., Smirnov L. S., Tishkovsky E. G. — Rad. Eff., 1980, v. 53, N 1-2, p. 33—40.
- [5] Laithwaite K., Newman R. C., Totterdell D. R. J. — J. Phys. C: Sol. St. Phys., 1975, v. 8, N 2, p. 236—242.
- [6] Totterdell D. H. J., Newman R. C. — J. Phys. C: Sol. St. Phys., 1973, v. 8, N 5, p. 589—598.
- [7] Ухин Н. А. — ФТП, 1972, т. 6, в. 5, с. 931—934.
- [8] Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках. М., 1972. 456 с.
- [9] Веттерген В. И., Кузьминов Е. Г., Баптизмандский В. В., Новак И. И. — ФТТ, 1973, т. 15, в. 4, с. 1136—1140.
- [10] Dawber P. G., Elliott R. J. — Proc. Phys. Soc., 1963, v. 81, Pt 3, N 521, p. 453—460.
- [11] Akhmetov V. D., Bolotov V. V., Smirnov L. S., Kharchenko V. A. — Phys. St. Sol. (a), 1983, v. 75, N 2, p. 601—606.
- [12] Cheng L. J., Corelli J. C., Corbett J. W., Watkins G. D. — Phys. Rev., 1966, v. 152, N 2, p. 761—774.
- [13] Carton-Merlet F., Paiot B., Don D. T., Porte C., Clerijand B., Mooney P. M. — Phys. C: Sol. St. Phys., 1982, v. 15, N 10, p. 2239—2255.
- [14] Смирнов Л. С., Соловьев С. П., Стась В. Ф., Харченко В. А. Легирование полупроводников методом ядерных реакций. Новосибирск, 1981. 181 с.
- [15] Newman R. C., Totterdell D. H. J. — J. Phys. C: Sol. St. Phys., 1975, v. 8, N 22, p. 3944—3954.
- [16] Bean A. R., Newman R. C. — J. Phys. Chem. Sol., 1972, v. 33, N 2, p. 255—268.
- [17] Newman R. C. Infra-red studies of crystal defects. London, 1973. 186 p.
- [18] Kimerling L. C., De Angelis H. M., Carnes C. P. — Phys. Rev. B, 1971, v. 3, N 2, p. 426—432.

Институт физики полупроводников
СО АН СССР
Новосибирск

Получена 18.12.1987
Принята к печати 21.01.1988