

W-ДЕФЕКТ В n -InP

© В.В.Пешев, С.В.Смородинов

Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова
634050 Томск, Россия
(Получена 23 января 1995 г. Принята к печати 31 мая 1995 г.)

Исследован W -дефект в диодах Шоттки на основе n -InP, облученных электронами. Дефект создается только в области пространственного заряда и является ловушкой для 5 электронов. Выявлены две конфигурации дефекта, одна из которых, A , проявляет свойства центра с отрицательной корреляционной энергией. Преобразование A -конфигурации в метастабильную B -конфигурацию контролируется потерей двух электронов. Предполагается, что W -дефект в B -конфигурации состоит из двух фрагментов, на которых локализованы соответственно один и два электрона.

В работах [1,2] показано, что при облучении InP создаются метастабильные дефекты, такие как M - и EM -центры. В данной работе представлены результаты изучения нового метастабильного дефекта (названного нами W -дефект), который образуется при облучении области пространственного заряда (ОПЗ) n -типа фосфида индия.

Объектами исследования служили структуры с полупрозрачным барьером Шоттки на слое n -InP ($n = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$), выращенном методом ГФЭ на сильно легированной подложке. Облучение электронами с энергией 1 МэВ проводилось при комнатной температуре с плотностью тока $5 \cdot 10^{-7} \text{ А/см}^2$. Доза облучения составляла $1.1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Диоды с барьером Шоттки облучались с обратным смещением U и без него ($U = 0$). Измерения проводились методами нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (НЕСГУ), термостимулированной емкости (ТСЕ). Также измерялось изменение емкости ΔC обратно смещенных диодов после освещения. Освещение проводилось белым светом от лампы накаливания. Для получения желаемой конфигурации (A или B) метастабильного дефекта использовалась стандартная процедура охлаждения диода от высокой температуры с $U = 0$ или $U \neq 0$.

На рис. 1 представлены спектры НЕСГУ для облученных ОПЗ (a) и нейтрального объема (НО) (b) фосфида индия. Из рис. 1, b видно, что охлаждение как от $T = 250 \text{ К}$, так и от $T = 410 \text{ К}$ дает пики $E3$ и $E4$, принадлежащие разным конфигурациям известного M -центра [1]. Охлаждение от 250 К облученной ОПЗ также дает спектр M -центра

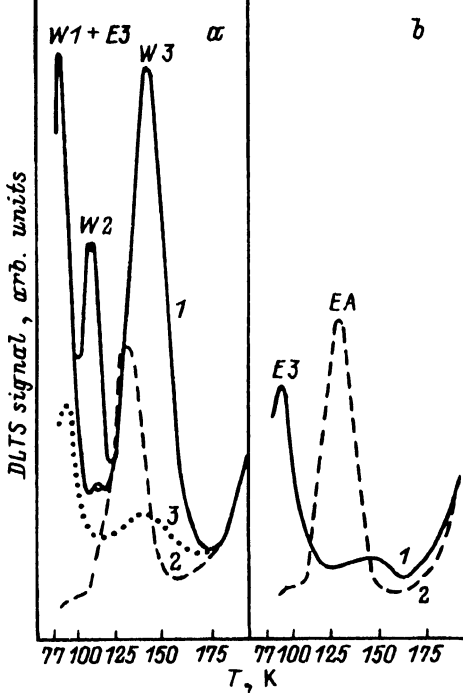


Рис. 1. Спектры НЕСГУ ($\tau = 4.5 \cdot 10^{-5}$ с, напряжения смещения и заполняющего импульса равны 4 В) диодов с барьером Шоттки на $n\text{-InP}$ после электронного облучения ($D = 1.1 \cdot 10^{15}$ см $^{-2}$, $E = 1$ МэВ, $T = 300$ К): a — $U = -6.6$ В при облучении; 1 — охлаждение от 410 К с $U = -6.6$ В или от 410 К с $U = 0$ и последующим освещением при $U = -6.6$ В [длительность заполняющего импульса $t_p = 10^{-4}$ с (темные кружки) и $t_p = 10^{-6}$ с (светлые кружки)]; 2 — охлаждение от 250 К с $U = 0$; 3 — охлаждение от 250 К с $U = -6.6$ В или охлаждение от 250 К с $U = 0$ и последующим освещением; b — $U = 0$ при облучении; 1 — охлаждение от 250 или 410 К с $U = -6.6$ В или аналогичное охлаждение с $U = 0$ и последующим освещением; 2 — охлаждение от 250 или 410 К с $U = 0$. Наличие или отсутствие смещения во времени освещения для спектра 3 на рис. 1, a и спектра 1 на рис. 1, b не имеет значения.

(рис. 1, a , кривые 2, 3), но при охлаждении от 410 К с $U \neq 0$ на спектр B -конфигурации M -центра накладывается спектр B -конфигурации неизвестного ранее W -дефекта (рис. 1, a , кривая 1, темные кружки, пики $W1 - W3$) [3].

Параметры, характеризующие B -конфигурацию W -дефекта приведены в таблице, где E_e и σ_{na} — энергия активации термоэмиссии и сечение захвата электронов, определенные из «рописей» пиков, E_σ — энергия активации сечения захвата, $E(W)$ — положение уровня энергии относительно дна зоны проводимости. Для получения величин E_σ проводились измерения сечений захвата $\sigma(T)$ из зависимости амплитуды пика НЕСГУ от длительности заполняющего импульса t_p .

Отношение высот пиков при насыщающей длительности t_p составляло $W1 : W2 : W3 = 0.9 : 0.7 : 1$. Используя значения $E(W1)$ и $E(W2)$ в функции заполнения Ферми, можно показать, что это отношение связано с неполным заполнением уровней при температурах записи пиков $W1$ и $W2$ и что концентрации уровней $E(W1)$, $E(W2)$, $E(W3)$ равны между собой. Этот результат свидетельствует в пользу принадлежности всех трех пиков одному дефекту.

Пик	$E_e, \text{эВ}$	$\sigma_{na}, \text{см}^2$	$E_\sigma, \text{эВ}$	$E(W), \text{эВ}$
$W1$	0.08	$1 \cdot 10^{-15}$	0.02	0.06
$W2$	0.18	$5 \cdot 10^{-13}$	0.14	0.04
$W3$	0.18	$1 \cdot 10^{-14}$		≈ 0.18

Переходы W -дефекта из $A(B)$ - в $B(A)$ -конфигурацию являются обратимыми. Для того чтобы получать все W -дефекты в B -конфигурации, образец нагревали до 410 К и охлаждали с $U \neq 0$. Для получения A -конфигурации охлаждение от 410 К проводилось с $U = 0$. Изучение термопереходов дало следующие скорости [3]:

$$R(A \rightarrow B) = 10^8 \exp(-E_1/kT) \text{ с}^{-1}, \quad E_1 = 0.7 \text{ эВ}, \quad (1)$$

$$T(A \rightarrow B) \approx 325 \text{ К},$$

$$R(B \rightarrow A) = 3 \cdot 10^3 \exp(-E_2/kT) \text{ с}^{-1}, \quad E_2 = 0.18 \text{ эВ}, \quad (2)$$

$$T(B \rightarrow A) = 145 \text{ К}.$$

Выражения (1) и (2) одинаковы для пиков $W1$ – $W3$, что также свидетельствует в пользу принадлежности их одному дефекту. Однако если рассматривать W -дефект в B -конфигурации как единый центр захвата с тремя уровнями энергии в запрещенной зоне, то возникают следующие противоречия. Из рис. 1, *a* (кривая 1, темные и светлые кружки) видно, что эмиссия электрона с $E(W2)$ в ряду $W1$, $W2$, $W3$ осуществляется после эмиссии электрона с уровня $E(W1)$, однако захват на $E(W2)$ происходит после захвата электронов на уровни $E(W1)$, $E(W3)$. При этом заполнение электронами уровней $E(W2)$ за время t_p не зависит от заполнения уровня $E(W1)$ (т.е. сильное изменение высоты пика $W2$ из-за вариации t_p не приводит к аналогичному изменению высоты $W1$). Эти противоречия устрояются, если предположить, что при переходе в B -конфигурацию W -дефект распадается (обратно) на два фрагмента — два центра захвата. При этом на одном фрагменте локализуются два электрона, ответственные за $W2$ и $W3$, на другом — один электрон, ответственный за $W1$ (см. вставку на рис. 2). В этом случае электрон, локализованный на уровне $E(W2)$, является электроном «внешней электронной оболочки» одного из фрагментов, и вышеуказанные противоречия устрояются.

Измерения ТСЕ показали, что переходу $A \rightarrow B$ W -дефекта соответствует только одна ступенька при $T = 325$ – 350 К. При этом изменение емкости на этой ступеньке равно пятикратному изменению емкости, соответствующей пику $W3$ в спектре НЕСГУ. Таким образом, заполненная электронами A и полностью опустошенная B -конфигурация различается пятью электронами. Следовательно, переход $A \rightarrow B$ осуществляется в результате эмиссии двух электронов (рис. 2, для определенности A -конфигурации прописано зарядовое состояние -2). Так как ступенька только одна, термоэмиссия этих электронов происходит одновременно, т.е. дефект обладает свойствами центра с отрицательной корреляционной энергией: $E_3 < E_1$.

Изучение фотопереходов $A \rightarrow B$ показало, что освещение с $U = 0$ в течение 2 с при $T \geq 80$ К переводит все M -центры в B -конфигурацию (рис. 1, *a*, кривая 3). Однако все W -дефекты продолжали оставаться в A -конфигурации. Из-за необходимости двукратной ионизации фотопереход W -дефекта из A в B должен происходить в два этапа: 1) эмиссия электрона с A^{-2} ; 2) термоэмиссия (с небольшой энергией активации E_3) или фотоэмиссия с A^{-1} (рис. 2). При $U = 0$ второй этап

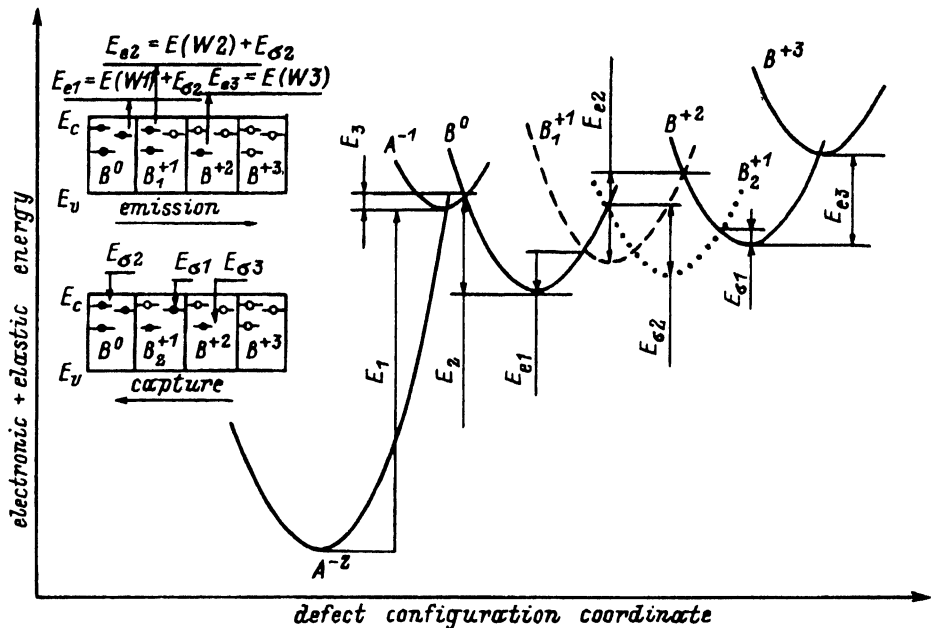


Рис. 2. Координатно-конфигурационная диаграмма W -дефекта.

не успевают реализоваться, так как при $U = 0$ идет интенсивный захват электронов на A^{-1} , в результате чего дефекты вновь возвращаются в A^{-2} -конфигурацию и фотопереход не реализуется. На рис. 3 приведены результаты изохронного освещения с $U \neq 0$ W -дефектов в A -конфигурации. При $U \neq 0$ нет захвата на A^{-1} , поэтому конечный этап фотоперехода при $T \geq 90$ К реализуется. Этот этап реализуется за счет термоэмиссии с A^{-1} (двукратная фотоионизация дефекта маловероятна при использовании обычных источников света), что подтверждается спадом кривой на рис. 3 при $T < 90$ К.

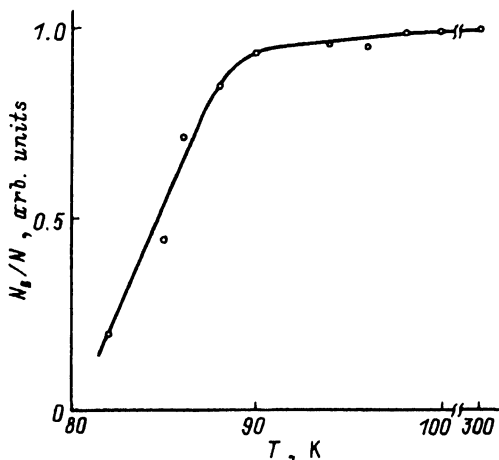


Рис. 3. Температурная зависимость концентрации W -дефектов в B -конфигурации после изохронного освещения ($\Delta t = 2$ с).

Также регистрировалось изменение емкости ΔC обратно смещенных диодов после изохронного освещения ($\Delta t = 2c$) в зависимости от температуры. Для того чтобы исключить вклад в ΔC от перехода $A \rightarrow B$ M -центра, проводилась следующая процедура. Диод охлаждался от $T = 410$ К до $T = 80$ К с $U = 0$, освещался при этой температуре в течение $t = 2c$ с $U = 0$ (M -центры перешли в заполненную электронами B -конфигурацию), включалось напряжение (M -центры в опустошенной B -конфигурации), затем нагревался с $U \neq 0$ до температуры, при которой проводилось освещение с $U \neq 0$ в течение $2c$. Зависимость $\Delta C = f(T)$ имеет вид, аналогичный кривой на рис. 3. В области $T < 90$ К кривая $\Delta C = f(T)$ также имеет спад, а на участке $90 < T < 300$ К изменение емкости составляло $0.085\text{--}0.09$ пФ. В то же время $\Delta C(W3)$ для пика $W3$ в спектре НЕСГУ составляло 0.018 пФ, т.е. $\Delta C/\Delta C(W3) = 4.7\text{--}5$, что подтверждает данные ТСЕ.

Прохождение прямого тока через диод Шоттки инжектирует неосновные носители и может изменять конфигурацию метастабильного дефекта. Так, наблюдался полный переход M -центров из A - в B -конфигурацию после пропускания тока ($j = 3 \cdot 10^2$ А/см², $T = 80$ К) в течение 10 мин. Однако все W -дефекты продолжали оставаться в A -конфигурации даже при $j = 10^3$ А/см² в течение 60 мин. Последовательный захват дырок на A^{-2} и A^{-1} в условиях интенсивного захвата электронов на A^{-1} -конфигурацию маловероятен. Поэтому, подобно отсутствию фотоперехода $A \rightarrow B$ при $U = 0$, факт отсутствия перехода при инжекции неосновных носителей подтверждает необходимость потери двух электронов для перехода в B -конфигурацию.

На основании проведенных экспериментов была построена конфигурационная диаграмма W -дефекта (рис. 2). В соответствии с диаграммой термопереход $A \rightarrow B$ ($T > 325$ К, $U \neq 0$) состоит в следующем. С увеличением температуры, при достижении $kT \approx E_1 = 0.7$ эВ происходит термоэмиссия электрона в зону проводимости ($A^{-2} \rightarrow A^{-1}$), за которой сразу же следует термоэмиссия второго электрона ($A^{-1} \rightarrow B^0$), поскольку $E_3 < E_1$. Потери этих электронов переводит дефект в B^0 -конфигурацию, которая представляет собой два фрагмента дефекта — центр с уровнями $E(W3)$, $E(W2)$ и центр с уровнем $E(W1)$. Термоэмиссия с этих уровней происходит в последовательности, соответствующей эксперименту и указанной на вставке рис. 2: $B^0 \xrightarrow{W1} B_1^{+1} \xrightarrow{W2} B^{+2} \xrightarrow{W3} B^{+3}$.

При термопереходе $B \rightarrow A$ ($T > 145$ К, $U = 0$) происходит захват электронов на уровне $E(W3)$, $E(W1)$, $E(W2)$ в последовательности, указанной на вставке рис. 2: $B^{+3} \rightarrow B^{+2} \rightarrow B_2^{+1} \rightarrow B^0$. При этом в соответствии с экспериментом захват на $E(W2)$ осуществляется последним. С увеличением температуры, при достижении $kT \approx E_2 = 0.18$ эВ два заполненных электронами фрагмента B^0 -конфигурации сближаются. При этом дефект приобретает конфигурационную координату, общую для B^0 и A^{-1} -конфигураций, и происходит захват двух электронов, связывающих эти фрагменты в единый центр захвата: $B^0 + 2e \rightarrow A^{-2}$.

В заключение следует отметить, что W -дефект в A -конфигурации можно было бы наблюдать в спектре НЕСГУ при температуре T , если

бы при этой температуре длительность $t_p \geq 3R^{-1}(B \rightarrow A)$, а длительность импульса смещения $t_b \geq 3R^{-1}(A \rightarrow B)$. Так, даже при $T = 400$ К $t_p \geq 0.18$ с, $t_b \geq 20$ с, а частота следования импульсов $f \leq 0.05$ Гц. Таковую последовательность импульсов в данной работе было не возможно реализовать.

Таким образом, установлено, что при облучении ОПЗ фосфида индия n -типа образуется ранее неизвестный метастабильный дефект, на котором локализовано 5 электронов. Дефект в A -конфигурации обладает свойствами центра с отрицательной корреляционной энергией. Удаление двух электронов переводит дефект в метастабильную B -конфигурацию, которая состоит из двух фрагментов дефекта. При этом на одном из фрагментов локализовано два электрона, на другом — один. Предложена координатно-конфигурационная диаграмма дефекта.

Список литературы

- [1] M. Levinson, M. Stavola, J.L. Benson, L.C. Kimerling Phys.Rev. B, **28**, 5848 (1983).
- [2] Т.И. Кольченко, В.М. Ломако, С.Е. Мороз. ЖПС, **50**, 116 (1989).
- [3] V.N. Brudnyi, V.V. Peshev, S.V. Smorodinov. Phys. St. Sol. (a), **114**, K139 (1989).

Редактор В.В. Чалдышев

The W -defect in n -InP

V. V. Peshev, S. V. Smorodinov

V.D. Kuznetsov Siberian Physicotechnical Institute, 634050 Tomsk, Russia

The W -defect has been investigated in electron-irradiated n -InP Schottky diodes. This defect is generated within the region of a space charge only and it is able to entrap 5 electrons. The defect has two configurations and one of the two, the A -configuration, displayed properties of a center with the negative correlation energy. The A -configuration transformation into a metastable B -configuration is controlled by the loss of two electrons. It has been assumed that the B -configuration is composed of two fragments entrapping one and two electrons, respectively.