

©1995 г.

## ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ И ОТЖИГА РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В $p$ -Si(P,Pt)

*М.С.Юнусов, А.Ахмадалиев, С.С.Сабиров*

Институт ядерной физики Академии наук Узбекистана,  
702132, Ташкент, Узбекистан  
(Получена 4 мая 1994 г. Принята 3 октября 1994 г.)

Приведены результаты исследования процессов образования и отжига радиационных дефектов, введенных при облучении быстрыми нейтронами атомного реактора в  $p$ -Si(P, Pt). Показано, что при радиационно-термическом воздействии в  $p$ -Si(P,Pt) формируются ранее не наблюдавшиеся центры, обусловленные присутствием платины.

Выполненные нами [1] и другими авторами [2-6] исследования показывают, что при легировании кремния платиной происходит компенсация проводимости как в  $n$ -, так и в  $p$ -материале. При этом в зависимости от соотношения концентрации донорных ( $N_d$ ) и акцепторных ( $N_a$ ) центров и легирующей платины ( $N_{Pt}$ ) можно получать частично ( $N_a > N_{Pt}$  или  $N_d > N_{Pt}$ ) или полностью ( $N_a \simeq N_{Pt}$  или  $N_d \simeq N_{Pt}$ ) компенсированный и даже перекомпенсированный из  $n$ - в  $p$ -тип ( $N_d < N_{Pt}$  при  $N_d < 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) материал.

В данной работе исследовались радиационные процессы в образцах  $p$ -Si(P,Pt), в которых исходная концентрация мелких доноров составляла  $8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  (КЭФ-5) и  $4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  (КЭФ-10). Образцы облучали в горизонтальном канале реактора ВВР-СМ с интенсивностью быстрых нейтронов ( $E_n \geq 0.1 \text{ МэВ}$ )  $(2 \div 3) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  при температуре  $\sim 40^\circ \text{C}$ .

Диффузия платины в  $n$ -Si проводилась методом термодиффузии в температурном интервале  $1200 \div 1300^\circ \text{C}$  последующим быстрым охлаждением. При этом во всех исследуемых образцах происходила конверсия проводимости из  $n$ - в  $p$ -тип. Удельное сопротивление конвертированных в  $p$ -Si(P,Pt) образцов лежало в пределах  $700 \div 1000 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , концентрация дырок составляла  $(2 \div 3) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

Следует отметить, что подвижность дырок в образцах  $p$ -Si(P,Pt) составляла  $\sim 250 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ , т.е. была почти в 2 раза меньше, чем в обычном  $p$ -Si. Это свидетельствует о большой концентрации рассеивающих центров в  $p$ -Si(P,Pt).

Исследована зависимость относительного изменения концентрации дырок в  $p$ -Si(P,Pt) и  $p$ -Si от флюенса быстрых нейтронов. Установлено, что в образцах  $p$ -Si(P,Pt) изменением концентрации дырок наблюдается лишь начиная с флюенса быстрых нейтронов  $\geq 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , тогда как в обычном  $p$ -Si при концентрациях дырок  $\sim 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  заметное изменение концентрации наблюдается при флюенсах быстрых нейтронов  $\sim 10^{13} \text{ см}^{-2}$  [7].

Получено следующее полуэмпирическое выражение, удовлетворительно описывающее закономерности изменения концентрации дырок от флюенса быстрых нейтронов в  $p$ -Si(P,Pt), когда уровень Ферми находится вблизи  $E_v + 0.34 \text{ эВ}$ :

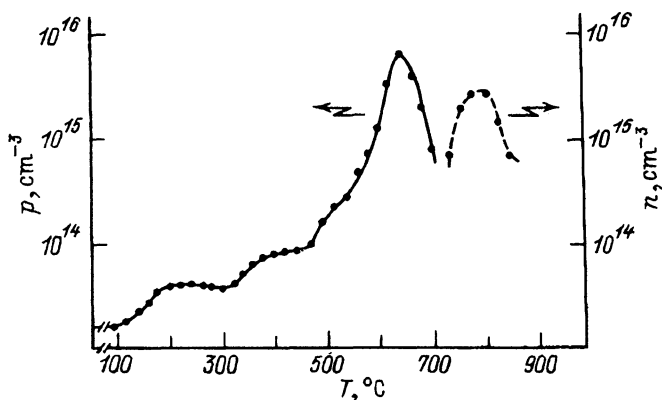
$$p = p_0 \exp(-4.67 \cdot 10^{-16} \cdot \Phi_n),$$

где  $p_0$  и  $p$  — концентрации дырок до и после облучения,  $\text{см}^{-3}$ ;  $\Phi_n$  — флюенс быстрых нейтронов,  $\text{см}^{-2}$ .

Из вышеизложенных результатов исследований вытекает, что у  $p$ -Si(P,Pt) при облучении быстрыми нейтронами отмечается высокая стабильность концентрации носителей к воздействию радиации.

Исследовалась кинетика отжига радиационных дефектов в интервале температур  $20 \div 870^\circ \text{C}$  в  $p$ -Si(P,Pt) и в контрольном  $p$ -Si после облучения быстрыми нейтронами флюенсом  $\sim 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Время отжига при каждой температуре составляло 20 мин. Установлено, что в контрольном  $p$ -Si отжиг радиационных дефектов, как и в литературе, происходит в основном в две стадии [8,9].

Отжиг радиационных дефектов в  $p$ -Si(P,Pt) носит сложный характер. При этом первые две стадии ( $100 \div 200^\circ \text{C}$  — первая стадия и  $300 \div 380^\circ \text{C}$  — вторая стадия) отжига совпадают со стадиями, наблюдаемыми в контрольных образцах  $p$ -Si. Видимо в этих стадиях отжига происходит распад известных стандартных радиационных дефектов [7-9]. При этом в образцах  $p$ -Si(P,Pt) наблюдается небольшой рост концентрации дырок (см. рисунок).



Зависимости изменения концентрации дырок в нейтронно-облученном ( $\Phi_n \approx 10^{15} \text{ нейтрон/см}^2$ )  $p$ -Si(P,Pt) от температуры отжига при изохронном отжиге.

Как видно из рисунка, следующая стадия отжига в  $p\text{-Si(Pt)}$  наблюдается в интервале температур  $460 \div 530^\circ\text{C}$ . На этой стадии, по всей вероятности, происходит частичный распад одних и образование других центров платины, так как в этом интервале температур наблюдается также рост концентрации дырок. Этот рост концентрации дырок в  $p\text{-Si(Pt)}$  говорит о том, что здесь происходит образование только мелких акцепторных центров, которые увеличивают концентрации дырок и связаны с наличием Pt в образце. При этом во всех образцах  $p\text{-Si(Pt)}$  после отжига при  $\sim 530^\circ\text{C}$  уровень Ферми располагается вблизи  $E_v + 0.30 \text{ эВ}$ .

Следующая стадия отжига наблюдается в интервале температур  $550 \div 640^\circ\text{C}$  и сопровождается интенсивным ростом концентрации дырок. При этом концентрация дырок в образцах  $p\text{-Si(Pt)}$  доходит до значения  $\sim 7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , а удельное сопротивление снижается до  $\sim 4.0 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Причем при охлаждении образцов до температур  $T \leq 100 \text{ К}$  концентрация дырок полностью истощается. Такая ситуация может иметь место только при наличии электрически активных акцепторных центров с энергией ионизации много меньшей чем  $E_v + 0.19 \text{ эВ}$  [5,6]. Сообщений об акцепторном уровне платины в Si мельче чем  $E_v + 0.19 \text{ эВ}$  в литературе не встречается. Измерение температурной зависимости коэффициента Холла показало наличие двух уровней с энергиями ионизации  $E_1 = E_v + 0.13 \text{ эВ}$  и  $E_2 = E_v + 0.27 \text{ эВ}$ . Причем концентрация центра  $E_1$  равна  $\sim 7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

На следующей стадии отжига в интервале температур  $660 \div 740^\circ\text{C}$  наблюдается резкое падение концентрации дырок. При этой температуре, видимо, происходит распад акцепторного центра платины  $E_v + 0.09 \div 0.10 \text{ эВ}$ , ответственного за наблюдаемую концентрацию дырок. При температурах  $\leq 40^\circ\text{C}$  наблюдается обратная конверсия типа проводимости  $p\text{-}n\text{-Si(Pt)}$ , т.е. восстанавливается исходный тип проводимости.

Дальнейший рост температуры отжига в интервале  $740 \div 800^\circ\text{C}$  приводит к увеличению концентрации электронов в  $p\text{-Si(Pt)}$  до значений  $\sim 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ; исходные концентрации электронов в этих материалах были  $\sim (4 \div 8) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  (КЭФ-5 и КЭФ-10). В данном случае после отжига при  $800^\circ\text{C}$  их концентрации оказались равными  $3.0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , а удельное сопротивление —  $\sim 2.0 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Подвижность носителей при этом составляла  $980 \div 1000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ . Относительно низкое значение подвижности электронов обусловлено наличием рассеивающих примесных центров платины в  $p\text{-Si(Pt)}$ . Эти данные свидетельствуют о том, что и в  $p\text{-}n\text{-Si(Pt)}$  при дополнительной термообработке при температурах отжига  $\sim 800^\circ\text{C}$  формируются центры с участием платины и продуктов распада радиационных центров с более мелким энергетическим уровнем, имеющим донорный характер и обуславливающим появление дополнительной концентрации электронов  $\leq 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

По нашим измерениям, энергия ионизации этого донорного центра равна  $E_c - 0.1 \text{ эВ}$ , а концентрация  $\sim 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

Отжиг в температурном интервале  $800 \div 850^\circ\text{C}$  приводит к полному распаду всех центров платины и к полному восстановлению концентрации электронов до исходного значения. При этом подвижность носителей остается равной  $\sim 1000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ .

Дальнейший отжиг при температурах выше 850 °С приводит к медленному монотонному снижению концентрации электронов, т.е. начинается обратная активация электрически неактивных центров платины в электрически активные и происходит компенсация проводимости.

В результате изложенного следует, что платина в  $p\text{-Si(P,Pt)}$  ведет себя сложным образом, особенно после облучения быстрыми нейтронами. Особенности поведения облученного нейтронами  $p\text{-Si(P,Pt)}$  при температурном отжиге свидетельствуют о том, что атомы платины чрезвычайно активно взаимодействуют с продуктами распада нейтронно-наведенных радиационных дефектов. Сильной активации таких реакций способствует и высокая температура, при которой происходит распад таких дефектов.

#### Список литературы

- [1] И.С. Юнусов и др. *Физические свойства облученного кремния* (Ташкент, Фан, 1987).
- [2] А.А. Лебедев, Н.А. Соболев, Б.М. Урунбаев. *ФТП*, **15**, 1519 (1981).
- [3] С.А. Азимов, Л.И. Исламов, Н.А. Султанов. *ФТП*, **8**, 1169 (1974).
- [4] Y.K. Kwon, T. Ishikawa, H. Kuwano. *J. Appl. Phys.*, **61**, 1055 (1987).
- [5] A.O. Ewuraeye, E. Sun. *J. Appl. Phys.*, **47**, 3172 (1976).
- [6] Ю.А. Зибуц, Л.Г. Парицкий, С.М. Рывкин, Ж.Г. Дохолян. *ФТТ*, **8**, 2549 (1966).
- [7] Ф.П. Коршунов, Г.В. Гатальский, Г.М. Иванов. *Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах* (Минск, Наука и техника, 1978).
- [8] *Вопросы радиационной технологии полупроводников*, под ред. Л.С.Смиронова (Новосибирск, Наука, 1980).
- [9] В.В. Емцев, Т.В. Машовец. *Примеси и точечные дефекты в полупроводниках* (М., Радио и связь, 1981).

Редактор В.В. Чалдышев

### The formation and annealing of radiation-induced defects in $p\text{-Si(P,Pt)}$

*M.S. Yunusov, A. Akhmadaliev, S.S. Sabirov*

Institute for Nuclear Physics, Uzbekistan Academy of Sciences, 702132 Ulugbek, Uzbekistan