

06.2;12

©1994

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ НА ОСНОВЕ ФОСФИДА ГАЛЛИЯ

Ю.В.Жилев, Е.А.Панютин, Л.М.Федоров

Необходимость массового производства полупроводниковых устройств, способных длительное время работать при высоких температурах ($> 350^\circ\text{C}$), возникла более 20 лет назад. Несмотря на определенные достижения в решении отдельных частных вопросов [2,3], эта задача в настоящее время в окончательном виде еще далека от своего завершения [1]. Представляется, что сложности, возникающие на этом пути, носят не столько принципиальный, сколько инженерно-технический характер, связанный, в частности, с необходимостью комплексного решения большого количества технологических проблем.

Потенциальными материалами, которые в настоящее время могли бы послужить основой как для дискретных (в частности, силовых) приборов, так и интегральных схем, являются GaAs, InP, GaP, SiC, однако теоретический порог, соответствующий предельным рабочим температурам, определяемый шириной запрещенной зоны E_g базового материала, для большинства соединений не достигается в силу различных, в том числе технологических причин.

Возникли проблема плотности дислокаций в подложечном материале, удовлетворительно решенная в настоящее время лишь для GaAs, проблема выращивания слоев с минимальным содержанием собственных точечных дефектов и фоновых примесей, определяющих собой спектр глубоких уровней. Особенно актуальна задача отыскания оптимальных пар разнородных материалов, необходимых для создания омических контактов и защитных диэлектрических покрытий, оптимальных не только с точки зрения электрофизических параметров, но и обеспечивающих отсутствие медленно протекающих химических взаимодействий при повышенных температурах, способных приводить к деградации приборов. Эта проблема, как представляется в настоящее время, может быть решена только путем создания специальных многослойных композиций. В частности, по этой причине разработка приборов с барьером Шоттки для указанных целей представляется менее предпочтительной по сравнению с приборами на основе $p-n$ переходов не только

в силу недостаточной высоты барьера, но и в силу наличия дополнительных контактов разнородных материалов, хотя первые во многом технологически проще.

Именно этой технологической простотой определился успех в разработках поверхностно-барьерных полевых транзисторов с коротким каналом на основе GaAs, который привел к созданию быстродействующих БИС и СБИС, однако недостаточное значение высоты барьера GaAs-Me не дает возможности прямого использования опыта этих разработок для получения высокотемпературных интегральных схем.

В настоящей работе представлены результаты создания матриц нормально открытых полевых транзисторов на основе GaP, ориентированных на последующие разработки на их основе интегральных схем, способных выполнить полный набор операций дискретной электроники при температурах 400...450°C.

В качестве базовой полупроводниковой структуры, предназначенной для последующего формирования различных модификаций транзисторов, в настоящей работе были использованы многослойные эпитаксиальные GaP $p-n$ структуры. Основной технологический процесс — осаждение из газовой фазы в хлоридной системе [4] — обладает по сравнению с другими методами возможностью получения чистых слоев, обусловленной глубокой очисткой исходных компонентов, возможностью выращивания структур с однородными по толщине и уровню легирования слоями большой площади ($> 10\text{см}^2$), хорошей управляемостью и воспроизводимостью толщины слоев. Он способен обеспечить малый разброс по основным электрофизическим параметрам от опыта к опыту.

Основной вариант базовой структуры содержит три эпитаксиальных слоя, выращенных на n -, p - и полуизолирующих подложках, ориентированных в плоскости (100) с отклонением 3...5° к (110). Наилучшие результаты были получены на подложках p -типа, легированных цинком, с плотностью дислокаций $\simeq 10^5\text{см}^{-2}$.

Буферный n_0 -слой служит по крайней мере двум различным целям. Во-первых, будучи в значительной степени более структурно-совершенным по сравнению с подложкой, он существенно снижает возможность дислокационного прорастания в активный слой, однако для достижения требуемых результатов (а также с учетом параметров промышленного подложечного материала) его толщина должна составлять не менее 20 мкм. Кроме того, буферный слой снижает негативное влияние диффузии цинка из подложки, имеющего место в процессе роста активного слоя. Кроме защитной

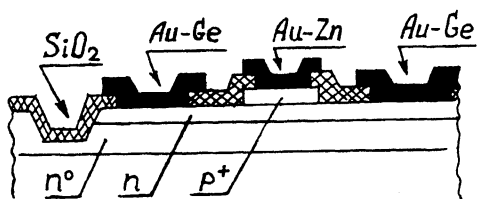


Рис. 1. Структура полевых транзисторов.

функции, буферный слой n_0 -типа с концентрацией фоновых примесей $\approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$ дает возможность использовать его в качестве полуизолятора.

Активный n -слой структуры толщиной 1 мкм, служащий для формирования канала, легировался в процессе роста теллуrom в диапазоне концентраций $10^{16} \dots 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Подвижность электронов измерялась на специальных модельных структурах методом Холла и имела типичную для GaP величину $\mu_n = 150 \dots 180 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ для уровня легирования $N_d = 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Верхний слой, служащий основой для формирования затворного слоя p - n перехода, легировался либо цинком, либо магнием, и имел толщину, не превышающую значение толщины канала. В случае применения цинка наблюдались в среднем большие значения обратного тока p - n перехода (тока управления), что связывалось с большим вкладом процессов диффузии и образованием более размытых p - n переходов. С другой стороны, большее значение предельной концентрации внедрения цинка обеспечивало получение контактов с более низким сопротивлением.

Для создания контактов применялись композиции на основе золота (напыление в вакууме): AuGe — для n -типа и AuZn — для p -типа. Значения контактного сопротивления имели величину $\approx 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$.

На основе эпитаксиальных структур были получены матрицы нормально открытых транзисторов, схематически изображенных на рис. 1. В качестве диэлектрического покрытия, предназначенного для выполнения маскирующих, изолирующих и защитных функций, использовался SiO₂, который получали путем низкотемпературного (200°C) плазмохимического разложения гексаметилдисилаксана; предполагалось, что малая толщина слоев SiO₂ ($< 0.2 \text{ мкм}$) обеспечит отсутствие заметных термонапряжений токоведущих дорожек на границах покрытия.

Основная операция, формирующая затвор, сводилась к созданию мезаструктуры с использованием жидкостного (динамического и статического) травления в сочетании с операциями литографии. При создании приборной струк-

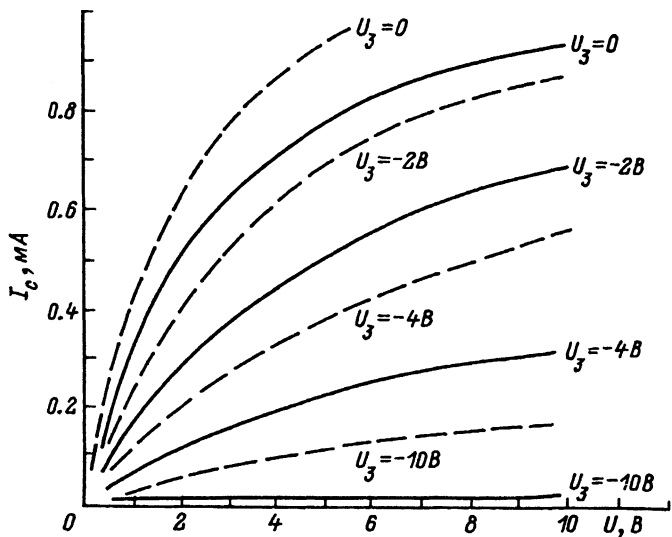


Рис. 2. Семейство характеристик транзистора.

Сплошные кривые — при $T = 25$, пунктирные — при 450°C .

туры использовался традиционный подход, без привлечения способов самосовмещения, основанных на применении теневых методов и краевых эффектов травления ввиду специфики и недостаточной проработанности процессов травления фосфида галлия; кроме того, необходимость получения приборов со сверхкоротким каналом пока остается не столь очевидной, как для GaAs.

В качестве альтернативного подхода формирования затвора был апробирован метод локального выращивания p -слоя сквозь окна в маскирующем SiO_2 -покрытии. Характерная особенность этого варианта — меньшая управляемость толщиной затворного слоя; вероятно, это связано с эффектами катализирования границей (ступенькой) SiO_2 скорости роста эпитаксиального слоя.

Типичные результаты измерений ВАХ транзисторов при $T = 25$ и 450°C , полученных в рамках описанной технологии, представлены на рис. 2. Конкретные геометрические параметры прибора: длина затвора 10, длина канала 20, ширина затвора 800 мкм. Уровень легирования канала $2 \dots 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при толщине 0.8...1 мкм. Крутизна ВАХ транзисторов, образующих матрицу, составляет 100 мкА/В (для дискретных приборов она достигала значения 2...3 мА/В), ток насыщения при $U_3 = 0$ составля-

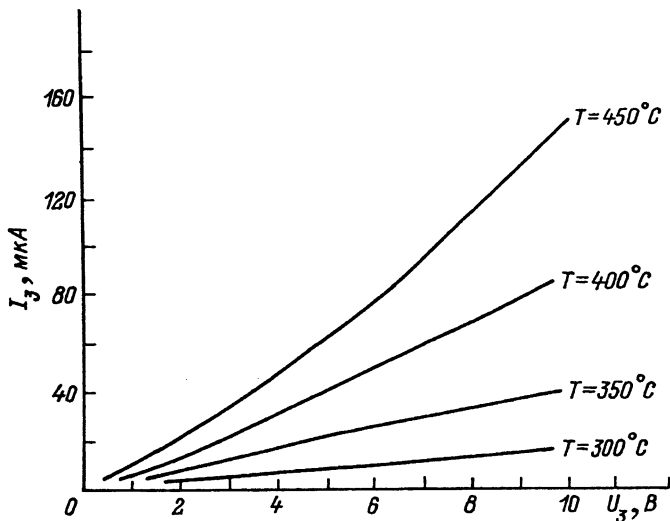


Рис. 3. Характеристики тока затвора при различных температурах.

ет величину 1.2 мА, ток затвора при $T = 25^\circ\text{C} < 10^{-8}$ А. Граничная частота работы транзистора лежит в пределах 30...50 МГц; это значение ее связывается, в частности, с недостаточно малым контактным сопротивлением и неоптимизированной геометрией прибора.

Измерения при повышенных температурах показали, что наиболее чувствительный параметр к изменению температуры — ток затвора I_z ; семейство его характеристик в диапазоне 300...450°C показано на рис. 3. В указанном диапазоне приборы сохраняют работоспособность длительное время.

Авторы искренне благодарны Н.И.Ильинской и О.В.Титковой за помощь в подготовке образцов, а также Prof. K.H.Schoenbach (Old Dominion University), John Kiser и The William and Mary Greve Foundation, Inc. за содействие в работе.

Список литературы

- [1] *Palkuti L.C., Prince J.L., Glista A.S.* // IEEE Trans. V. CHMT-2. N 4. P. 405-412.
- [2] *Palmer D.W., Ganyard F.P.* // IEEE Trans. 1978. V. CHMT-1. N 3. P. 219-222.
- [3] *Palmer D.W., Heckman R.C.* // IEEE Trans. 1978. V. CHMT-1. N 4. P. 333-340.
- [4] *Alferov J.I., Garbuzov D.Z., Trukan M.K., Zhiljaev Ju.V.* // J. Kris. & Techn. 1967. N 4. P. 541-545.

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

Поступило в Редакцию
29 марта 1994 г.
