

определяющих ТГФ. Если скорость и величина изменения зависят от температуры [13], то возможно возникновение гистерезиса.

Авторы признательны В. Фусу и Х. Меллу за предоставление образцов  $a$ -Si : H, легированных бором.

#### Список литературы

- [1] Vanier P. E. // Solar Cells. 1983. V. 9. N 1. P. 85—93.
- [2] Vanier P. E. // Semicond. a. Semimet. 1984. V. 21. Pt B. P. 329—358.
- [3] Vomvas A., Fritzsche H. // J. Non-Cryst. Sol. 1998. V. 97-98. P. 823—826.
- [4] Vanier P. E., Delahoy A. E., Griffith R. W. // J. Appl. Phys. 1981. V. 52. N 8. P. 5235—5242.
- [5] Dersch H., Schweitzer L. // J. Non-Cryst. Sol. 1983. V. 59-60. P. 337—340.
- [6] Fuhs W., Welsh H. M., Booth D. C. // Phys. St. Sol. (b). 1983. V. 120. N 1. P. 198—205.
- [7] Болд З., Казанский А. Г., Климашин И. В., Миличевич Е. П., Теруков Е. И. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 12. С. 2173—2176.
- [8] Буторин О. В., Казанский А. Г. // Деп. в ВИНТИ АН СССР. М., 1988. № 2764-B88.
- [9] Nitta Y., Abe K., Hattori K., Okamoto H., Hamakawa Y. // J. Non-Cryst. Sol. 1987. V. 97-98. P. 695—698.
- [10] Балагуров Л. А., Омеляновский Э. М., Пинскер Т. Н., Примбетов К. К., Уткин-Эдин Д. П. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 1. С. 155—157.
- [11] Street R. A., Kakalious J., Hayes T. M. // Phys. Rev. 1987. V. 34. N 4. P. 3030—3033.
- [12] Aker B., Fritzsche H. // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. N 11. P. 6628—6633.
- [13] Stutzmann M., Jackson W. B., Tsai C. C. // Phys. Rev. B. 1985. V. 32. N 1. P. 23—47.

Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова

Получено 3.01.1990  
Принято к печати 14.02.1990

ФТП, том 24, вып. 6, 1990

### ИНВЕРТИРОВАННАЯ ГЕТЕРОСТРУКТУРА $\text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ДЛЯ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

Крещук А. М., Лаурс Е. П., Новиков С. В., Савельев И. Г.,  
Семашко Е. М., Стовповой М. А., Шик А. Я.

Твердый раствор  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ , изопериодичный с  $\text{InP}$ , в настоящее время считается оптимальным материалом для канала полевого транзистора (ПТ) [1]. В связи с этим важным и перспективным объектом для создания ПТ является селективно легированная гетероструктура (СЛГС)  $\text{InP}/\text{InGaAs}$ , в которой двумерный электронный газ (2МЭГ) локализован в слое  $\text{InGaAs}$  у гетерограницы. Такая СЛГС может быть получена в двух конфигурациях: прямой (ПСЛГС), у которой верхним по отношению к 2МЭГ является широкозонный легированный слой  $\text{InP}$ , и инвертированной (ИСЛГС), у которой верхним является чистый слой  $\text{InGaAs}$ . Данная работа посвящена сопоставительному анализу этих двух конфигураций гетероструктур  $\text{InP}/\text{InGaAs}$  как основы для создания ПТ с 2МЭГ.

Для решения этой задачи рассматривается модель транзистора с затвором в виде барьера Шоттки, приведенная на рис. 1. В случае прямой структуры верхний слой 1 толщиной  $d$  — легированный  $\text{InP}$  с концентрацией доноров  $N_D$ , а слой 2 — нелегированный слой твердого раствора  $\text{InGaAs}$ . Для инвертированной структуры слой 1 —  $\text{InGaAs}$ , слой 2 —  $\text{InP}$ . В качестве параметра для сравнения выбрана удельная крутизна  $g$  короткоканального ПТ, в котором дрейфовая скорость электронов под затвором насыщается при  $v_S = 2.8 \cdot 10^7$  см/с [2]. При этом [3]

$$g = \frac{qv_S}{d \pm z(n_S) + 2L_{C3}qv_S/en_S\mu} \quad (1)$$

Здесь учтено, что последовательно с управляемой частью канала включено сопротивление проводящего канала вне затвора  $R_C = 2L_{C3}/en_S\mu$  ( $L_{C3}$  — расстояние между стоком и затвором,  $n_S$  и  $\mu$  — концентрация и подвижность 2МЭГ),

а двумерные электроны локализованы в InGaAs на среднем расстоянии от гетерограницы [4]  $z(n_s) = (9\chi h^2 / 16\pi m e^2 n_s)^{1/2}$  ( $\chi = 13.7$  — диэлектрическая проницаемость,  $m = 0.041m_0$  — эффективная масса электронов в InGaAs). Это увеличивает эффективное расстояние от затвора до канала в прямой структуре [знак «+» в (1)] и уменьшает его в ИСЛГС [знак «-» в (1)]. Для сопоставления величин крутизны ПТ на ПСЛГС и ИСЛГС рассмотрим зависимость параметров 2МЭГ от толщины  $d$  для прямой и инвертированной структур. При температурах 300 К подвижность 2МЭГ в СЛГС определяется в основном рассеянием на колебаниях решетки и слабо зависит от параметров СЛГС (толщины слоев и концентраций примесей). Поэтому в дальнейшем будем считать, что подвижность 2МЭГ равняется максимальной расчетной подвижности электронов в твердом растворе  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$   $\mu = 1.3 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  [3].

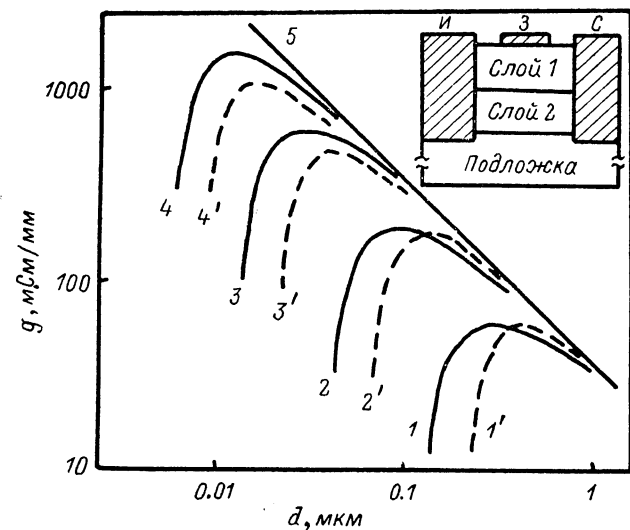


Рис. 1. Расчетные зависимости удельной крутизны полевого транзистора с 2МЭГ на основе прямой (1'—4') и инвертированной (1—4) гетероструктуры InP/InGaAs от толщины верхнего слоя при различных концентрациях доноров в слое InP.

$N_D, \text{см}^{-3}$ : 1, 1' —  $1 \cdot 10^{16}$ , 2, 2' —  $1 \cdot 10^{17}$ , 3, 3' —  $1 \cdot 10^{18}$ , 4, 4' —  $5 \cdot 10^{18}$ ; 5 —  $\infty$ . На вставке — схематическое изображение полевого транзистора с 2МЭГ.

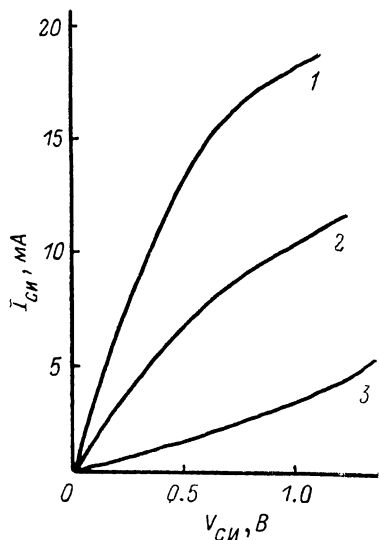


Рис. 2. Экспериментальные вольт-амперные характеристики сток-исток полевого транзистора на основе гетероструктуры InP/InGaAs с 2МЭГ, выращенной жидкофазной эпитаксией.

Напряжение  $V_{ЗД}$ : 1 — 0, 2 — -0.5, 3 — -1.

Концентрация 2МЭГ определяется соотношением зарядов в гетероструктуре и может зависеть от толщины слоев СЛГС. В ПСЛГС верхний слой является источником электронов, при уменьшении его толщины уменьшается количество доноров, способных отдать электроны в 2МЭГ. С учетом перезарядки поверхностных состояний [6], приводящих к пиннингу уровня Ферми на поверхности при энергии  $E_{s1} \approx (1/3) E_g$ , можно записать

$$n_s = \frac{N_D d}{2} - \frac{\alpha (E_{s1} - \Delta\Phi_C)}{4\pi e^2 d}, \quad (2)$$

где  $\Delta\Phi_C = E_c - E_1 - (E_F - E_1)$  — изгиб зон в InP у гетерограницы — слабо зависит от  $n_s$ , и для дальнейших оценок будем считать, что  $\Delta\Phi_C = 0.2 \text{ эВ} = \text{const} (n_s)$ . Подставив выражение (2) в (1), можно рассчитать зависимость крутизны ПТ от  $d$  на ПСЛГС. Результаты такого расчета приведены штриховыми линиями на рис. 1 при нескольких концентрациях доноров  $N_D$  в слое InP.

В случае ИСЛГС уменьшение толщины верхнего слоя не связано со снижением числа доноров, отдающих электроны в проводящий канал. Однако проведенные нами в работе [6] теоретические и экспериментальные исследования показали, что  $n_s$  в ИСЛГС зависит от  $d$  из-за перезарядки поверхностных состояний при приближении гетерограницы к поверхности:

$$n_S = \left( \frac{\chi N_D \Delta \Phi_C}{2\pi e^2} \right)^{1/2} - \frac{\chi F_{S2}}{4\pi e^2 d}, \quad (3)$$

где  $E_{S2} = (0.3 \pm 0.05)$  эВ [6]. Результаты расчета на основе выражений (3) и (1) показаны на рис. 1 сплошными линиями для различных концентраций доноров в слое InP. Видно, что зависимости  $g(d)$  для ПТ на основе как ПСЛГС, так и ИСЛГС имеют максимум, который сдвигается к меньшим  $d$  и большиим  $g$  при возрастании  $N_D$ . Однако для ПТ на инвертированных гетероструктурах максимум расположен при меньших толщинах слоев, а значения крутизны в максимуме возрастают с увеличением  $N_D$  быстрее, чем для ПТ на ПСЛГС.

Таким образом, результаты проделанного расчета позволяют для конкретной концентрации доноров в InP выбрать оптимальную толщину верхнего слоя СЛГС, при которой крутизна ПТ с 2МЭГ будет максимальной. Показано, что при фиксированном  $N_D$  крутизна ПТ на ИСЛГС в оптимуме превышает крутизну ПТ на ПСЛГС, причем различие увеличивается по мере возрастания  $N_D$ .

Приведенные соображения стимулировали работы по созданию ПТ на СЛГС InP/InGaAs с 2МЭГ, причем в первую очередь инвертированного типа. Для этого использовались имеющиеся в нашем распоряжении гетероструктуры с  $N_D = 1 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>, полученные жидкофазной эпитаксией [6]. Исходя из расчетных данных (рис. 1, кривая 1), толщину верхнего слоя выбрали равной 0.3 мкм. Макетные образцы ПТ для исследований изготавливались по технологии, описанной ранее в [7]. При этом расстояние между стоком и истоком 5, длина затвора 1–1.2, ширина 300 мкм.

Максимальное значение крутизны полученного ПТ составляло 33 мСм/мм при комнатной температуре, что в 1.5 раза ниже предсказанного. Возможные причины этого — снижение подвижности из-за заметного разогрева 2МЭГ вне затвора и недостижения максимальной дрейфовой скорости электронов на всей протяженности канала под затвором, а также большие токи утечки ( $I_{из} \approx 5$  мкА) при  $V_3 = 1$  В.

Снижение температуры до 77 К приводит к увеличению крутизны до 55 мСм/мм, что связано с повышением подвижности 2МЭГ и уменьшением токов утечки до  $I_{из} \approx 0.1$  мкА при  $V_3 = 1$  В. На рис. 2 показана зависимость тока сток—исток от тянущего напряжения при трех напряжениях на затворе при 77 К. Видно, что при обратном смещении 1 В происходит почти полное закрытие канала, тогда как при комнатной температуре достичь закрытия канала не удастся, что может свидетельствовать о больших токах утечки через затвор или о существовании при 300 К паразитной проводимости а СЛГС.

**Заключение.** Проведено теоретическое сопоставление величин максимальной крутизны ПТ на основе прямой и инвертированной гетероструктур InP/InGaAs. Показано, что в обоих случаях для любой концентрации доноров в слое InP можно выбрать оптимальную толщину верхнего слоя. При этом максимальное расчетное значение крутизны ПТ на инвертированной гетероструктуре выше, чем на прямой, особенно при  $N_D \geq 10^{18}$  см<sup>-3</sup>.

На имеющихся в нашем распоряжении инвертированных гетероструктурах InP/InGaAs с  $N_D = 1 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>, полученных жидкофазной эпитаксией, создан ПТ с 2МЭГ, обладающий близкими к расчетным параметрами, что демонстрирует перспективность создания ПТ на ИСЛГС InP/InGaAs.

#### Список литературы

- [1] Golio J., Trew R. J. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1983. V. ED-30. P. 1411–1413.
- [2] Cho Y., Sakamoto R., Inoue M. // Sol. St. Electron. 1988. V. 31. N 3/4. P. 325–328.
- [3] Drummond T. J., Masselink W. T., Morkoc H. // Proc. IEEE. 1986. V. 74. N 6. P. 773–822.
- [4] Ando T., Fowler A. B., Stern F. // Rev. Mod. Phys. 1982. V. 54. N 2. P. 437–671.
- [5] Takeda Y. // Japan. J. Appl. Phys. 1984. V. 23. N 4. P. 446–452.
- [6] Берт Н. А., Воробьева В. В., Воронцова М. В., Крепчук А. М., Новиков С. В., Погребичкий К. Ю., Савельев И. Г., Сайфидинов Д. Ж., Сошкин И. П., Шляк А. Я. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 4. С. 653–659.
- [7] Алфёров Ж. И., Босый В. И., Гореленок А. Т. и др. // Письма ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 19. С. 1807–1810.