

06;12

## Полевой транзистор с 30-нм затвором

© С.В. Оболенский, М.А. Китаев

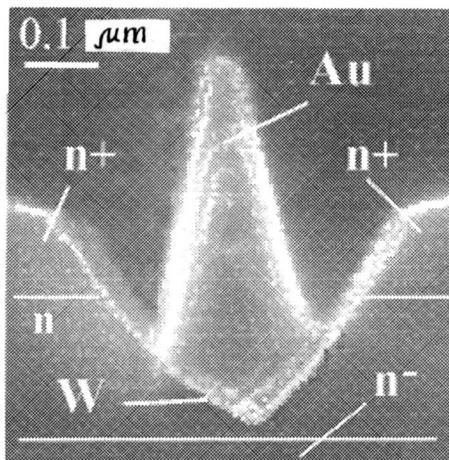
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Поступило в Редакцию 29 октября 1999 г.

Разработана технология изготовления и исследованы характеристики GaAs полевого транзистора с затвором Шоттки с эффективной длиной затвора 30 нм. Предельная частота усиления по мощности 150 GHz. Коэффициент шума на частотах 12–37 GHz сравним с транзисторами с двумерным электронным газом. Теоретически рассчитанное время пролета электронов под затвором менее 0.1 ps.

Известно, что конструктивным параметром, определяющим высокочастотные характеристики полевых транзисторов с затвором Шоттки (ПТШ), является длина затвора [1]. Имеющиеся в настоящее время литографические установки не позволяют надежно получать разрешение выше 0.1  $\mu\text{m}$ . В [2] было предложено, используя оптическую фотолитографию, формировать канал ПТШ в виде V-образной канавки, что при длине металлизации затвора порядка 2  $\mu\text{m}$  приближает высокочастотные характеристики прибора к характеристикам ПТШ с субмикронным затвором.

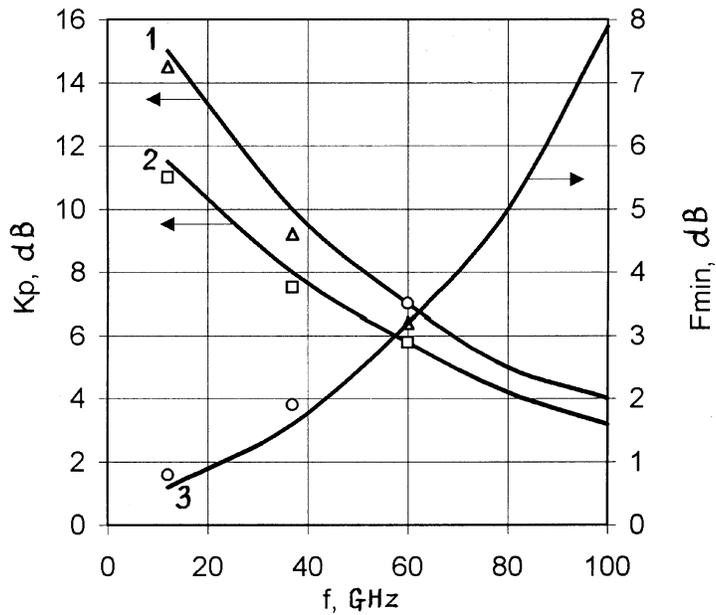
В данной работе эта методика была впервые реализована с применением электронной литографии. Использовались традиционные для изготовления ПТШ  $n^+ - n - n^-$ -GaAs-структуры, полученные газотранспортной эпитаксией с характерной величиной переходной области канал-буферный слой ( $n - n^-$ ) около 0.15  $\mu\text{m}$ . Применение анизотропного травления в травителе состава  $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 1 : 0.5 : 25$ , позволяющего изготовить V-канавку в активном слое GaAs-структуры в совокупности с методом самосовмещения [3] при напылении металлизации затвора, обеспечило получение эффективной длины затвора менее 30 нм (рис. 1). Точность ориентации топологии изготавливаемого прибора относительно кристаллографических направлений исходной полупроводниковой пластины составляла  $\pm 3 - 5^\circ$ . При изготовлении образцов применялся электронный резист типа ЭЛП-13. Резист наносился слоем толщиной 0.35  $\mu\text{m}$  и высушивался при температуре 170°C в течение 30 min. Экспонирование проводилось на установке электронно-лучевого



**Рис. 1.** Микрофотоснимок поперечного сечения полевого транзистора с V-канавкой в области затвора, полученный с помощью РЭМ. Уровни легирования слоев GaAs:  $n^-$  — буферный слой  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $n$ -канал —  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $n^+$ -контактный слой —  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Материал металлизации затвора — Au с подслоем из W.

экспонирования ZBA-21 с диаметром электронного пучка  $0.1 \mu\text{m}$ . Для проявления использовалась смесь метилэтилкетона и изопропилового спирта.

Измерения низкочастотных характеристик транзистора проводились на характеристикографе Л2-56, а высокочастотных — с помощью панорамных измерителей P2-67, P2-65, P2-69 (на частотах 12, 37 и 60 GHz соответственно). Измерения динамических характеристик ПТШ проводились с помощью прецизионных зондовых головок для неразрушающего контроля коэффициентов усиления и шума непосредственно на кристаллах. Из имевшегося набора транзисторов с различной шириной затвора были выбраны оптимальные приборы для каждого из частотных диапазонов:  $200 \mu\text{m}$  (входная емкость затвор-исток  $C = 0.15 \text{ pF}$ ) для 12 GHz,  $100 \mu\text{m}$  ( $C = 0.08 \text{ pF}$ ) для 37 GHz,  $50 \mu\text{m}$  ( $C = 0.05 \text{ pF}$ ) для 60 GHz.



**Рис. 2.** Высокочастотные характеристики ПТШ: 1 — максимальный коэффициент усиления по мощности, 2 — оптимальный коэффициент усиления, 3 — минимальный коэффициент шума. Сплошные линии — теоретический расчет.

Вольт-амперная характеристика прибора имеет традиционный вид. Ток насыщения транзистора около 7 мА (при ширине затвора 50  $\mu\text{m}$ ). Крутизна более 400 мС/мм. Экспериментальные зависимости максимального коэффициента усиления, минимального коэффициента шума и соответствующего ему оптимального коэффициента усиления от частоты приведены на рис. 2. Предельная частота усиления по мощности (теоретическая оценка) около 150 ГГц.

Теоретические расчеты, проведенные в приближении времен релаксации [4,5], показывают, что время пролета носителей под затвором около 0.1 ps (баллистический пролет), а время переключения транзистора из открытого состояния в закрытое менее 1 ps. Эти данные позволяют надеяться на увеличение предельной частоты усиления по мощности в 2–3 раза при снижении входной емкости за счет уменьшения ширины затвора до 7–15  $\mu\text{m}$ .

Наибольшее влияние на движение носителей заряда под затвором оказывает эффект всплеска скорости (*overshoot*). Максимальная скорость носителей в канале —  $8 \cdot 10^7$  см/с, что согласуется с данными [4]. Благодаря наличию *V*-канавки эффект обратного всплеска скорости (*undershoot*) ниже, чем в традиционном транзисторе с той же длиной затвора, что является дополнительным фактором, улучшающим работу прибора. Последнее объясняется иным распределением электрического поля в зазоре затвор-сток, что в свою очередь влияет на распределение температуры электронного газа в канале и приводит к уменьшению размеров статического домена Ганна и его смещению к стоку. Переход электронов из *L* в  $\Gamma$ -долину происходит в  $n^+$  контактном слое GaAs (около стока).

Наименьший уровень шумов получен при толщине канала (в его узкой части), сравнимой с величиной обедненной области (нормально закрытый транзистор). В этом случае оптимальное напряжение смещения затвора составляет +0.15 В. Это, видимо, объясняется снижением эффективности рассеяния носителей заряда при движении их в слое, непосредственно примыкающем к *n*-каналу. Причем из-за диффузии носителей заряда проводимость этого слоя сравнима с проводимостью канала, что дополнительно уменьшает шумовое сопротивление. В результате коэффициент шума транзистора на частоте 12 GHz при коэффициенте усиления 11.5 dB составляет менее 0.8 dB, что сравнимо с коэффициентом шума транзисторов с двумерным электронным газом.

Таким образом, представленные результаты доказывают возможность создания ПТШ на стандартных эпитаксиальных GaAs-структурах, имеющих характеристики, близкие к транзисторам с двумерным электронным газом (HEMT и PHEMT), за счет создания затворов с эффективной длиной в несколько десятков нанометров.

## Список литературы

- [1] Gill D.M., Cane B.C., Svensson S.P. et al. // IEEE Trans. 1996. ED-17. N 4. P. 328–330.
- [2] Kohn E. // Electronics Letters. 1975. V. 11. N 8. P. 160.
- [3] Cheng C.L., Coldren L.A., Miller B.I. et al. // IEEE Trans. 1984. ED-31. N 6. P. 840–841.
- [4] Carnez B., Cappy A., Kaszinski A., Constant E., Salmer G. // J. Appl. Phys. 1980. V. 51 (1). P. 784.
- [5] Оболенский С.В., Павлов Г.П. // ФТП. 1995. Т. 29. № 3. С. 413–420.