

МОЩНЫЕ GaN-ТРАНЗИСТОРЫ ДЛЯ L- И S-ДИАПАЗОНОВ ЧАСТОТ

В статье представлены основные технические характеристики разработанных мощных нитрид-галлиевых транзисторов с рабочим напряжением питания 28 В для L- и S-диапазонов частот, а также технические характеристики широкополосного усилительного паллета на основе GaN-транзистора ПП9137А. Нитрид-галлиевые транзисторы обеспечивают высокие значения коэффициента усиления по мощности и коэффициента полезного действия стока.

Разработчики радиоаппаратуры СВЧ-диапазона все чаще применяют в своих изделиях и комплексах транзисторы на основе широкозонных материалов и гетероструктур, в частности, мощные нитрид-галлиевые транзисторы взамен транзисторных структур металл-оксид-кремний, полученных методом боковой диффузии (LDMOS). Применение GaN-транзисторов предпочтительнее по ряду причин: у этих приборов — высокая подвижность электронов, высокая скорость насыщения, высокие значения пробивных напряжений стока-исток как для транзисторных структур с рабочим напряжением питания 28 В, так и для структур с рабочим напряжением питания 50 В, высокая удельная плотность мощности, широкий диапазон рабочих частот, высокая теплопроводность.

В настоящее время мощные СВЧ GaN-транзисторы для непрерывного и импульсного режимов работы выпускаются и изготавливаются многими зарубежными компаниями. В их число входят

такие признанные мировые лидеры как Ampleon (NXP), Integra Technologies, Microsemi Corporation, Wolfspeed (Cree), Qorvo (RFMD + TriQuint) [1–5]. В России разработкой GaN-приборов занимаются АО «НИИЭТ» (г. Воронеж), ЗАО «Светлана-Рост» (г. Санкт-Петербург), АО «НПП «Пульсар»

(г. Москва), АО НПФ «Микран» (г. Томск), АО «Светлана-Электрон-прибор» (г. Санкт-Петербург).

Конструктивно-технологические особенности нитрид-галлиевых транзисторных кристаллов с проектной нормой изготовления затвора до 0,25 мкм позволяют увеличить коэффициент усиления

Таблица. Основные параметры транзисторов

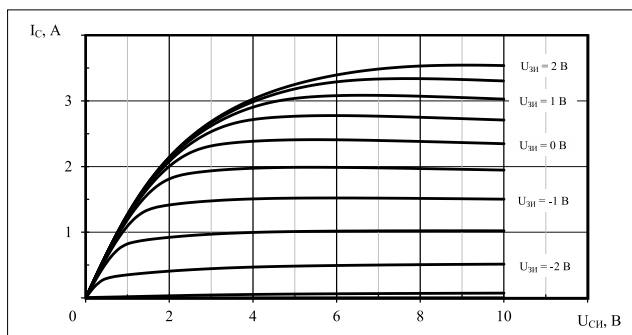
| Тип транзистора | $P_{\text{вык}}$, Вт | $K_{\text{ур}}$, дБ | η_c , % | Тип корпуса | Z, Ом |
|--|-----------------------|----------------------|--------------|-------------|------------------------------------|
| Режим измерения: $f = 4$ ГГц, $U_{\text{си}} = 28$ В | | | | | |
| ПП9136А | 5,07 | 17,05 | 52,9 | КТ-81С | $6,82 + j1,64$ $16,71 + j14,49$ |
| ПП9137А | 10,1 | 14,08 | 54,20 | КТ-81С | $5,57 - j4,22$ $15,97 + j3,13$ |
| ПП9138А | 15,2 | 12,81 | 54,12 | КТ-81С | $4,89 - j6,79$ $10,51 - j2,13$ |
| ПП9138Б | 25,91 | 11,13 | 51,62 | КТ-81С | $3,74 - j4,02$ $5,10 - j2,85$ |
| Режим измерения: $f = 2,9$ ГГц, $U_{\text{си}} = 28$ В | | | | | |
| ПП9139А1 | 50,72 | 12,05 | 57,56 | КТ-55С-1 | $2,28 - j7,71$ $4,09 - j7,37$ |



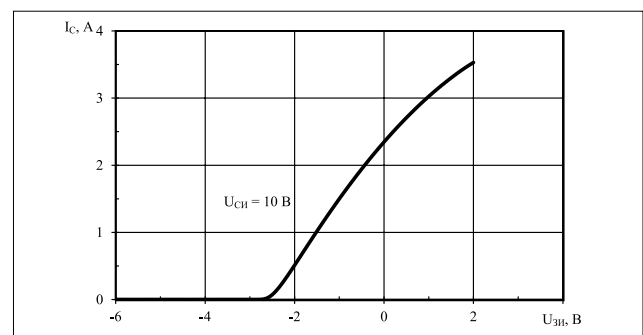
Корпус КТ-81С



Корпус КТ-55С-1



▲ Рис. 1. Типовые выходные вольт-амперные характеристики (ВАХ) в схеме с общим истоком при $t_c = (25 \pm 10)^\circ\text{C}$ для транзистора типа ПП9137А



▲ Рис. 2. Типовая проходная ВАХ в схеме с общим истоком при $t_c = (25 \pm 10)^\circ\text{C}$ для транзистора типа ПП9137А

по мощности и расширить частотный диапазон.

С целью снижения теплового сопротивления переход–корпус и улучшения теплопроводности монтаж GaN-транзисторных кристаллов осуществлялся в металлокерамические корпуса при помощи преформ AuSn.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ GaN-ТРАНЗИСТОРОВ

К основным эксплуатационным параметрам мощных СВЧ GaN-транзисторов относятся: выходная мощность, коэффициент полезного действия стока (η_c), коэффициент усиления по мощности ($K_{ур}$).

К важнейшим электрическим и электрофизическим параметрам, на которые обращают внимание разработчики аппаратуры и оборудования, относятся: те-

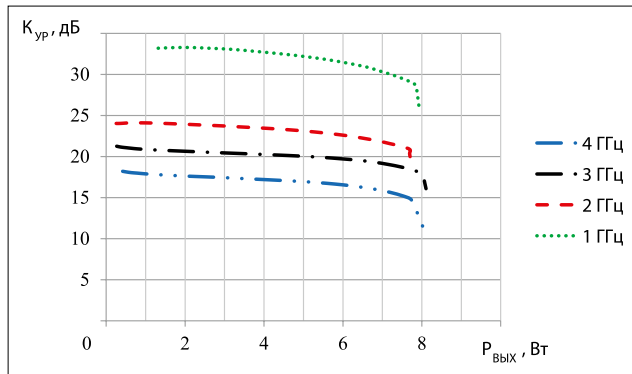
пловое сопротивление переход–корпус ($R_{т-к}$), максимально допустимая рассеиваемая мощность ($P_{макс}$), сопротивление сток–исток в открытом состоянии ($R_{си\text{отк}}$), крутизна характеристики (S), стойкость изделий к внешним воздействующим факторам и другие параметры. Для транзисторов ПП9136А, ПП9137А, ПП9138А, ПП9138Б, ПП91391, разработанных АО «НИИЭТ», максимально допустимое значение постоянного напряжения сток–исток транзисторов составляет 120 В (при $U_{зи} = -10$ В). Эксплуатационные параметры данных транзисторов представлены в таблице.

Для разработчиков аппаратуры важнейшим фактором при проведении расчетов и моделирования является получение детальной информации применяемых транзисторов. К ней относятся: типовые зависимости основных эксплуатационных параметров, выходные и про-

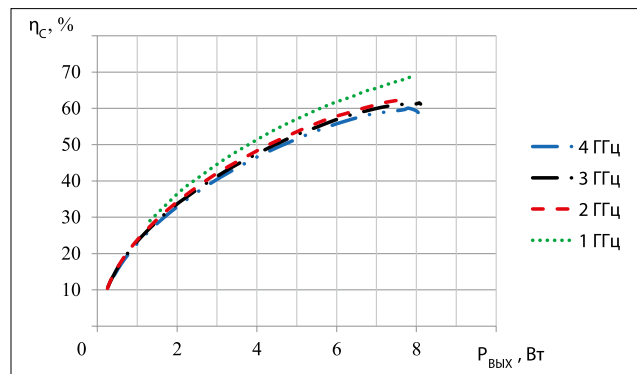
ходные вольт-амперные характеристики (ВАХ), а также S-параметры для различных режимов работы.

На рис. 1–2 представлены типовые ВАХ для транзистора ПП9137А. На рис. 3–17 представлены зависимости основных эксплуатационных параметров транзисторов ПП9136А, ПП9137А, ПП9138А, ПП9138Б, ПП91391. Измерения основных эксплуатационных параметров транзисторов проводились на большом уровне сигнала методом согласованных нагрузок (измерения Load&Pull при помощи автоматических тюнеров Maury Microwave).

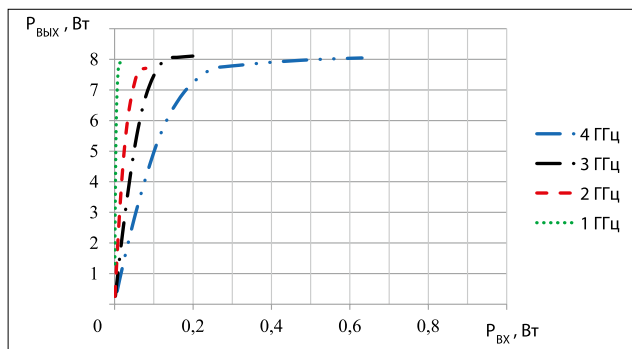
В отличие от полевых кремниевых нормально закрытых транзисторов, GaN-транзисторы, как и GaAs-транзисторы, являются нормально открытыми, поэтому при эксплуатации необходимо соблюдать строгую последовательность включения — пода-



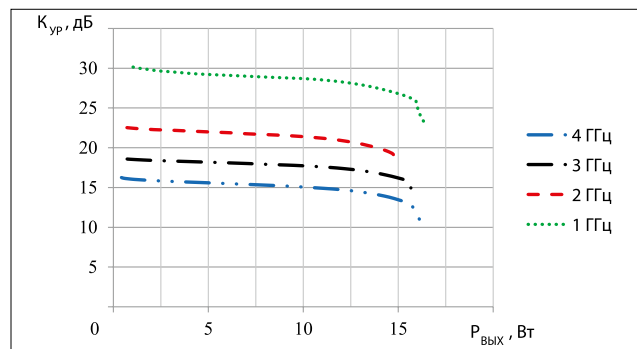
▲ **Рис. 3.** Зависимость коэффициента усиления по мощности от выходной мощности на частотах 1–4 ГГц для транзисторов типа ПП9136А



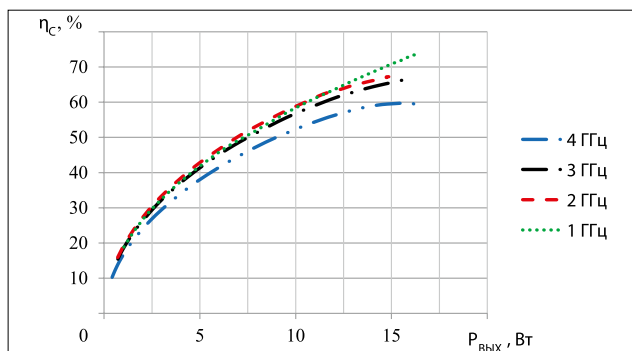
▲ **Рис. 4.** Зависимость КПД стока от выходной мощности на частотах 1–4 ГГц для транзисторов типа ПП9136А



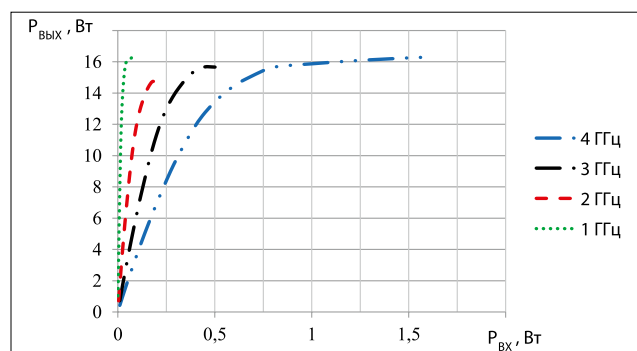
▲ **Рис. 5.** Зависимость выходной мощности от входной мощности на частотах 1–4 ГГц для транзисторов типа ПП9136А



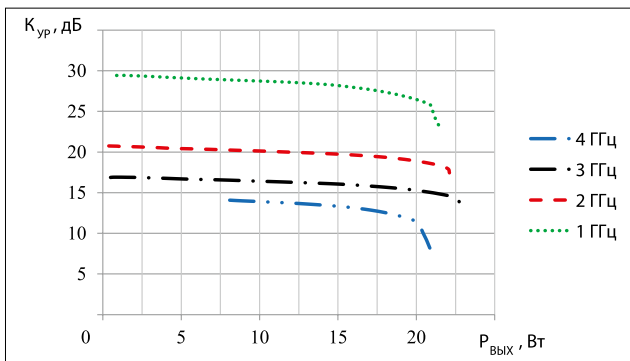
▲ **Рис. 6.** Зависимость коэффициента усиления по мощности от выходной мощности на частотах 1–4 ГГц для транзисторов типа ПП9137А



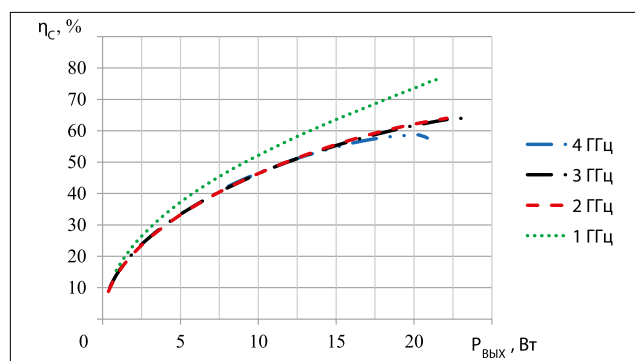
▲ **Рис. 7.** Зависимость КПД стока от выходной мощности на частотах 1–4 ГГц для транзисторов типа ПП9137А



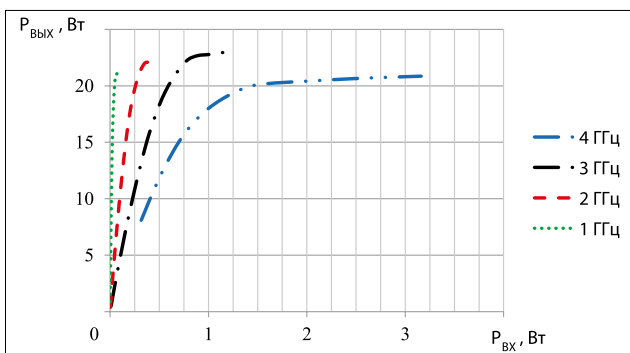
▲ **Рис. 8.** Зависимость выходной мощности от входной мощности на частотах 1–4 ГГц для транзисторов типа ПП9137А



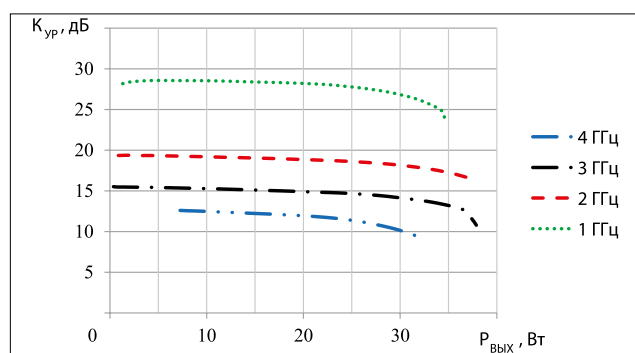
▲ **Рис. 9.** Зависимость коэффициента усиления по мощности от выходной мощности на частотах 1–4 ГГц для транзисторов типа ПП9138А



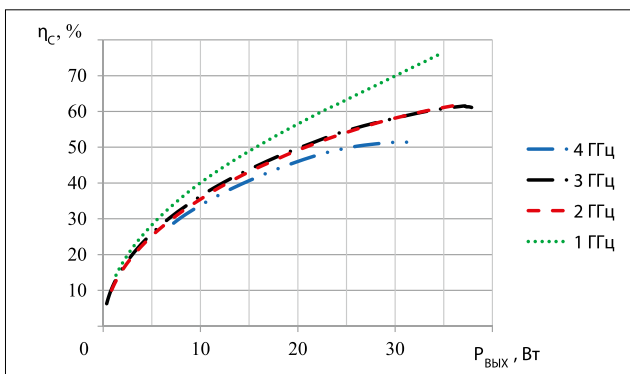
▲ **Рис. 10.** Зависимость КПД стока от выходной мощности на частотах 1–4 ГГц для транзисторов типа ПП9138А



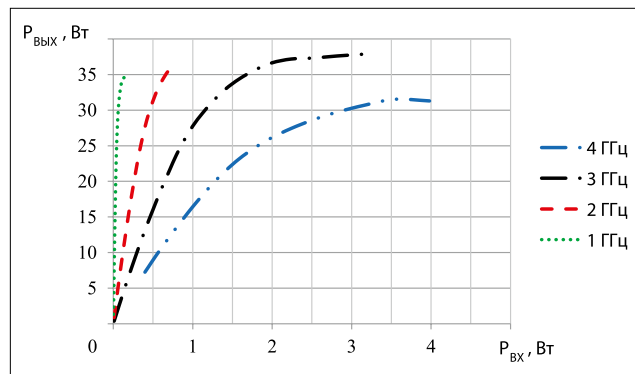
▲ **Рис. 11.** Зависимость выходной мощности от входной мощности на частотах 1–4 ГГц для транзисторов типа ПП9138А



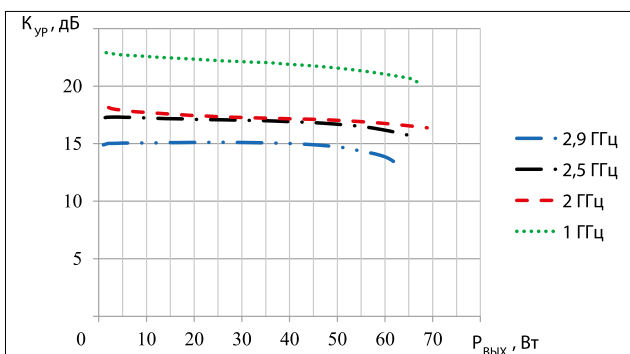
▲ **Рис. 12.** Зависимость коэффициента усиления по мощности от выходной мощности на частотах 1–4 ГГц для транзисторов типа ПП9138Б



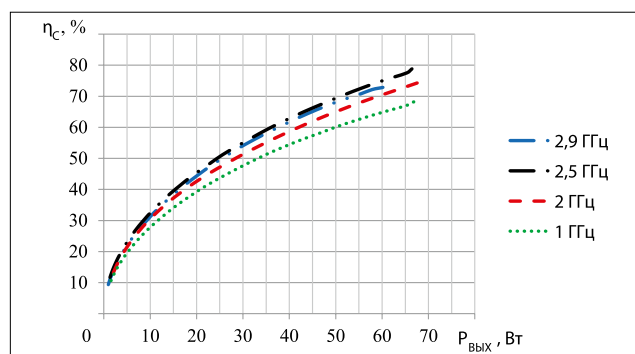
▲ **Рис. 13.** Зависимость КПД стока от выходной мощности на частотах 1–4 ГГц для транзисторов типа ПП9138Б



▲ **Рис. 14.** Зависимость выходной мощности от входной мощности на частотах 1–4 ГГц для транзисторов типа ПП9138Б



▲ **Рис. 15.** Зависимость коэффициента усиления по мощности от выходной мощности на частотах 1–2,9 ГГц для транзисторов типа ПП9139А1



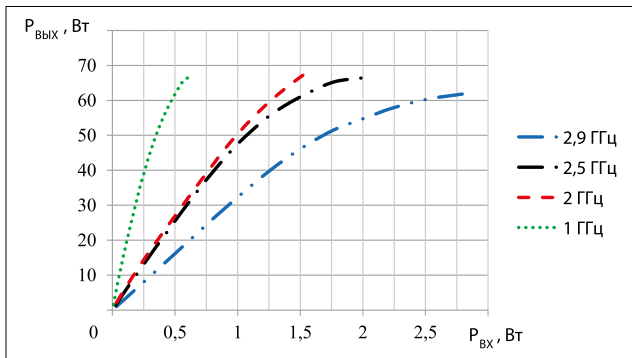
▲ **Рис. 16.** Зависимость КПД стока от выходной мощности на частотах 1–2,9 ГГц для транзисторов типа ПП9139А1

ча запирающего смещения на затвор и последующее включение напряжения питания. В противном случае, без подачи запирающего отрицательного смещения при подаче питания GaN-транзистор выйдет из строя. Схемы включения, как правило, предостав-

ляются самими разработчиками GaN-транзисторов [5].

С целью проверки возможности применения разработанных нитрид-галлиевых транзисторов в широком диапазоне частот специалисты АО «НИИЭТ» смоделировали, разработали и изгото-

вовали широкополосный усилительный паллет на основе GaN-транзистора ПП9137А — УМП2740–10Д. В целях предотвращения выхода из строя транзистора при его неправильном включении специалисты АО «НИИЭТ» создали встроенную защиту от про-



▲ **Рис. 17.** Зависимость выходной мощности от входной мощности на частотах 1–2,9 ГГц для транзисторов типа ПП9139А1



▲ **Рис. 18.** Демонстрационный широкополосный усилитель мощности УМП2740-10Д на транзисторе ПП9137А

падения напряжения смещения, реализованную при изготовлении УМП2740–10Д. На рис. 18 изображен внешний вид усилителя мощности УМП2740–10 Д, предназначенного для работы в широком диапазоне частот 2,7–4,0 ГГц. На рис. 19–21 приведены зависимости электрических параметров усилительного паллета при рабочем напряжении питания 28 В.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

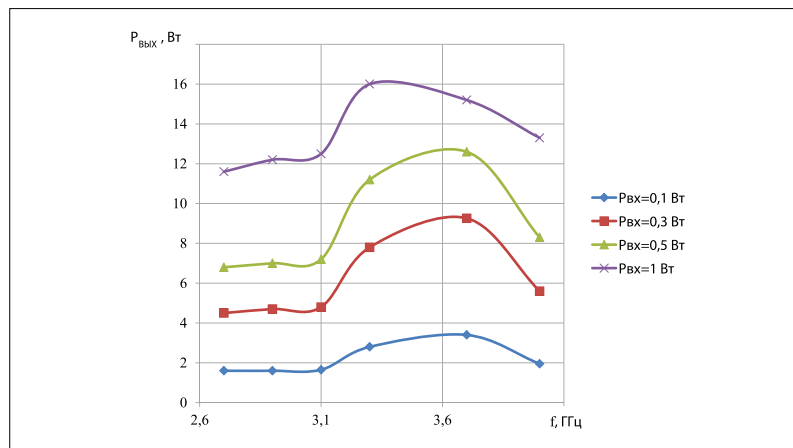
Разработанная серия нитрид-галлиевых транзисторов ПП9136А, ПП9137А, ПП9138А, ПП9138Б, ПП9139 А1 обеспечивает конкурентоспособные значения таких важнейших эксплуатационных параметров как выходная мощность в непрерывном режиме, коэффициент усиления по мощности, коэффициент полезного действия стока и соответствуют современному техническому уровню, а также новейшим поколениям зарубежных GaN-транзисторов. Разработанные транзисторы серий ПП9136А, ПП9137А, ПП9138А, ПП9138Б, ПП9139А1 будут использоваться в современной аппаратуре радиосвязи и радиолокации. Транзисторы могут применяться не только для работы в широком диапазоне частот, но и в узкой полосе частот.

Использование разработанных транзисторов обеспечит создание новейших образцов отечественных систем и комплексов, которые по своим техническим характеристикам будут соответствовать лучшим мировым аналогам и образцам. Об этом свидетельствует огромное количество заявок, поступивших от отечественных предприятий–потребителей, которые проявили заинтересованность в транзисторах ПП9136А, ПП9137А, ПП9138А, ПП9138Б, ПП9139А1.

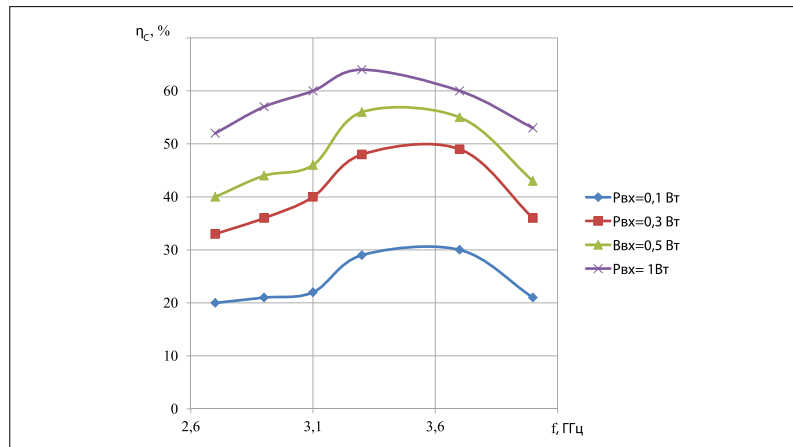
Появление линейки отечественных GaN СВЧ-транзисторов для работы в непрерывном и импульсном режимах работы в диапазоне частот до 6 ГГц позволит решить многие задачи в области создания аппаратуры специального и общего назначения в приоритетных направлениях развития и совершенствования отечественной элементной компонентной базы. ◀

ЛИТЕРАТУРА

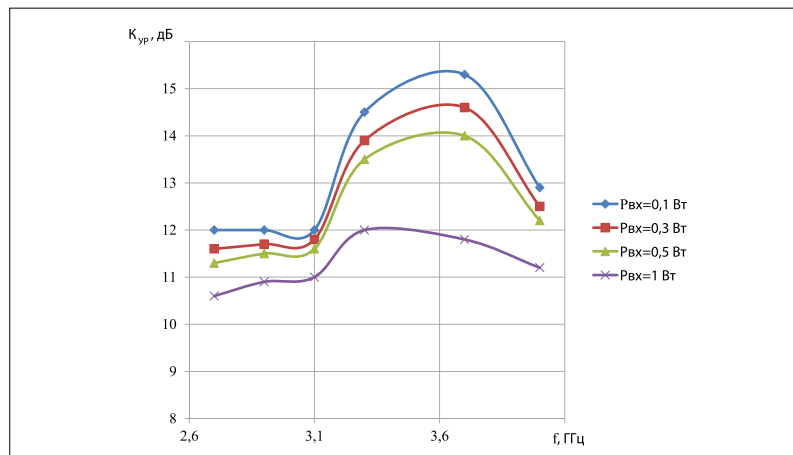
1. <http://www.ampleon.com>.
2. <http://www.integrattech.com>.
3. <https://www.microsemi.com>.
4. <http://www.wolfspeed.com>.
5. <http://www.qorvo.com>.



▲ **Рис. 19.** Зависимость выходной мощности от частоты для УМП2740-10Д



▲ **Рис. 20.** Зависимость КПД стока от частоты для УМП2740-10Д



▲ **Рис. 21.** Зависимость коэффициента усиления по мощности от частоты для УМП2740-10Д