краткие сообщения

УДК 621.315.592

ЭЛЕКТРОМОДУЛЯЦИОННЫЕ СПЕКТРЫ ВЫСОКООМНОГО р- и n-GaAs, ЛЕГИРОВАННОГО ХРОМОМ

В. А. Морозова, В. В. Остробородова

(кафедра физики полупроводников)

Согласно литературным данным [1—6], Сг в GaAs может находиться в нейтральном (Сг³⁺), однократно (Сг²⁺) и двукратно (Сг¹⁺) отрицательно и однократно положительно (Сг⁴⁺) заряженных состояниях. Сведения об энергетическом положении первого акцепторного 1А-уровня Сг многочисленны, но разноречивы: $\varepsilon_{1AV} \approx 0,60-0.84$ эВ. Сведений о ε_{2AV} практически нет. Метод примесного электропоглощения (ЭП), казалось бы, позволяет определять энергетическое положение глубоких уровней [7], однако и здесь результаты неоднозначны [8, 9]. Цель настоящей работы — определение ε_{1AV} , ε_{2AV} из электромодуляционных (ЭМ) спектров.

Специально неориентированные образцы n- и p-GaAs(Cr) с $\rho >$ >108 Ом см формы параллелепипеда находились в переменном поле Е конденсатора [10]. Измерения проведены в области 77-300 К; 0,5-1,5 эВ; $E \leqslant 2 \cdot 10^4$ В/см. Эффекты Холла, фото-Холла, опектральные фотопроводимость и поглощение показали, что только в р-образцах с С= $=n/p \leq 2 \cdot 10^{-3}$ имеется заметное количество нейтральных, не скомпенсированных глубокими донорами атомов Cr³⁺. В образцах же п-типа с C>1 весь хром находится в состоянии Cr²⁺, причем часть атомов, повидимому, связана в комплексы Cr²⁺ — заряженный донор [11]. ЭМспектры n- и p-GaAs(Cr) оказались существенно различными. Изменения в пропускании ∆I/I₀ ≥ 10⁻⁵, как правило, наблюдались во всей области h_{v} , при этом на общем фоне образцы с C > 1 имеют явно выраженную особенность в виде одного или двух максимумов в области 0,8—0,9 эВ (рис. I, кривые 1, 2). Аналогичная картина, но в области 0,55-0,65 эВ наблюдается в ЭМ-спектрах р-образцов (рис. 2, 1-3). Поляризационные (с пленочным поляроидом, П), полевые и температурные зависимости показали, что измеряемые сигналы обусловлены в основном эффектом Покельса [12]. При этом анализатором служит сам образец, а не фотоприемник, так как постановка световода-деполяризатора перед последним существенно не меняет картины.

Мы попытались использовать эффект Покельса [10]. Установка поляроида A после образца создает максимальные условия для его наблюдения, что приводит к увеличению $\Delta I/I_0$ на 1—2 порядка во всей области hv. Теперь интенсивность света, попадающего на фотоприемник, $I = I_1 \sin^2 2\gamma \cdot \sin^2(\delta/2)$ при П_LA, $I = I_1 - I_1 \sin^2 2\gamma \cdot \sin^2(\delta/2)$ при П||A. Здесь $I_1 = I_0$ $(1-R)^2 \exp(-\alpha d)$ (в области hv < 1,3 эВ для n- и hv < 0,8 эВ для p-образцов $\alpha d \ll 1$ [11]), $\delta = (2\pi d/\lambda) (n_1 - n_2)$ — разность фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами, в общем случае обусловленная пространственной дисперсией и эффектом Покельса [13]; γ угол между электрическим вектором волны е и направлением поляризации обыкновенного (или необыкновенного) луча. На рис. 1, 2 (кривые 4) приведены типичные спектры образцов p- и n-типа при П_LA. Они имеют характерную форму с резонансными ликами при hv = 0,61

5*

67.

(π I), 0,87 (π II), 1,5($\Im\pi$) эВ и наблюдаются на первой и второй гармониках (интенсивность первой линейно, а второй квадратично зависит от E), что свидетельствует о заметной роли пространственной дисперсии. Сильная дисперсия вблизи края собственного потлощения и резонансный $\Im\pi$ отражают вклад эффекта Франца—Келдыша в двойное лучепреломление [13]. На рис. 1 приведен пик собственного ЭП, записанный без использования A (2), а также спектр при П||A (3), когда эффекты Покельса и ЭП суммируются. Видно, что в области $h_V < 1,4$ эВ поворот A на 90° приводит лишь к изменению фазы сигна-



Рис. I. ЭМ-спектры *n*-GaAs(Cr) ($E=10^4$ В/см, вторая гармоника): I, 2 — без A; 3 — П||A; 4 — П \perp A; T=300 K (1), 80 K (2, 3, 4)



Рис. 2. ЭМ-спектры *p*-GaAs(Cr) ($E=2\cdot10^4$ В/см, вторая гармоника): 1, 2, 3 — без П, А; 4 — П \perp А; T=300 K (1), 100 K (2, 3, 4)

ла, свидетельствуя о пренебрежимо малом вкладе примесного ЭП. Положение $\mathscr{G}\pi$ при фиксированной температуре T не зависит от E, его температурное смещение соответствует ε_G (T).

Положение π I и π II не зависит от E, T, частоты модуляции (80—10⁴ Гц), взаимной ориентации E, e и s (вектор нормали к волне) и их ориентации относительно кристаллографических осей. Оба резонансных лика наблюдаются только в образцах, специально легированных хромом (в GaAs c Fe, V, O их нет). Поскольку пик я I наблюдается только в p-GaAs(Cr), где имеется нейтральный хром, естественно связать его с захватом электрона из валентной зоны атомом Сг³⁺, т. е. $\varepsilon_{1AV} = 0.61 \pm 0.01$ эВ и не зависит от T в области 80—300 К. Поглощение, Фл и фото-Холл р-образцов также указывают на наличие акцепторного уровня в области 0,6 эВ [11]. Поскольку **п** II наблюдается только в образцах с C>1, где 1А-уровень Сг полностью скомпенсирован, он может отражать выброс либо электрона в C-зону, либо дырки в V-зону атомом Ст²⁺. Мы считаем, что реализуется вторая ситуация и $\varepsilon_{2AV} = 0.87 \pm 0.005$ эВ. Действительно, при переходе $Cr^{2+} - e \rightarrow Cr^{3+}$ энерс должно гетическое положение пика меняться температурой как ε_G (так как ε_{1AV} не зависит от T), чего не наблюдается. Вряд ли также я I и я II отражают внутрицентровые переходы при энергиях 0,57; 0,84 эВ [14], так как последние наблюдаются лишь при гелиевых температурах, повышение же Т сместило бы пики фотолюминесценции к меньшим частотам [15]. Кроме того, в этом случае из-за линейного эффекта Штарка ожидается регистрация ЭМ-сигнала только на первой гармонике, у нас же всегда амплитуды сигналов на второй гармонике существенно больше, чем на первой [16].

В ЭМ-спектрах образцов с 10⁻³<C<1, как правило, наблюдается резонансный сигнал в области ~0,8 оВ (рис. 3). По-видимому, именно его авторы работы [9] связали с выбросом электронов с Cr²⁺ в C-зону. Однако положение этого пика зависит от Е и Т, и он ведет себя как один из двух пиков (левый), наблюдаемых в n-GaAs(Cr) при C>1. С ростом Č прослеживается уменьшение амплитуды я I до его полного исчезновения, при этом сигнал в области 0.8—0.9 ЭВ возрастает и возникает второй (правый) пик (кри-

вые 2 на рис. 3 и 1). Возможно, глубокие доноры связывают Сг²⁺ в комплексы, препятствуя наблюдению переходов $Cr^{2+}+e \rightarrow Cr^{1+}$, в *p*-образцах. Когда же мелкими донорами скомпенсиров 1А-уровень Сг и значительная часть глубоких доноров переведена в нейтральное состояние, то в присутст-

- , отн.ед. íU 8 6 4 2 Π 0,6 0,7 0.8 0.9 V.AB

Рис. 3. ЭМ-спектры GaAs(Cr) $(E=2\cdot 10^4 \text{ B/см}, B$ торая гармоника); без П. А; $C=2\cdot 10^{-3}$ (1) и 5 $\cdot 10^{-2}$ (2); T=100 K

вии сильного электрического поля туннельный захват электронов из валентной зоны атомами Cr²⁺ позволяет наблюдать резонансный пик при 0,87 эВ. Обнаружена полная корреляция в поведении амплитуды л II и зоны фотолюминесценции с максимумом ~0.8 эВ при изменении температуры [17] (в обоих случаях для Т>170 К наблюдается сильное гашение). Этот факт может означать, что фотолюминесценция при 0,8 эВ обусловлена излучательным захватом дырки на ион Cr¹⁺.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Вгоzel М. А., Butler J. et al. J. Phys. C., 1978, 11, р. 1857. [2] Sta-uss G. H., Krebs J. J. et al. Phys. Rev. B., 1980, 22, р. 3141. [3] Ипполито-ва Г. К., Омельяновский Э. М., Первова Л. Я. ФТП, 1975, 9, с. 1308. [4] Lin A. L., Bube R. H. J. Appl. Phys., 1976, 47, р. 1859. [5] Martin G. M., Verhejke M. L. et al. J. Appl. Phys., 1979, 50, р. 467. [6] Szawelska H. R., Allen J. W. J. Phys. C., 1979, 12, р. 3359. [7] Виноградов В. С. ФТТ, 1971, 13, с. 3266. [8] Вавилов В. С., Стопачинский В. Б., Фан ба Нян. Кр. сообщ. по физике ФИАН СССР, 1972, № 5, с. 66. [9] Воробьев Ю. В., Захар-ченко В. Н. ФТП, 1975, 9, с. 2179. [10] Морозова В. А., Такля Ф., Ост-робородова В. В. ФТП, 1980, 14, с. 1785. [11] Морозова В. А., Остробо-родова В. В. ФТП, 1981, 15, с. 1628. [12] Шепельский Г. А., Будянский В. А., Сальков Е. А. ФТТ, 1973, 15, с. 589. [13] Багдавадзе В. Н., Берозашви-ли Ю. Н. и др. ФТП, 1978, 12, с. 1873. [14] Lightowlers Е. С., Репсhi-na С. М. J. Phys. C., 1978, 11, L 405. [15] Лубченко А. Ф. Кванговые переходы в примесных центрах твердых тел. Киев: Наукова думка, 1978. [16] Воуп R., Gardavsky J. Phys. stat. sol. (b), 1975, 68, р. 575. [17] Гореленок А. Т., Ца-ренков Б. В., Чнабришвили Н. Г. ФТП, 1971, 5, с. 115.

Поступила в редакцию 16.03.82

61