

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР И ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ СТРУКТУРЫ GaAs ( $\delta$ -Sn), ВЫРАЩЕННОЙ НА ВИЦИНАЛЬНОЙ ГРАНИ

© В.И.Кадушкин, Е.Л.Шангина

Научно-исследовательский технологический институт,  
390011 Рязань, Россия  
(Получена 28 августа 1995 г. Принята к печати 2 февраля 1996 г.)

Синтезирована структура GaAs ( $\delta$ -Sn) на вицинальной грани GaAs с периодическим потенциалом в плоскости  $\delta$ -слоя. Измерены спектры фотолюминесценции и осцилляции поперечного магнитосопротивления. Выполнен расчет зонной диаграммы структуры GaAs ( $\delta$ -Sn).

1. Авторами [1] показана возможность путем эпитаксии из молекулярных пучков создавать одномерные электронные каналы на вицинальной грани GaAs. В дальнейшем этот метод формирования одномерных электронных каналов в различных модификациях развивался в работах [2-7].

Особый интерес вызывают структуры с латеральной сверхрешеткой. В таких структурах периодический потенциал в плоскости создается либо чередованием роста узкозонного и широкозонного полупроводников на фасетированной поверхности [4,5], либо включением широкозонного полупроводника в узкозонную матрицу [6].

В работах [7-9] сообщено о синтезе и исследованиях структуры GaAs ( $\delta$ -Sn) на вицинальной грани подложки полуизолирующего арсенида галлия, разориентированной на  $0.3^\circ$  от плоскости (001) к плоскости (110); обозначим этот тип структуры GaAs ( $0.3^\circ$ ,  $\delta$ -Sn) или «vic-структура». Физико-технологические условия роста предполагали формирование на вицинальной грани кристалла системы наклонных ступеней, декорирование торцов этих ступеней атомами электрически активной мелкой донорной примеси в виде  $\delta$ -слоя. В качестве электрически активной примеси при  $\delta$ -легировании было выбрано олово, которое вследствие значительного отличия своего атомного радиуса от атомного радиуса галлия и высокой диффузионной подвижности преимущественно накапливается на краях ступеней. Общий вид структуры показан на рис. 1. Особенности технологии синтеза и свойства структур GaAs ( $0.3^\circ$ ,  $\delta$ -Sn) описаны в работах [7-9].

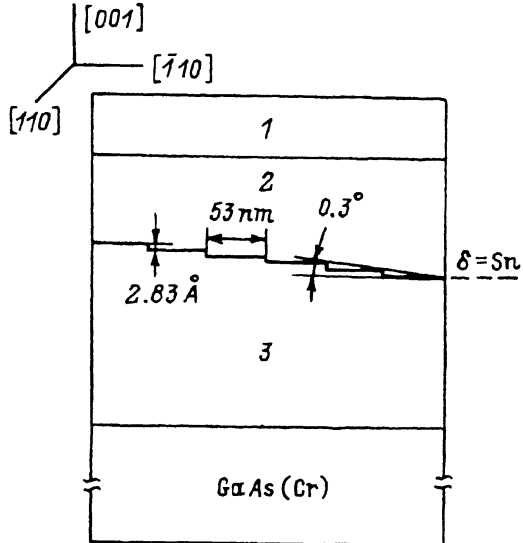


Рис. 1. Общий вид структуры GaAs ( $\delta$ -Sn), выращенной на вицинальной грани подложки GaAs (Cr) (vic-структура). Состав и толщина слоев: 1 —  $n^+$ -GaAs, 15 нм; 2 —  $i$ -GaAs, 35 нм; 3 —  $i$ -GaAs, 0.35 мкм. Вверху слева указаны кристаллографические направления.

В этой работе мы предприняли попытку получить информацию об энергетическом спектре структуры GaAs ( $\delta$ -Sn), для чего были проанализированы спектры низкотемпературной фотolumинесценции и осцилляции Шубникова-де-Гааза (ШДГ). Эти экспериментальные данные сравниваются с расчетом зонной диаграммы. Результаты расчетов и экспериментов имеют непротиворечивый характер.

2. Спектры низкотемпературной фотolumинесценции двух структур с  $\delta$ -легированием оловом представлены на рис. 2. На рис. 2,а — спектр vic-структуры, а на рис. 2,б — спектр контрольной структуры GaAs ( $0^\circ$ ,  $\delta$ -Sn), выращенной на сингулярной грани полуизолирующего GaAs (Cr); обозначим ее «sing-структура». Спектры измерены при возбуждении He-Ne-лазером ( $\lambda = 642$  нм) мощностью  $3$  Вт/см<sup>2</sup> при температуре  $T = 4.2$  К.

Отметим общие характерные признаки и принципиальные отличия спектров фотolumинесценции (ФЛ) sing- и vic-структур. На фоне широкой полосы с максимумом  $\epsilon_5 \cong 1.35$  эВ для sing- и vic-структур видны характерные линии  $\epsilon_1 = 1.514$  эВ и  $\epsilon_2 = 1.493$  эВ. Линия  $\epsilon_1$  обусловлена рекомбинацией экситона, связанного на нейтральном доноре ( $D^0, X$ ) в буферном слое  $i$ -GaAs [10]. Линия  $\epsilon_2$  соответствует излучательному переходу электрона на акцепторный уровень углерода ( $e, C^0$ ) [11]. Полоса излучения с максимумом  $\epsilon_5$  обусловлена излучательными переходами электронов на акцепторный уровень  $Sn^0$ , локализованный (с некоторым размытием) в области  $\delta$ -слоя с энергией связи  $167$  мэВ [12]. Линии  $\epsilon_3$  и  $\epsilon_4$  мы связываем с электронными переходами с уровней размерного квантования в  $\delta$ -слое Sn. По-видимому, это первое наблюдение в спектрах структуры GaAs ( $\delta$ -Sn) электронных переходов такой природы [13].

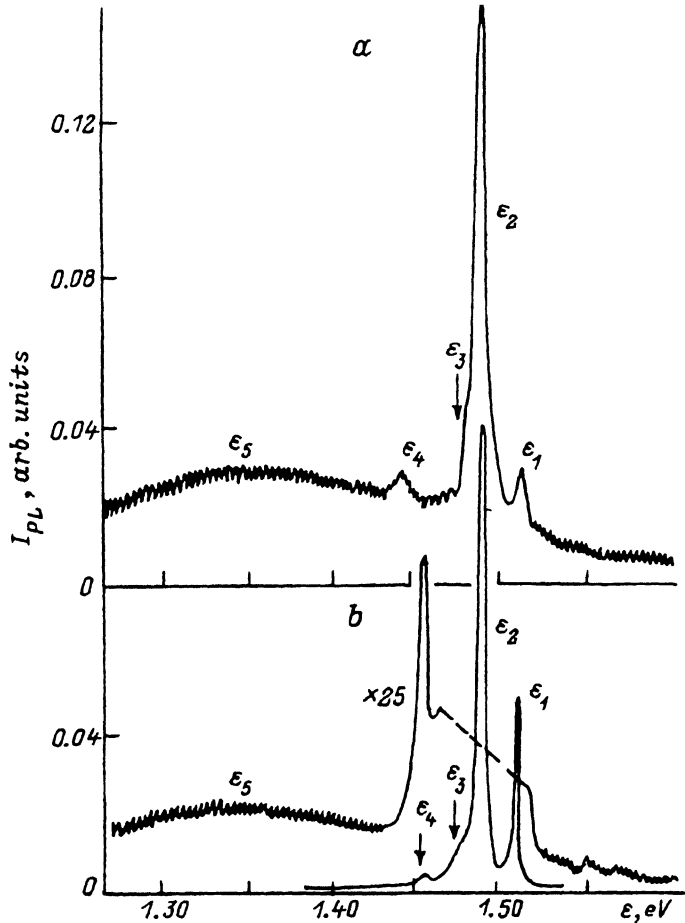


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции:

*a* — структуры GaAs ( $0.3^\circ$ ,  $\delta$ -Sn) на вращенной грани с разориентацией на  $0.3^\circ$  от плоскости (001) к плоскости (110); *b* — структуры GaAs ( $0^\circ$ ,  $\delta$ -Sn) на сингулярной грани. Температура опыта  $T = 4.2$  К.

Отличительные особенности спектров ФЛ sing- и vic-структур состоят в существенной разнице интенсивностей линий: так  $I_{vic}(\epsilon_5)/I_{sing}(\epsilon_5) = 35$ ,  $[I(\epsilon_2)/I(\epsilon_3)]_{vic} = 2.3$ , а  $[I(\epsilon_2)/I(\epsilon_3)]_{sing} = 5.1$ . Кроме этого, имеются отличия в ширине линий излучения: полуширина линии  $\epsilon_2$  для vic-структуры 12 мэВ, а для sing-структуры 6 мэВ.

3. Детальный анализ осцилляций Шубникова-де-Гааза поперечного магнитосопротивления в vic-структурах [8] позволил установить, что в осцилляциях присутствуют две гармоники. В магнитных полях до  $B \approx 15$  Тл осцилляции обусловлены электронами на втором уровне размерного квантования  $E_2$  с концентрацией  $n_{s2} = 5.0 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  и  $|E_2 - E_F| = 18$  мэВ и электронами на основном уровне размерного квантования  $E_1$  с концентрацией  $n_{s1} = 1.3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  и  $|E_1 - E_F| = 46$  мэВ. Однако точность определения этих величин невысока из-за сильного уширения экстремумов осцилляций. Осцилляции, соответствующие электронам на уровнях  $E_1$  и  $E_2$ , разнесены по шкале магнитного поля.

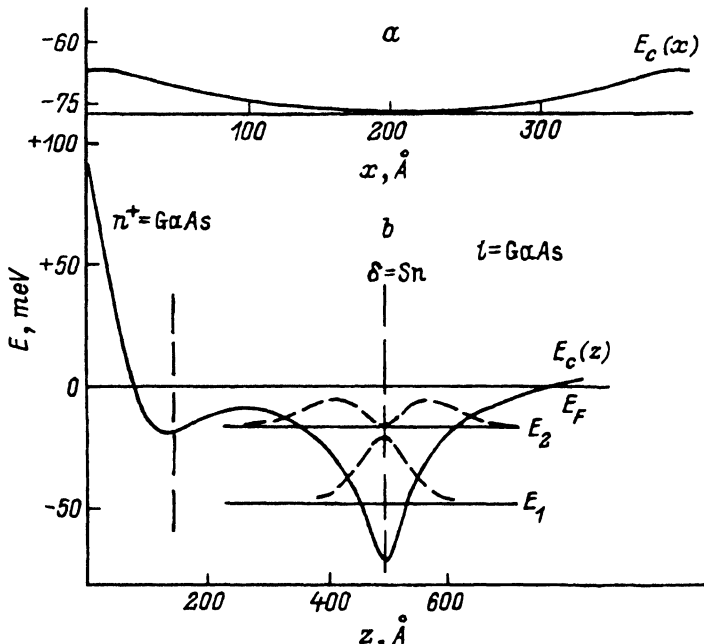


Рис. 3.

*a* — профиль дна зоны проводимости  $E_c(x)$  для структуры GaAs ( $0.3^\circ$ ,  $\delta$ -Sn) на вицинальной грани;  $x \parallel [110]$ ; расстояние между торцами ступеней 530 Å.

*b* — профиль дна зоны проводимости  $E_c(z)$  для структуры GaAs ( $0^\circ$ ,  $\delta$ -Sn) на сингулярной грани; штриховые линии — волновые функции, соответствующие уровням  $E_1$  и  $E_2$ ;  $E_F$  — уровень Ферми.

Как показывает идентификация экстремумов осцилляций и их графический анализ (веерные диаграммы), для электронов на уровне  $E_2$  в поле  $B \geq 15$  Тл выполняется условие квантового предела, и в поле  $B \geq 15$  Тл присутствуют лишь осцилляции электронов основной подзоны  $E_1$  (однако с суммарной концентрацией  $n_{s1} + n_{s2}$ ). На образцах sing-структуры осцилляции ШдГ в полях  $B < 40$  Тл нам наблюдать не удалось.

4. В связи с отмеченной общностью характерных линий в спектрах ФЛ sing- и vic-структур на данном этапе работы мы рассчитали зонную диаграмму структуры GaAs ( $0^\circ$ ,  $\delta$ -Sn). Расчет выполнен на основе самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона с учетом реальных размеров слоев и уровня легирования. Результаты расчета (профиль дна зоны проводимости  $E_c(z)$ ) для sing-структуры представлены на рис. 3, *b*. При расчетах использовались данные о концентрациях электронов, полученные из анализа осцилляций ШдГ в vic-структурах (п. 3). При этом концентрация легирующей примеси в  $\delta$ -слое шириной  $\Delta = 40$  Å [12] принималось равной  $4.7 \cdot 10^{18}$  см $^{-3}$ .

Характерной особенностью рассчитанного энергетического спектра является слияние электронных состояний контактного слоя  $n^+$ -GaAs и слоя  $\delta$ -Sn в  $i$ -GaAs из-за небольшого (350 Å) расстояния между ними. В потенциальной яме слоя  $\delta$ -Sn локализованы два уровня размерного квантования  $E_1$  и  $E_2$  с глубиной залегания относительно уровня Ферми  $|E_1 - E_F|_{\text{sing}}^{\text{calc}} = 48$  мэВ и  $|E_2 - E_F|_{\text{sing}}^{\text{calc}} = 18$  мэВ и, следо-

вательно, энергетическим зазором между ними  $|E_2 - E_1|_{\text{sing}}^{\text{calc}} = 30$  мэВ. Этот результат близок к экспериментальным данным, следующим из спектров ФЛ. Величина энергетического зазора между уровнями размерного квантования  $|E_2 - E_1|$  равна разности энергий переходов  $\epsilon_3$  и  $\epsilon_4$  в спектрах ФЛ *sing*- и *vic*-структур. На основании экспериментальных значений  $\epsilon_3 = 1.478$  эВ,  $\epsilon_4 = 1.456$  эВ для *sing*-структуры и  $\epsilon_3 = 1.476$  эВ,  $\epsilon_4 = 1.443$  эВ для *vic*-структуры (рис. 2) получаем  $|E_2 - E_1|_{\text{sing}}^{\text{exp}} = 22$  мэВ и  $|E_2 - E_1|_{\text{vic}}^{\text{exp}} = 33$  мэВ. Эту же величину энергетического зазора  $|E_2 - E_1|$  можно определить и из анализа осцилляций ШдГ. Из величин  $|E_1 - E_F| = 46$  мэВ и  $|E_2 - E_F| = 18$  мэВ (см. п. 3) следует  $|E_2 - E_1|_{\text{vic}}^{\text{exp}} = 28$  мэВ.

Таким образом, теоретическая оценка  $|E_2 - E_1|^{\text{calc}}$  близка к величине  $|E_2 - E_1|^{\text{exp}}$ , найденной из эксперимента. Это свидетельствует об адекватности используемой модели физической сущности явлений в реальной структуре. Попытки рассчитать зонную диаграмму реальной *vic*-структуры с учетом профилированного распределения олова на вицинальной грани встретили значительные методические трудности. Но вид спектров ФЛ для *vic*- и *sing*-структур свидетельствует о незначительной трансформации зонной диаграммы *vic*-структуры по отношению к *sing*-структуре. Расчет энергетического спектра *vic*-структуры, учитывающий периодичность распределения олова в плоскости  $\delta$ -легирования, показывает слабую модуляцию дна зоны проводимости в  $[110]$  направлении (кривая  $E_c(x)$  на рис. 3, а). Такой куполообразный профиль приводит к накоплению фотовозбужденных дырок и соответствующему перераспределению интенсивностей линий и их уширению с спектре ФЛ *vic*-структуры (п. 2).

Авторы выражают искреннюю благодарность В.Б.Тимофееву и В.Д.Кулаковскому, предоставившим возможность выполнить эксперименты, и И.Е.Ицкевичу, выполнившему их (при участии Е.Л.Шангиной). Авторы также признательны Ю.В.Кобаеву и В.П.Силину за полезные обсуждения результатов работы.

Работы выполнены при финансовой поддержке программы Российского Министерства науки «Физика твердотельных наноструктур» (проекты № 2-014 и № 2-016/2), Международного научного фонда (грант М30300) и Шведской королевской академии наук в рамках исследовательской программы Международного центра фундаментальной физики в Москве.

### Список литературы

- [1] J.H. Neave, P.J. Dodson, B.A. Joyce, J. Zhang. Appl. Phys. Lett., **47**, 100 (1985).
- [2] T. Fukui, H. Saito, V. Tokura. Japan J. Appl. Phys., **27**, L320 (1988).
- [3] В.И. Кадушкин, А.П. Сеничкин. ФТП, **24**, 2080 (1990).
- [4] R. Notzel, K.H. Ploog. Adv. Mater., **5**, 22 (1993).
- [5] Ж.И. Алферов, А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, С.В. Иванов, П.С. Копьев, Н.Н. Леденцов, Б.Я. Мельцер, В.М. Устинов. ФТП, **26**, 1715 (1992).
- [6] M. Tanaka, J. Motohisha, H. Sakaki. Surf. Sci., **228**, 408 (1990).
- [7] V.I. Kadushkin, V.A. Kulbachinskii, A.P. Senichkin, A.S. Bugaev, V.G. Kytin, E.L. Shangina, A. de Visser. Phys. Low-Dim. Struct., **1**, 53 (1994).
- [8] А. де Виссер, В.И. Кадушкин, В.А. Кульбачинский, В.Г. Кытин, А.П. Сеничкин, Е.Л. Шангина. Письма ЖЭТФ, **59**, 340 (1994).

- [9] В.И. Кадушкин, В.А. Кульбачинский, Е.В. Богданов, А.П. Сеничкин. ФТП, **28**, 1889 (1994).
- [10] А.Ф. Кравченко, В.В. Назинцев, А.П. Савченко, А.С. Терехов ФТТ, **21**, 1551 (1979).
- [11] В.В. Волцит, А.В. Дражан, В.А. Зуев, М.Т. Иванийчук, Д.В. Корбутяк, В.Г. Литовченко. ФТП, **12**, 2036 (1978).
- [12] W. Schairer, D. Bimberg, W. Kotteler, K. Cho, M. Schmidt. Phys. Rev. B, **13**, 3452 (1976).
- [13] А.Я. Шмик. ФТП, **26**, 1161 (1992).

Редактор Т.А. Полянская

## Energy spectrum and photoluminescence of the GaAs ( $\delta$ -Sn) structure on vicinal plane

*V.I.Kadushkin, E.L.Shangina*

Scientific Research and Technology Institute, 390011 Ryazan, Russia

The GaAs ( $\delta$ -Sn) structure on vicinal GaAs substrate with the periodical potential in the plane of  $\delta$ -layer was synthesized. The photoluminescence spectra and the transverse magnetoresistance oscillations were measured. The computation of the energy spectrum of GaAs ( $\delta$ -Sn) structure was performed.

---