

06.1; 06.2

© 1991

## ДЕГРАДАЦИЯ БАРЬЕРОВ ШОТТКИ НА КРЕМНИИ, ОБУСЛОВЛЕННАЯ ПЕРЕСТРОЙКОЙ ГЛУБОКИХ ПРИМЕСНЫХ ЦЕНТРОВ

К.А. А д и л о в, Ф.С. Ш а х а б и д д и н о в

Экспериментальное обнаружение протекания процессов перестройки дефектов – так называемых рекомбинационно-стимулированных процессов (РСП) в светодиодах и инжекционных лазерах, столь явно связанных с деградацией этих приборов [1], сделало остроактуальной задачу их изучения для полупроводниковой электроники. С другой стороны, физические механизмы и модели перестройки дефектов – возникновение новых структурных и антиструктурных центров, ассоциация и диссоциация примесей, в том числе глубоких примесных центров (ГПЦ) и т.д. стали привлекательным объектом для разносторонних фундаментальных исследований. Особый интерес представляют такие исследования на основном материале современной микроэлектроники – на кремнии. Это обусловило цель данной работы – изучение физических механизмов РСП в фотоприемниках ИК-диапазона на основе барьеров Шоттки из  $p-Si$ , легированного  $Se$ ,  $Te$ ,  $Zn$  и  $Cr$ .

В качестве исходного материала для изготовления барьеров Шоттки использованы кристаллы  $p-Si$  марки КДБ с концентрацией неконтролируемых примесей кислорода и углерода  $N_{0c} < 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Величина исходной концентрации мелких акцепторов бора в  $p-Si$  составляла  $N_B = 5 \cdot 10^{14} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Легирование  $p-Si$  примесными атомами  $Se$ ,  $Te$ ,  $Zn$  и  $Cr$ , а также изготовление барьеров Шоттки осуществлены по методике [2]. Качественные изменения fotocувствительности образцов контролировались исследованием спектров фотопроводимости, а количественный анализ – снятием спектров  $DLTS$  [3] до и после инжекции путем приложения обратного смещения  $\sim 5-50 \text{ В}$  в течение  $5-30 \text{ мин}$  при  $250-350 \text{ К}$ .

На рис. 1 представлены зависимости изменения fotocувствительности ( $I_\varphi$ ) образцов от плотности инжектированных электронов ( $J$ ). Видно, что, начиная с  $J \approx 3 \cdot 10^3 \text{ А} \cdot \text{с} / \text{см}^2$ , величина  $I_\varphi$  при освещении образцов светом из области собственного поглощения резко уменьшается, и при  $J \approx 9 \cdot 10^3 \text{ А} \cdot \text{с} / \text{см}^2$  кривые  $I_\varphi \sim f(J)$  достигают насыщения, т.е. образцы деградируют.

Природа деградации fotocувствительности была выяснена снятием спектров  $DLTS$  (рис. 2). Как видно, в исходном состоянии (кривые 1) наблюдались ГПЦ с энергиями ионизации  $E_1 = E_V + 0.2 \text{ эВ}$  ( $Si : Se$ ),  $E_2 = E_V + 0.24$  ( $Si : Te$ ),  $E_3 = E_V + 0.13$  ( $Si : Zn$ ) и  $E_4 = E_V + 0.28$  ( $Si : Cr$ ), которые обуславливают

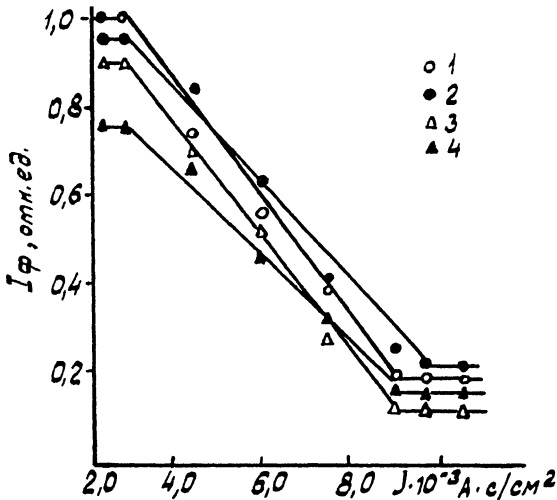
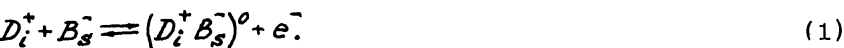


Рис. 1. Зависимости изменения фоточувствительности образцов от плотности инжектированных электронов при 250 К: 1 -  $Si:Se$ , 2 -  $Si:Te$ , 3 -  $Si:Zn$ , 4 -  $Si:Cr$ . Обратное смещение 20 В.

фоточувствительность исследованных образцов. При этом величина концентраций всех ППЦ ( $N_{ППЦ}$ ) сильно зависят от величины  $N_B$  (кривые 2-4), т.е. с увеличением  $N_B$  значения  $N_{ППЦ}$  возрастают и наоборот. В работе [2] показано, что это объясняется захватом большей части подвижных междоузельных атомов  $Se_i$ ,  $Te_i$ ,  $Zn_i$  и  $Cr_i$  в процессе легирования  $p-Si$  и быстрого последующего диффузионного охлаждения легированных кристаллов узловыми атомами бора ( $B_S^-$ ). При этом образуются донорно-акцепторные пары (ДАП)  $SeB^0$  [4, 5],  $TeB^0$  [4, 6],  $ZnB^0$  [2, 7] и  $CrB^0$  [8-10], реакция связи которых осуществляется кулоновским притяжением между положительно заряженными атомами  $Se_i^+$ ,  $Te_i^+$ ,  $Zn_i^+$  и  $Cr_i^+$  (доноры  $D_i^+$ ) и отрицательно заряженным акцептором  $B_S^-$  (реакция идет вправо):



Равновесную атомную часть донорного компонента, спаренного с  $B_S^-$  при данной температуре можно определить из соотношения [2]:

$$[D_i^+] \approx 5 \cdot 10^{-24} [B_S^-] \exp(\mathcal{E}_c/kT), \quad (2)$$

где  $\mathcal{E}_c$  - энергия связи (спаривания) ДАП. Измерения при  $T < 300$  К показали, что при  $[B_S^-] > 10^{14} \text{ см}^{-3}$  почти все атомы  $D_i^+$  находятся в равновесном состоянии как  $(D_i^+ B_S^-)^0$  и для

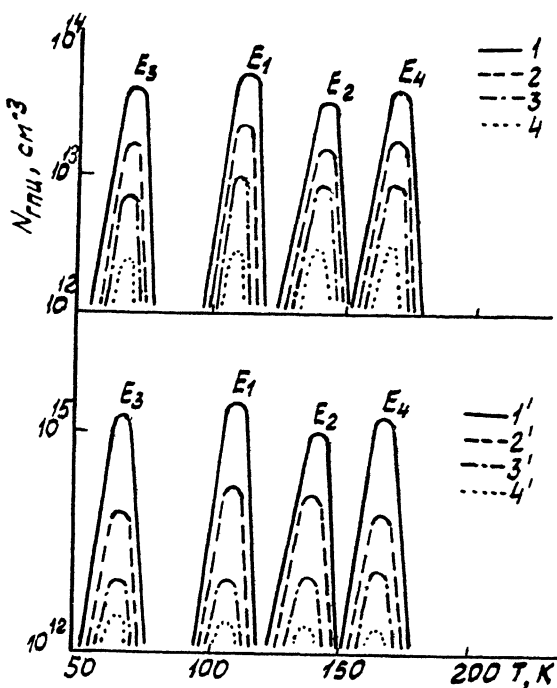


Рис. 2. Спектры *DLTS* до (1–4) и после (1'–4') инжекции электронов с  $J = 6 \cdot 10^3$  А с/см<sup>2</sup> при 250 К. Обратное смещение 20 В.

1 -  $N_B = 10^{16}$  см<sup>-3</sup>, 2 -  $5 \cdot 10^{15}$ , 3 -  $10^{15}$ , 4 -  $5 \cdot 10^{14}$ .

спаренных частей  $Se_i$ ,  $Te_i$ ,  $Zn_i$  и  $Cr_i$  определены следующие эмпирические температурные зависимости:

$$\frac{(Se_i B_s)}{(Se_i)(B_s)} = 10^{-23} \cdot \exp \left[ \frac{0.68 \pm 0.02 \text{ эВ}}{kT} \right],$$

$$\frac{(Te_i B_s)}{(Te_i)(B_s)} = 10^{-23} \cdot \exp \left[ \frac{0.86 \pm 0.02 \text{ эВ}}{kT} \right],$$

$$\frac{(Zn_i B_s)}{(Zn_i)(B_s)} = 10^{-23} \cdot \exp \left[ \frac{0.64 \pm 0.02 \text{ эВ}}{kT} \right],$$

$$\frac{(Cr_i B_s)}{(Cr_i)(B_s)} = 10^{-23} \cdot \exp \left[ \frac{0.65 \pm 0.02 \text{ эВ}}{kT} \right].$$

Величины  $\mathcal{E}_c$ , приведенные в (3) определены нами по наклону зависимости  $\ln N_{\text{ПЦ}} \sim f(10^3/T)$  термического отжига ДАП ( $D_i^+ B_s^-$ ), т.е. ПЦ  $E_1 - E_4$ .

Ясно, что когда один из компонентов пары ( $B_i^+ B_s^-$ ) станет нейтральным, то реакция спаривания (1) гасится. В материале р-типа такое изменение в зарядовом состоянии ДАП достигается установкой уровня Ферми ниже уровня  $B_s^-$  или же выше уровня  $D_i^+$ . Последний процесс окажется более действенным при приложении обратного смещения к исследованным барьерам Шоттки. Инжекция электронов как бы приковывает уровень Ферми к середине зоны внутри пространственной величины истощенной области. При этом центр  $D_i$  будет свободным от дырок или же заряженным нейтрально и ДАП ( $D_i^+ B_s^-$ )<sup>0</sup> распадается по реакции (1) (реакция идет влево). Т.е. после изменения зарядового состояния центра  $D_i^+$  понижается барьер для его миграции, соответствующий  $\mathcal{E}_c$ , он становится подвижным и не участвует в процессе параобразования с  $B_s^-$ . В дальнейшем центр  $D_i^+$ , мигрируя по междоузлиям, видимо, коагулирует в нейтральные ассоциаты типа ( $D_i^0$ )<sub>n</sub>. Последнее и обуславливает снижение величин  $N$  ППЦ, отсутствие новых ППЦ после инжекции и, тем самым, уменьшение фоточувствительности (деградацию) исследованных барьеров Шоттки.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Д е а н Р.Ж., С h o y k e W.Ж. // Adv. Phys. 1977. V. 26. N 1. P. 1-12.
- [2] А д и л о в К.А. Фотохимическая перестройка глубоких примесных центров в кремнии р-типа: Деп. в ВИНТИ, № 3699. 90 от 28.06.90. М.: ВИНТИ, 1990. 25 с.
- [3] L a n e D.V. // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. N 7. P. 3023-3032.
- [4] А д и л о в К.А. // Изв. АН УзССР. Сер. физ.-мат. наук. 1989. № 2. С. 66-69.
- [5] А д и л о в К.А., Т у р с у н о в Ш.С. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 9. С. 1624-1627.
- [6] А д и л о в К.А. // Изв. АН УзССР. Сер. физ.-мат. наук. 1989. № 4. С. 63-66.
- [7] F u l l e r C.S., M o r i n F.L. // Phys. Rev. 1957. V. 105. N 6. P. 379-383.
- [8] С o n z e l m a n n H., G r a f f K., W e b e r E.R. // Appl. Phys. A. 1983. V. 30. N 3. P. 169-175.
- [9] А д и л о в К.А., Т у р с у н о в Ш.С. // ДАН УзССР. 1990. № 6. С. 19-20.
- [10] А д и л о в К.А., Т у р с у н о в Ш.С. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. № 14. С. 42-45.

Специализированное конструкторское бюро с опытным производством  
Отдела теплофизики АН УзССР,  
Ташкент

Поступило в Редакцию  
13 февраля 1991 г.  
В окончательной редакции  
7 июля 1991 г.