

06.2

©1994

## ГАР ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ С ЗАТВОРОМ ШОТТКИ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

*Ю.В.Жиляев, А.Г.Кечек, Ю.А.Лифшиц, В.М.Маразонов,  
Г.С.Симин, Л.М.Федоров, И.Э.Чебунина*

В настоящей работе сообщается об изготовленных впервые полевом транзисторе Шоттки и других элементах монокристаллических интегральных схем (ИС) на основе тонкого эпитаксиального слоя GaP на полуизолирующей подложке.

Приборы на основе GaP перспективны для применения в широком и практически важном интервале температур 300–500° С. Предпосылками к этому являются большая величина запрещенной зоны GaP (2.27 эВ), приводящая к чрезвычайно низкой собственной концентрации носителей ( $\sim 2 \text{ см}^{-3}$  при 300 К и менее  $10^{14} \text{ см}^{-3}$  при 700 К), достаточно высокая подвижность электронов (до  $250 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  в чистом материале), хорошие полуизолирующие свойства подложек и общая для соединений  $A^{III}B^V$  технология проведения основных операций изготовления транзисторов и ИС. Транзисторы и ИС на основе GaP по сравнению с арсенид-галлиевыми компонентами [1] должны быть существенно более высокотемпературными, а в сравнении с разрабатываемыми приборами на основе SiC или GaN [2,3] — значительно более технологичными и дешевыми. О разработке дискретных биполярных и полевых транзисторов на легированных GaP подложках сообщалось в работах [4,5].

Полевые транзисторы с затвором Шоттки (MESFET), резисторы и диоды с барьером Шоттки были изготовлены на тонком легированном оловом эпитаксиальном слое GaP *n*-типа, выращенном на полуизолирующей GaP подложке методом газофазной эпитаксии в открытой хлоридной системе. В качестве подложек использованы пластины GaP, ориентированные в плоскости (100) с разориентацией 3–5° в направлении [110]. Толщина подложек около 400 мкм, площадь 6–8 см<sup>2</sup>. MESFET транзисторы, резисторы и диоды с барьером Шоттки изготавливались в едином технологическом процессе, включающем создание мезаструктуры, нанесение и вжигание омических контактов, нанесение барьерного контакта. В качестве омического контакта использована система Ge–Au–Ni–Au. Формирование контактов производи-

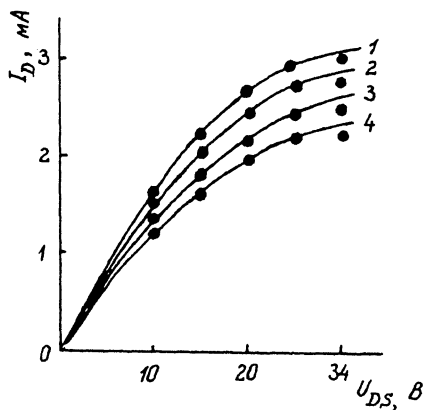


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики GaP MESFET при температуре  $22^\circ\text{C}$ ; сплошные линии — экспериментальные кривые,  $\circ$  — расчетные значения.

1 —  $U_g = 0$ , 2 —  $U_g = -2$  В, 3 —  $U_g = -4$  В, 4 —  $U_g = -6$  В.

лось путем импульсного вжигания. Барьер Шоттки образован слоями Ti-Al. Длина затвора транзисторов составляла 2.5, ширина 200 мкм. Длина активной области резисторов 5-3С при ширине 200 мкм. Размер выпрямляющего контакта диода Шоттки  $100 \times 50$  мкм.

Основные параметры активного слоя оценивались по измерениям  $C-V$  зависимости обратно смещенного диода Шоттки. Обработка этой зависимости приводит к плоскому профилю легирования с концентрацией  $\sim 1.25 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Толщина эпитаксиального слоя составила  $\sim 1.4$  мкм, напряжение перекрытия  $U_0 \sim 20$  В. Сопротивление омических контактов оценивалось с помощью цепочки резисторов переменной длины составило  $\sim 2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ ; поверхностное сопротивление слоя, найденное из этих измерений, составило  $\sim 24$  кОм, что при указанных значениях толщины слоя и концентрации носителей соответствует подвижности электронов  $\sim 110 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ .

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) резисторов (транзисторов без затвора) линейны вплоть до напряжения порядка напряжения отсечки использованных структур. Линейность ВАХ свидетельствует об отсутствии существенного поверхностного заряда, характерного для приборов на основе GaAs и заметно ухудшающего параметры GaAs MESFET за счет формирования “поверхностного” затвора [6].

Вольт-амперные характеристики MESFET при комнатной температуре приведены на рис. 1. Напряжение отсечки

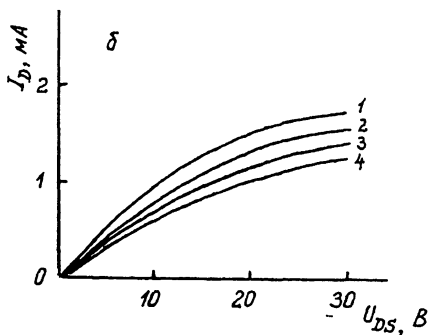
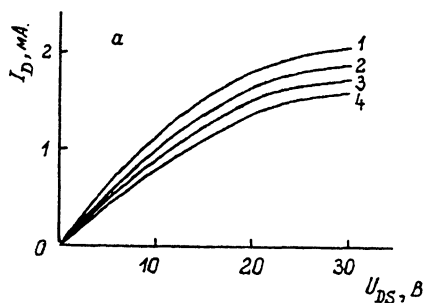
транзисторов не измерялось точно из-за возрастания токов утечки затвора. Напряжение насыщения ВАХ составляет  $U_s \sim 22$  В. Обе величины —  $U_0$  и  $U_s$  — близки к расчетному напряжению перекрытия структуры

$$U_{p0} = (qnd^2 / 2\epsilon\epsilon_0) \sim 20 \text{ В.}$$

Крутизна приборов составляет примерно 0,35 мА/В. Сравнительно малые значения крутизны объясняются как неоптимальными параметрами экспериментальной эпитаксиальной структуры (высоким напряжением перекрытия и низким уровнем легирования), так и относительно большими размерами затвора и межэлектродных зазоров приборов.

Согласно работе [7], скорость электронов в GaP насыщается в электрических полях выше 350 кВ/см; линейная зависимость скорости от поля сохраняется до полей  $\sim 100$  кВ/см. Для использованной нами эпитаксиальной структуры среднее поле в канале полевого транзистора не превышает 350 кВ/см при длине затвора более 0,6 мкм. В полевых транзисторах, изготовленных в рамках настоящей работы, длина затвора составляла 2,5 мкм; поэтому вплоть до отсечки канала эффекты насыщения скорости, характерные для GaAs, не должны проявляться и подвижность носителей во всем канале транзистора может считаться постоянной (такой режим работы MESFET принято называть режимом Шокли). Как хорошо известно, в этом режиме ток насыщения и крутизна прибора оказываются существенно выше, чем в условиях насыщения скорости носителей [8].

Доказательством соответствия измеренных ВАХ приборов модели Шокли, являются ВАХ, рассчитанные непосредственно по уравнениям Шокли (с учетом измеренных последовательных сопротивлений истока и стока), без использования каких-либо аналитических аппроксимаций. Высота барьера Шоттки, использованная в расчетах, определялась по отсечке  $C-V$  зависимости обратносмещенного диода Шоттки и составила при комнатной температуре  $U_{bi} = 1.1$  В, что хорошо согласуется с данными, приводимыми в [8]. Расчетные ВАХ транзисторов (при комнатной температуре) показаны на рис. 1. Из рисунка видно хорошее совпадение измеренных и рассчитанных параметров, что подтверждает пренебрежимо малое влияние насыщения скорости электронов в канале прибора на его работу. Расхождение наклонов расчетных и экспериментальных кривых, проявляющееся при напряжении стока, близком к напряжению отсечки, связано с эффектом "короткого затвора", поскольку в использованных нами структурах длина затвора близка к толщине активного слоя. Как известно, эффект



**Рис. 2.** Вольт-амперные характеристики GaP MESFET при повышенных температурах: *a* — 200° С, *б* — 300° С.

1 —  $U_g = 0$  В, 2 —  $U_g = -2$  В, 3 —  $U_g = -4$  В, 4 —  $U_g = -6$  В.

“короткого затвора” выражается в уменьшении дифференциального сопротивления MESFET в пологой области ВАХ.

ВАХ транзистора при температурах 200 и 300° С показаны на рис. 2, *a* и *б*. При изменении температуры от комнатной до 300° С максимальный ток и крутизна транзисторов снижаются примерно в 2 раза. Это снижение меньше, чем температурное уменьшение подвижности в чистом материале [9], поскольку канал транзистора легирован сравнительно сильно. Как следует из рисунка, повышенная температура не приводит к заметному уменьшению дифференциального сопротивления в области больших напряжений стока, что свидетельствует о малой паразитной проводимости подложки.

Ток утечки между двумя соседними приборами на подложке не превышал нескольких микроампер при темпера-

туре до 250°C, однако при температуре 300°C возрастал до 10–20 мкА. Поэтому создание на основе GaP многоэлементных ИС, работоспособных при 300°C и выше, требует либо уменьшения концентрации глубокой примеси в подложке, либо введения промежуточного высокоомного буферного слоя.

Емкость “затвор—исток” транзистора с длиной затвора  $\sim 3$  мкм составляет  $C = 0.1$  пФ при нулевом напряжении затвора. Граничная частота такого транзистора, оцениваемая по отношению крутизны к емкости,  $f = S/2\pi C$  [8], составляет около 560 МГц. Заметим, что при работе транзистора в режиме Шокли его граничная частота изменяется обратно пропорционально квадрату длины затвора:  $f \sim L_g^{-2}$  (тогда как в условиях насыщения скорости электронов это изменение обратно пропорционально первой степени длины затвора). Поэтому GaP MESFET с длиной затвора  $\sim 1$  мкм будет иметь граничную частоту выше 5 ГГц.

Таким образом, впервые изготовлены полевой транзистор с затвором Шоттки и другие элементы монолитных интегральных схем на полуизолирующей подложке с рабочей температурой выше 300°C.

Авторы искренне благодарны М.Е.Левинштейну, С.Л.Румянцеву, Дж.Кайзеру и К.Шёнбаху за помощь в работе.

#### Список литературы

- [1] Fricke K., Hartnagel H.L., Schutz R., Schweeger G., Wurfl J. // IEEE El. Dev. Let., v.EDL-10, 1989, N 12, p.p. 577–579.
- [2] Palmour J.W., Carter C.H. // Proc. of 1993 ISDRS. Dec. 1–3, Charlottesville, VA, USA, V. 2. P. 695–697.
- [3] Morkoc H. // Proc. of 1993 ISDRS. Dec. 1–3, Omni Charlottesville Hotel, VA, USA, V. 2. P. 709–715.
- [4] Weichold M.M., Eknayan O., Kao Y.C. // IEEE Trans. on Comp. Hybr. & Manufact. Techn. V. CHMT-5. 1982. N 4. P. 342–344.
- [5] Zipperian T.E., Dawson L.R. // IEEE Trans. El. Dev. V. ED-29. 1982. N 10. P. 1690.
- [6] Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия. Пер. с англ. / Под ред. М.Е.Левинштейна и В.Е.Челнокова. М., 1991. Гл. 7.
- [7] Jonson R.H., Eknayan O. // J. Appl. Phys. V. 58. 1985. N 3. P. 1402–1403.
- [8] Зу С. Физика полупроводниковых приборов. Пер. с англ. / Под ред. Р.А.Суриса. М., 1984. Т. 1., Гл. 5,6.
- [9] Kao Y.C., Eknayan O.E. // J. Appl. Phys. V. 54. 1983. N 5. P. 2468–2471.

Физико-технический  
институт им. А.Ф.Иоффе  
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию  
24 февраля 1994 г.