

УДК 621.3.049.774

**П. П. Мальцев**, д-р техн. наук, проф., директор,  
**Д. Л. Гнатюк**, мл. науч. сотр.,  
**Ю. В. Фёдоров**, зав. лаб.,  
**А. В. Зуев**, мл. науч. сотр.,  
**Р. Р. Галиев**, мл. науч. сотр.,  
**Н. В. Побойкина**, инженер,  
 e-mail: iuhfseras2010@yandex.ru,  
 Федеральное государственное бюджетное  
 учреждение науки Институт  
 сверхвысокочастотной полупроводниковой  
 электроники Российской академии наук  
 (ИСВЧПЭ РАН)

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛОСИГНАЛЬНЫХ И ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАМОРФНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ДЛЯ МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ В КРАЙНЕВЫСОКОЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ

Поступила в редакцию 23.10.2012

Описаны результаты научно-исследовательской работы, проведенной ИСВЧПЭ РАН, в которой созданы экспериментальные образцы метаморфных гетероструктур для изготовления на их основе монолитных интегральных схем усилителя мощности и маломощного усилителя диапазона рабочих частот 57...64 ГГц и исследованы характеристики изготовленных тестовых транзисторов.

**Ключевые слова:** монолитная интегральная схема, метаморфная гетероструктура, маломощный усилитель, усилитель мощности

Метаморфные наногетероструктуры с InGaAs каналом с содержанием индия 30...55 % широко используются в мире для изготовления монолитных интегральных схем (МИС) в диапазоне частот 60...90 ГГц и выше [1–4].

В Российской Федерации, к сожалению, отечественная транзисторная элементная база диапазона 60...90 ГГц не существует. Полное отсутствие отечественных полупроводниковых материалов, пригодных для изготовления МИС с рабочими частотами 60...90 ГГц, неуклонно увеличивает отставание отечественных производителей ЭКБ

электронной компонентной базы (ЭКБ) и в развитии современных технологий, и в опыте проектирования.

В результате научно-исследовательской работы, проведенной ИСВЧПЭ РАН, созданы экспериментальные образцы метаморфных гетероструктур для изготовления на их основе МИС усилителя мощности и маломощного усилителя с диапазоном рабочих частот 57...64 ГГц и исследованы характеристики изготовленных тестовых транзисторов.

Для исследования зависимости статических, малосигнальных и шумовых характеристик метаморфных (МНЕМТ) транзисторов в крайневисокочастотном (КВЧ) диапазоне от ширины ( $W_g$ ) и длины ( $L_g$ ) затворов были изготовлены наборы транзисторов с длиной грибообразных затворов в диапазоне 50...250 нм. Каждый набор состоял из четырех транзисторов с разной шириной затворов  $W_g$ :  $2 \times 30$ ,  $2 \times 40$ ,  $2 \times 60$  и  $2 \times 80$  мкм. Транзисторы изготавливались на гетероструктурной подложке InAlAs/InGaAs/GaAs диаметром 50 мм. Схема и описание гетероструктуры приведены в [5].

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) транзисторов измерялись на установке Tektronix 370A. ВАХ транзисторов с минимальной и максимальной длиной затвора показаны на рис. 1 и 2.

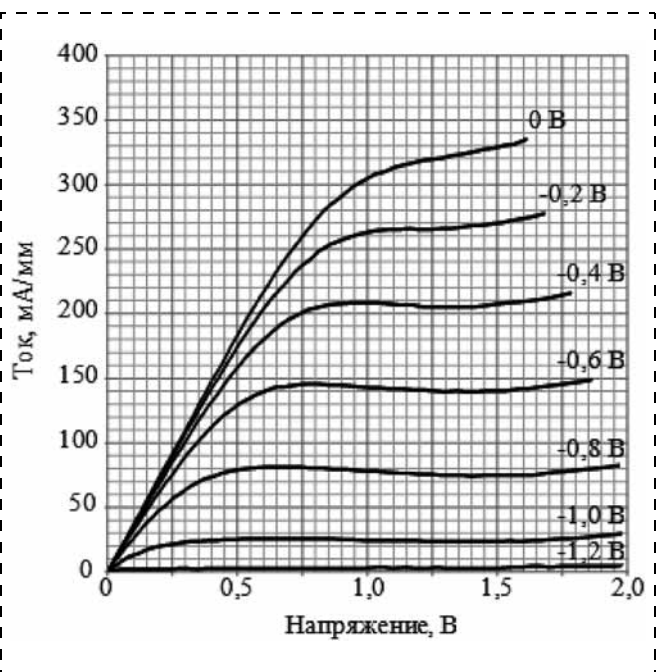


Рис. 1. ВАХ МНЕМТ транзистора с  $L_g = 50$  нм

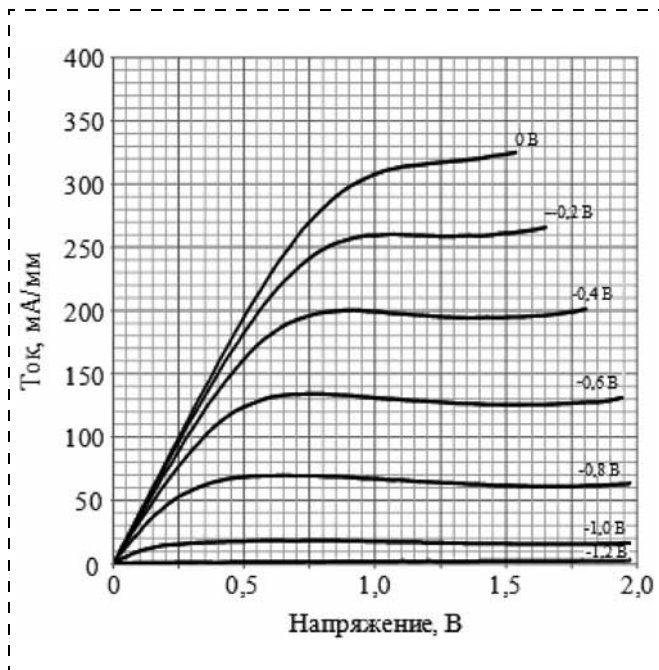


Рис. 2. ВАХ МНЕМТ транзистора с  $L_g = 250$  нм

Транзисторы с короткими затворами не закрываются до конца. Вероятно, это связано с особенностями технологии изготовления, а именно — жидкостного травления подзатворного заглубления через узкую щель. Для затворов длиной 250 нм пороговое напряжение затвор-исток составляет  $-1,2$  В. Напряжение отсечки для обеих длин затворов примерно равно  $0,8$  В. Выходная проводимость МНЕМТ практически не зависит от  $L_g$  вследствие тонкой гетероструктуры — расстояние затвор-канал составляет 15 нм. Максимальные значения крутизны ВАХ транзисторов также слабо зависят от длины затвора и находятся в диапазоне значений  $300 \dots 325$  мСм/мм.

S-параметры (параметры рассеяния) транзисторов измерялись непосредственно на пластине с помощью векторного анализатора Agilent E8361A в диапазоне частот  $0,01 \dots 67$  ГГц. Результаты этих измерений транзисторов с шириной затвора  $W_g$   $2 \times 30$ ,  $2 \times 40$ ,  $2 \times 60$  и  $2 \times 80$  мкм и с  $L_g = 50$  и  $L_g = 250$  нм показаны на рис. 3—5 (см. третью сторону обложки). Результаты соответствуют транзисторам, расположенным в одном и том же рабочем модуле на пластине. Маркерами на рисунках отмечены значения предельных частот усиления по току ( $f_t$ ), по напряжению ( $f_{max}$ ), а также максимально достижимые значения коэффициента усиления на частоте 60 ГГц.

Как следует из рис. 3, значение  $f_t$  транзисторов с  $L_g = 250$  нм относительно невелико и составляет  $53 \dots 55$  ГГц для всего набора образцов. Для транзисторов с  $L_g = 50$  нм значение  $f_t$  варьируется от 96 ГГц ( $2 \times 30$  мкм) до 134 ГГц ( $2 \times 80$  мкм). Такая разница объясняется тем, что оценка  $f_t$  выполня-

лась с помощью результатов измерений без учета так называемого де-эмбединга контактных площадок транзисторов. Поскольку по мере увеличения ширины затвора емкость контактных площадок становится все более сравнимой с емкостью самого затвора, то для транзисторов с коротким затвором влияние процедуры де-эмбединга контактных площадок на СВЧ характеристики тем существеннее, чем меньше ширина затвора.

Максимально достижимое значение коэффициента усиления на частоте 60 ГГц транзисторов с  $L_g = 250$  нм составляет  $8 \dots 12,4$  дБ (см. рис. 4). Однако транзисторы с  $L_g = 50$  нм имеют меньший разброс значений данного параметра  $11,8 \dots 12,9$  дБ ввиду более высоких частот перегиба зависимости максимально достижимого/стабильного коэффициента усиления по мощности для затворов  $2 \times 60$  мкм и  $2 \times 80$  мкм (50 и 60 ГГц вместо 30 и 46 ГГц соответственно).

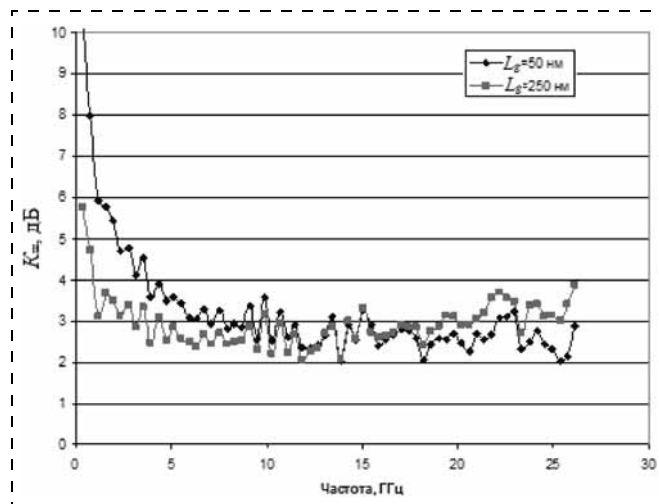


Рис. 6. Частотная зависимость  $K_{ш}$  для транзисторов с  $W_g = 2 \times 30$  мкм и с длиной затвора 50 и 250 нм

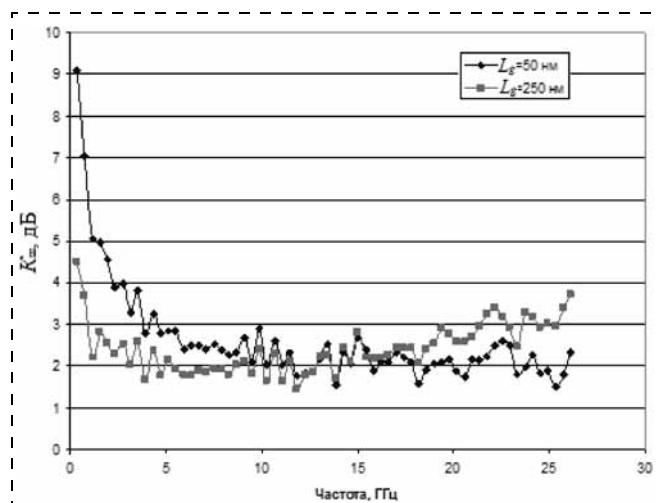


Рис. 7. Частотная зависимость  $K_{ш}$  для транзисторов с  $W_g = 2 \times 40$  мкм и с длиной затвора 50 и 250 нм

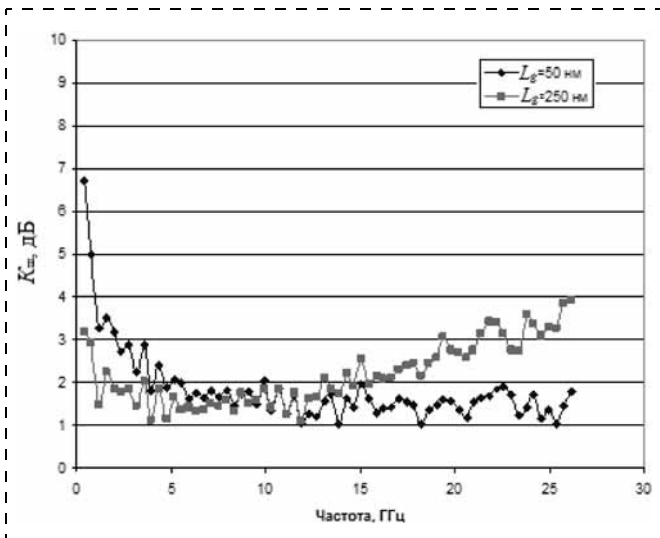


Рис. 8. Частотная зависимость  $K_{ш}$  для транзисторов с  $W_g = 2 \times 60$  мкм и с длиной затвора 50 и 250 нм

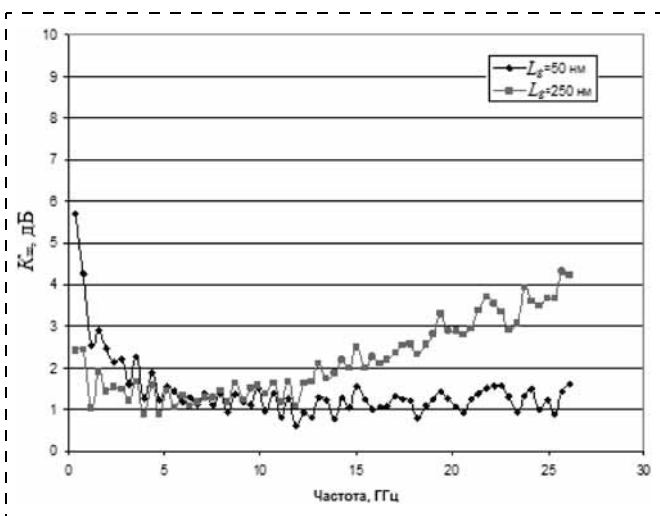


Рис. 9. Частотная зависимость  $K_{ш}$  для транзисторов с  $W_g = 2 \times 80$  мкм и с длиной затвора 50 и 250 нм

Оценка параметра  $f_{max}$  (см. рис. 5) демонстрирует значения порядка 500 ГГц для  $L_g = 50$  нм и 230...430 ГГц для  $L_g = 250$  нм.

После выполнения полного де-эмбединга были определены внутренние величины  $f_t$  и  $f_{max}$  транзисторов, которые достигали 200 ГГц и 500 ГГц соответственно [5].

Полученные значения рассмотренных параметров, очевидно, позволяют использовать такие транзисторы для разработки МИС с рабочими частотами вплоть до 100 ГГц.

Коэффициент шума ( $K_{ш}$ ) транзисторов измерялся на установке Agilent N8975A в диапазоне

0,3...26 ГГц в 50-омном тракте. Результаты измерений транзисторов с  $W_g = 2 \times 30, 2 \times 40, 2 \times 60$  и  $2 \times 80$  мкм и с  $L_g = 50$  нм и  $L_g = 250$  нм показаны на рис. 6–9.

Для всех рассмотренных транзисторов прослеживается принципиально одинаковая закономерность. На частотах ниже 12 ГГц  $K_{ш}$  транзисторов с длинным затвором меньше, чем  $K_{ш}$  транзисторов с коротким затвором. Однако при этом наблюдается его возрастание с частотой, тогда как для коротких затворов  $K_{ш}$  практически постоянен. При этом разница между шумовыми параметрами транзисторов с длинными и короткими затворами тем меньше, чем меньше ширина затворов. По мере увеличения общей ширины затворов  $K_{ш}$  транзисторов в 50-омном тракте с ростом частоты уменьшается для коротких затворов и увеличивается для длинных.

\* \* \*

Разработанная технология эпитаксиального роста метаморфных гетероструктур InAlAs/InGaAs/GaAs позволила создать СВЧ транзисторы, пригодные для создания на их основе МИС маломощных усилителей и усилителей мощности КВЧ в диапазоне частот 50...100 Гц. Для достижения оптимальных характеристик разрабатываемых МИС необходимо подбирать длину и ширину затворов транзисторов в соответствии с рабочим частотным диапазоном.

*Работа выполнена в рамках государственного контракта № 16.426.11.0046 от 12 сентября 2011 года по заказу Минобрнауки России.*

#### Список литературы

1. Бугаев А. С., Галиев Г. Б., Мальцев П. П. и др. Полупроводниковые гетероструктуры InAlAs/InGaAs с метаморфным буфером  $\text{In}_x(\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y})_{1-x}\text{As}$ : конструкция, технология, применение // Микро- и наносистемная техника. 2012. № 10. С. 14–24.
2. Gunnarsson S. E., Karnreil C., Zirath H. et al. / Single-Chip 60 GHz Transmitter and Receiver MMICs in a GaAs mHEMT Technology // Microwave Symposium Digest. 2006. P. 801–804.
3. Millimeter-wave Broadband Amplifier using MHEMT / Yong Hyun Baek, Sang Jin Lee, Tae Jong Baek, et al. // Global Symposium on Millimeter Waves GSMM 2008. 2008. P. 48–51.
4. Q-, V-, and W-band power amplifiers utilizing coupled lines for impedance matching / M. Abbasi, H. Zirath, I Angelov // Microwave Symposium Digest. 2008. P. 863–866.
5. Михайлович С. В., Фёдоров Ю. В., Бугаев А. С. и др. Построение масштабируемой шумовой модели MHEMT на GaAs с  $L_g$  от 50 до 250 нм // Доклады ТУСУРа. 2011. № 2 (24). Часть 2. С. 31–35.