

Об особенностях радиационного дефектообразования в $p\text{-Si}\langle\text{B,Pt}\rangle$

© М.С. Юнусов, М. Каримов, М. Аликулов, А. Ахмадалиев, Б.Л. Оксенгендлер, С.С. Сабиров

Институт ядерной физики академии наук Узбекистана
702132 Улугбек, Узбекистан

(Получена 31 января 1996 г. Принята к печати 25 октября 1996 г.)

Обсуждаются результаты исследования радиационного дефектообразования в $p\text{-Si}\langle\text{B,Pt}\rangle$ методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней. Показано существенное влияние наличия исходной примеси В и Pt на эффективность образования радиационных центров (особенно с энергией $E_v + 0.36$ эВ). Это явление объясняется наличием в $p\text{-Si}\langle\text{B,Pt}\rangle$ электрически нейтральных комплексов (собственный межузельный атом)–примесь, которые в процессе γ -облучения, эффективно распадаясь, влияют на характер квазихимических реакций радиационного дефектообразования.

Исследованию электрических и фотоэлектрических свойств $\text{Si}\langle\text{Pt}\rangle$ посвящен ряд работ [1–3]. В этих работах показано, что платина создает в запрещенной зоне уровни энергии $E_c - 0.26$ эВ, $E_c - 0.53$ эВ, $E_v + 0.34$ эВ. Обнаружено существенное влияние Pt на процессы радиационного дефектообразования [1,3]. Однако механизм радиационных процессов в $\text{Si}\langle\text{Pt}\rangle$ остается еще не до конца выясненным.

Для исследований был использован кремний p -типа, выращенный методом Чохральского, с различной концентрацией примесей В ($N_B = 10^{15} \div 10^{16} \text{ см}^{-3}$) и Pt ($N_{Pt} = 6 \cdot 10^{13} \div 6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$). Платина в $p\text{-Si}\langle\text{B}\rangle$ вводилась методом термодиффузии в течение примерно 10 ч. Для учета влияния термообработки на материал при температуре диффузии параллельно отжигались и контрольные образцы $p\text{-Si}\langle\text{B}\rangle$. Для проведения DLTS-измерений из образцов создавались диоды Шоттки напылением Au и Sb.

Легированные ($p\text{-Si}\langle\text{B,Pt}\rangle$) и контрольные ($p\text{-Si}\langle\text{B}\rangle$) образцы подвергались облучению γ -квантами ^{60}Co с интенсивностью 2500 Р/с до интегральных доз порядка 10^9 рад. Сопоставляя спектры DLTS облученных образцов с литературными [4,5], мы пришли к выводу, что наблюдаемый локальный уровень энергии $E_v + 0.25$ эВ относится к дивакансии $[V_2]$, уровень $E_v + 0.36$ эВ — к комплексу $V_2 - O_i - C_i$, где O_i и C_i — межузельные кислород и углерод, а уровень $E_v + 0.44$ эВ — к хорошо известному комплексу ”вакансия–(атом бора)” $V + B$. Причем эффективность введения этих радиационных центров намного выше в образцах, легированных Pt, чем в контрольных.

На рисунке приведены зависимости концентрации радиационных центров с энергией $E_v + 0.36$ эВ от концентрации В (a) и от концентрации Pt (b). Анализ результатов, приведенных на рисунке показывает, что при постоянной концентрации атомов В ($N_B = \text{const}$) с ростом концентрации атомов платины N_{Pt} концентрация радиационных центров с энергией $E_v + 0.36$ эВ уменьшается (рисунок, b). Почти такая же зависимость концентрации этих центров от концентрации бора N_B наблюдается и в случае, когда концентрации легирующей Pt в образце постоянна ($N_{Pt} = \text{const}$) (рисунок, a , прямая 1). Однако концентрация этих центров в образцах $p\text{-Si}\langle\text{B,Pt}\rangle$ больше,

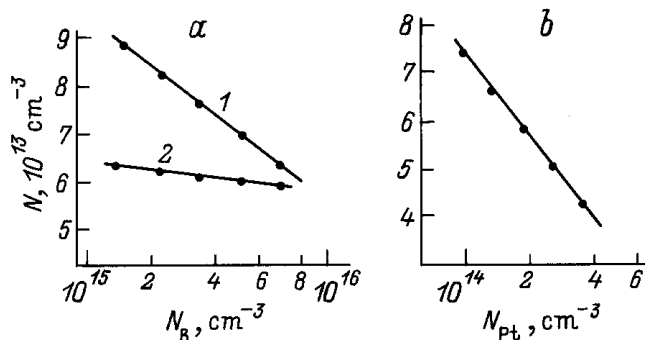
чем в контрольном образце $p\text{-Si}\langle\text{B}\rangle$, содержащем близкую концентрацию В (рисунок, a , прямая 2). В последнем случае зависимость $N(N_B)$ значительно слабее. Из анализа этих результатов следует, что на эффективность введения радиационных дефектов с энергией $E_v + 0.36$ эВ в основном влияет наличие легирующей примеси Pt.

Таким образом, при исследовании воздействия γ -излучения на $p\text{-Si}\langle\text{B}\rangle$ и $p\text{-Si}\langle\text{B,Pt}\rangle$ получены следующие экспериментальные результаты:

— эффективность введения наблюдаемых радиационных центров (особенно с энергией $E_v + 0.36$ эВ) в $p\text{-Si}\langle\text{B,Pt}\rangle$ выше, чем в образце $p\text{-Si}\langle\text{B}\rangle$, не содержащем Pt;

— зависимости эффективности дефектообразования (особенно дефектов с энергией $E_v + 0.36$ эВ) от концентраций В и Pt подобны, т. е. с ростом концентрации В и Pt эффективность падает, но в Si , содержащем Pt, она всегда выше.

Эти нетривиальные результаты удалось объяснить на основе учета амфотерности примеси Pt в кремнии и представлении об участии в квазихимических реакциях наряду с первично рожденными вакансиями (V) как собственных межузельных атомов (I), так и продуктов распада комплексов $\text{Pt}+I$. Рассмотрим на основе таких представлений квазихимические реакции радиационного дефектообразования в Si .



Зависимости концентрации радиационных центров N с энергией $E_v + 0.36$ эВ: a — от концентрации бора N_B , 1 — для $p\text{-Si}\langle\text{B,Pt}\rangle$, 2 — для $p\text{-Si}\langle\text{B}\rangle$, b — от концентрации платины N_{Pt} .

Система кинетических уравнений для такого процесса будет иметь следующий вид:

$$d[V]/dt = \lambda - k_1[I][V] - k_2[V][B_i] - k_3[V][Pt] - [V]/\tau_V,$$

$$d[I]/dt = \lambda - k_1[I][V] - k_4[I][Pt] - [I]/\tau_I,$$

$$d[V_2 + C_i + O_i]/dt = \lambda - k_2[V_2 + C_i + O_i] - [V_2 + C_i + O_i]/\tau_{VCO},$$

где k_j — константы соответствующих реакций, а последние члены уравнений типа $[A]/\tau_A$ определяют вероятность ухода дефектов типа A на стоки. Здесь учтено взаимодействие вакансий с межузельным бором B_i . Для случая нелегированного платиной кремния ($[Pt] = 0$), т.е. для $p\text{-Si}\langle\text{B}\rangle$ и квазистационарного условия по I ($d[I]/dt = 0$), получим

$$[I] = \lambda\tau_I, \quad [V](t) = \lambda T_V \left(1 - e^{-t/T_V}\right),$$

где $1/T_V = k_1\lambda\tau_I + k_2[B_i] + 1/\tau_V$. Если считать, что образующиеся радиационные комплексы $V_2 + C_i + O_i$, практически не распадаясь, накапливаются (т.е. $\tau_{VCO} \rightarrow \infty$), то получим

$$[V_2 + C_i + O_i] = k_2[CO]\lambda T_V \left\{t + T_V \left(e^{-t/T_V} - 1\right)\right\}.$$

Отсюда видно, что с ростом концентрации B_i скорость накопления и стационарное значение (при $t \rightarrow \infty$) концентрации комплекса $V_2 + C_i + O_i$ падает. Этот результат соответствует эксперименту. Объяснение заключается в том, что узельный бор (B_s) служит стоком для собственных межузельных атомов I , вытесняющих B_s из узла кристаллической решетки [6], которые участвуют в образовании радиационного центра $V + B_i$. Оставшаяся часть I уходит на вытеснение узельного кислорода (O_s) и углерода (C_s), которые участвуют в образовании комплексов $V_2 + C_i + O_i$. А другая компонента пар Френкеля — вакансии — в основном принимает участие в захвате межузельного бора $V + B_i$ и в образовании комплексов $V_2 + C_i + O_i$. При этом эти процессы являются взаимно конкурирующими, т.е. с уменьшением концентрации исходного V эффективность захвата B_i вакансией уменьшается, а эффективность образования комплексов $V_2 + C_i + O_i$, наоборот, увеличивается.

Теперь рассмотрим случаи $[Pt] \neq 0$, т.е. образцы легированы примесью Pt.

а. Допустим, что в процессе легирования кремния примесью Pt ее атомы преимущественно взаимодействуют с вакансиями и образуют с ними комплексы, (т.е. $k_3 \gg k_4$). При облучении такие комплексы, распадаясь, дополнительно выделяют вакансии, которые участвуют в квазихимических реакциях дефектообразования. Тогда можно показать, что

$$[V_2 + C_i + O_i] = k_2[CO]\lambda\tilde{T}_V \left\{t + \tilde{T}_V \left(e^{-t/\tilde{T}_V} - 1\right)\right\},$$

где $1/\tilde{T}_V = 1/T_V + k_3[Pt]$. Очевидно, что

$$\frac{[V_2 + C_i + O_i]_{[Pt] \neq 0}}{[V_2 + C_i + O_i]_{[Pt] = 0}} = \frac{k_1\lambda\tau_I + k_2[B_i] + 1/\tau_V}{k_1\lambda\tau_I + k_2[B_i] + 1/\tau_V + k_3[Pt]} < 1.$$

т.е. вне зависимости от концентрации B процесс образования комплекса $V_2 + C_i + O_i$ всегда подавлен.

б. Аналогичным образом можно предположить, что в процессе легирования $p\text{-Si}$ примесью Pt ее атомы преимущественно образуют комплексы с межузельными атомами и эти комплексы, распадаясь при облучении, дополнительно поставляют межузельные состояния атомов. Последние участвуют в квазихимических реакциях радиационного дефектообразования и приводят к повышению эффективности образования комплексов $V_2 + C_i + O_i$ независимо от концентрации B . Для данного случая

$$\frac{[V_2 + C_i + O_i]_{[Pt] \neq 0}}{[V_2 + C_i + O_i]_{[Pt] = 0}} = \frac{1 + \tau_V(k_2[B_i] + k_1\lambda\tau_I)}{1 + \tau_V\left\{k_2[B_i] + k_1\lambda\tau_I/(1 + k_3[Pt]\tau_3)\right\}} > 1.$$

Отметим, что только при учете этого факта удастся естественно объяснить полученные результаты.

Таким образом, при анализе процессов радиационного дефектообразования в кремнии, содержащем переходные элементы, в частности Pt, следует учитывать такой важный фактор как преимущественное образование в процессе легирования комплексов $Pt + I$ и активную роль продуктов распада этого комплекса (I) в квазихимических реакциях радиационного дефектообразования.

Список литературы

- [1] А.А. Лебедев, Н.А. Султанов. ФТП, **22**, 16 (1988).
- [2] Y.K. Kwon, T. Ishikawa, H. Kuwano. J. Appl. Phys., **61**, 1055 (1987).
- [3] М.Ю. Юнусов, А. Ахмадалиев, С.С. Сабиров. ФТП, **29**, 665 (1995).
- [4] В.В. Емцев, Т.В. Машовец. *Примеси и точечные дефекты в полупроводниках* (М., Радио и связь, 1987).
- [5] Сб.: *Вопросы радиационной технологии полупроводников* (Новосибирск, Наука, 1980).
- [6] G.D. Watkins. *The lattice vacancy in Silicon (Deep centers in Semiconductors)* (N.Y., Academy Press, 1986) Ch. III, p. 147.

Редактор Т.А. Полянская

On radiation defect production in $p\text{-Si}\langle\text{B,Pt}\rangle$

M.S. Yunusov, M. Karimov, M. Alikulov,
A. Akhmadaliev, B.L. Oksengendler, S.S. Sabirov
Institute of Nuclear Physics, Academy of Sciences
of Uzbekistan, 702132 Ulugbek, Uzbekistan

Abstract The results of the defect production processes investigation in $p\text{-Si}\langle\text{B,Pt}\rangle$, studied by means of DLTS-method, are being discussed. It is shown that initial doping impurities B and Pt affect generation of radiation centers (particularly $E_v + 0.36$ eV). The phenomenon is explained in terms of decays of electrically inactive centers. The decay components affect quasichemical reactions, thus influencing the radiation defect production.