

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПРИБОРАХ, ЭЛЕМЕНТАХ И СИСТЕМАХ НАУЧНОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

УДК 537.962: 621.382.32 А. М. КОРОЛЕВ

Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: k_w_m@ukr.net

ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫЕ ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ КАК АКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ОСОБО ЖЕСТКИХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Предложено использовать псевдоморфные полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов (РНЕМТ) как активные элементы высокоэкономичных микроволновых ($1 \div 4$ ГГц) усилителей, работающих в широком интервале окружающих температур. Экспериментальный усилитель функционирует в интервале температур от -100 до $+100$ °С с сохранением основных электрических характеристик. Представляется обоснованным вывод о перспективности использования GaAs РНЕМТ в приемниках, работающих в дежурном режиме в экстремальных окружающих условиях.

Ключевые слова: псевдоморфный полевой транзистор с высокой подвижностью электронов, микроволновый усилитель, низкое напряжение питания, температурная стойкость

1. Введение

При мониторинге последствий природных и техногенных катастроф, проведении климатических и иных геофизических исследований используются системы дистанционного сбора данных и геодезической привязки. Организация опроса первичных источников (сенсоров, постов комплексного наблюдения и т. д.) подразумевает наличие двунаправленного канала связи, включая находящийся в режиме постоянного действия радиоприемник. Требования к этому узлу, особенно в отношении экономичности и термостабильности, могут быть очень жесткими.

Необходимость в минимальном энергопотреблении обусловлена режимом постоянной готовности к приему сигнала о сбросе накопленного массива данных либо смене программы слежения.

Высокая термостабильность необходима, поскольку сенсоры геофизического и биосферного мониторинга могут работать в условиях как высоких температур (сейсмология, гидротермальная геология), так и очень низких (гляциология, высотная аэрономия). В горной и пустынной местности

возможны резкие температурные колебания. Проблема термостабильности, или, более широко, термической стойкости, может решаться активным термостатированием. Однако такие термостаты (кондиционеры) – устройства с большим энергопотреблением, заведомо на порядки превышающим энергопотребление электроники приемников.

Обратим внимание на важное различие режимов работы передатчиков и приемников. Импульс передачи предварительно сжатого массива накопленной информации относительно краток. Для термостабилизации достаточно тепловой инерции аппарата в комплексе с пассивной термоизоляцией. Исключение (редкое) – трансляция в реальном времени. Для приемника же требуется режим постоянного действия.

Ниже приводится описание экспериментов с псевдоморфными полевыми транзисторами с высокой подвижностью электронов как активными элементами высокоэкономичных электронных узлов приемных устройств, способных работать в диапазоне от $+100$ до -100 °С. Такой интервал рабочих температур позволяет решать большинство геофизических задач. Исключением являются вулканология и глубинные геологические изыс-

кания, где развивается оригинальная высокотемпературная техника.

Исследования проводились в диапазоне частот $1 \div 4$ ГГц. Выбор диапазона обусловлен спецификой современных сенсорных сетей, информация от которых передается в СВЧ диапазоне через спутниковые ретрансляторы. Исследовались усилительные ячейки, так как они – основа радиоэлектроники. Именно усилительный каскад образует базис для создания большинства узлов приемной системы: преобразователей частоты, гетеродинов и собственно усилителей сигналов на несущей и промежуточных частотах.

2. Сравнительная характеристика транзисторов на основе различных полупроводников

В настоящее время существует несколько технологий транзисторов для расширенного диапазона температур. Во-первых, это кремниевая технология: CMOS, BiCMOS, SOI и др. Сразу исключим из рассмотрения дешевые элементы бытовой электроники в классе “civil”. Интервал температур приборов классов “industrial” и “militar” составляет от -40 до $+60$ °С. В некоторых случаях кремниевые транзисторы могут работать в расширенном диапазоне (класс “space”, термостойкие до 200 °С, устойчивые к радиации), но это не коммерчески доступные изделия узкой номенклатуры. Наконец, деградация характеристик кремниевых транзисторов, особенно СВЧ маломощных (со слабым самопрогревом), при температурах менее -60 °С слишком велика. Этого недостатка лишены транзисторы на полупроводниках типа кремний–германий (в том числе НВТ), но здесь проблемы уже с высокими температурами.

Транзисторы на широкозонных полупроводниках типа нитрида галлия и карбида кремния ориентированы в основном на силовые и особо высокотемпературные применения [1–4]. Здесь экономичность на малых сигналах и низкотемпературные параметры – второстепенны и посредственны. Наоборот, транзисторы на узкозонных полупроводниках (антимонид индия, антимонид галлия) высокоэкономичны и работоспособны при глубоком охлаждении [5], но не стойки к нагреву.

Наиболее универсальны приборы на базе (подложках) арсенида галлия (GaAs) и фосфида индия (InP). Их можно отнести, условно, к “среднезонным”. Полевые транзисторы с высокой под-

вижностью электронов (HEMT) на InP и GaAs сочетают отличные частотные, усилительные и шумовые характеристики с возможностью охлаждения до криогенных температур. Эти их свойства широко используются в дальней связи и радиоастрономии [6]. Однако InP-технология чрезвычайно затратная, а продукция представлена только классом заказных изделий, в основном на миллиметровый диапазон длин волн. В коммерчески доступном классе находятся транзисторы на основе GaAs, со структурой активной области на In-Ga-As-Al, так называемые “псевдоморфные” HEMT (PHEMT). Ориентируясь на научно-гражданские приложения, мы остановили выбор именно на PHEMT.

Касательно возможности работы при повышенных температурах можно отметить следующее. Для различных типов маломощных PHEMT допускается температура канала около 150 °С, при термосопротивлении (R_t) канал–корпус $50 \div 300$ °С/Вт. В рассматриваемом случае проектируется устройство с рассеиваемой (транзистором) мощностью не более 10 мВт, и эффекты саморазогрева минимальны. Так, перегрев канала транзистора в металлокерамическом корпусе ($R_t = 60$ °С/Вт) не превысит 1 °С. Соответственно, есть все основания полагать, что верхняя граница рабочего интервала температур будет выше требуемых 100 °С. Основная неясность – можно ли в требуемом интервале температур (от -100 до $+100$ °С) обеспечить не только общую работоспособность, но и сохранение главных характеристик усилительного устройства? Для экспериментальной проверки сформулированных предположений была спроектирована широкополосная усилительная ячейка. Ее описание и результаты тестирования приводятся далее.

3. Экспериментальная усилительная ячейка

Принципиальная схема усилительной ячейки показана на рис. 1. Двухкаскадная схема позволяет получать приемлемый для практики коэффициент усиления G порядка 20 дБ. Структура согласующих цепей оптимизирована для полосы $1 \div 4$ ГГц с целью выяснения величины искажений частотной характеристики при термотестах. Если в конкретных приложениях требуется более узкая полоса, это обеспечивается настройкой межкаскадной цепи L4 – L6, С6. Структура входной и выходной согласующих цепей соответствует рекомен-

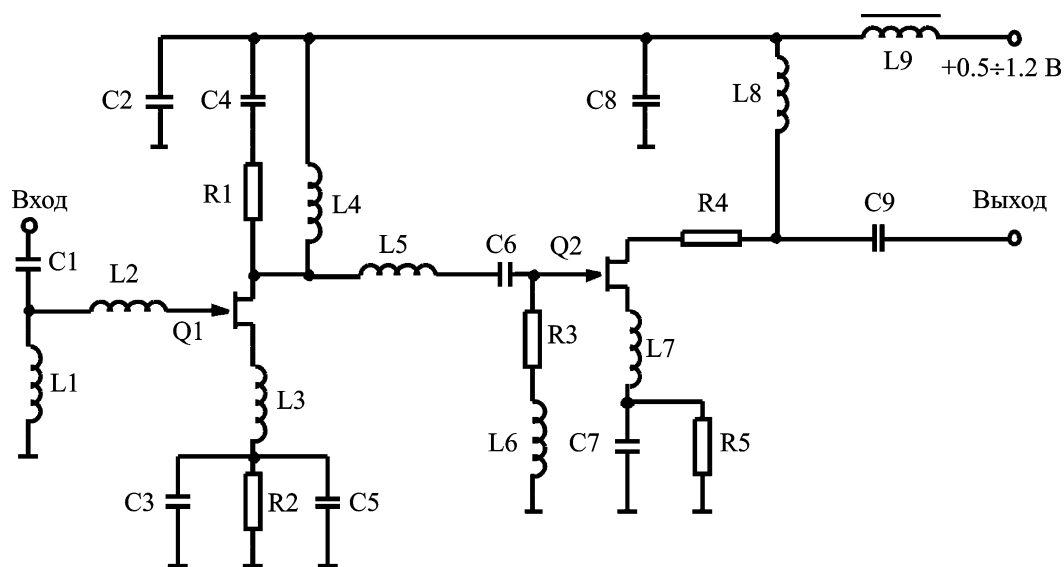


Рис. 1. Упрощенная принципиальная схема усилительной ячейки. Элементы L3, L7 – выводы истоков транзисторов

дациям производителя транзисторов и в целом традиционна для устройств подобного рода [7]. При расчете и моделировании использовались справочные значения S -параметров и элементов эквивалентной схемы транзисторов, за исключением сопротивления сток–исток.

Величина активной части выходного импеданса принималась равной сопротивлению сток–исток, измеренному на постоянном токе в актуальном режиме смещения/питания. Необходимость этого вызвана следующим.

В целях повышения экономичности в усилителе применены относительно узкозатворные (200 мкм) транзисторы. Дополнительное повышение экономичности достигается использованием транзисторов в режиме, близком к ненасыщенному [8], при напряжении сток–исток менее 1 В. S -матрица транзисторов в этом режиме изготовителем не паспортизируется. Однако из всех элементов S -матрицы к изменению режима наиболее чувствительны коэффициент прямой передачи по выходу (S_{21}) и комплексный коэффициент отражения по выходу (S_{22}), или нормированный выходной импеданс. Для расчета выходной согласующей цепи важно знать действительную часть этого импеданса (реактивная компонента меняется слабо), поэтому она измерялась специально.

Приоритетный вопрос при конструировании усилителей на узкозатворных транзисторах – обеспечение устойчивости, так как инвариантный коэффициент устойчивости этих приборов превы-

шает единицу только на частотах выше 4 ÷ 6 ГГц. Собственно, они и оптимизированы для частот порядка 10 ГГц, а 1 ÷ 4 ГГц – зона условной устойчивости. Значительная часть диссипативных элементов принципиальной схемы (R1, R3, R4 на рис. 1) предназначена как раз для обеспечения устойчивости. Поддержанию устойчивости к внеполосному возбуждению способствует ненасыщенный режим постоянного тока [9].

Стабилизация рабочей точки осуществляется автосмещением (R2, R5 на рис. 1). Рекомендуемые производителем транзисторов активные схемы стабилизации непригодны, т. к. требуют использования кремниевых микросхем, при $\pm 100^\circ\text{C}$ неработоспособных. В работе [10] для перехода в режим охлаждения (-196°C и ниже) в усилитель был введен переключатель напряжения питания, неприемлемый в автономных приборах. В настоящем случае граница низких температур выше (-100°C), и мы ограничились автосмещением.

Конструктивно усилитель выполнен на подложке размером 10 × 20 мм (материал ФДМ-2-0,25, стеклотекстолит). Пассивные элементы – SMD типоразмера 0603. Уточним, что спецификации производителей всех пассивных и активных элементов на требуемый интервал температур (от -100 до $+100^\circ\text{C}$) не распространяются и механическая стойкость комплектующих изделий не гарантируется. В процессе предварительных тестов нами выполнялись испытания элементов на стойкость

к быстрому термоциклированию: каждый отобранный компонент погружался в жидкий азот ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$) и отогревался в течение 1 мин 20 раз подряд (20 циклов). Для всех тестируемых транзисторов (лоты по 20 экземпляров: AVAGO ATF36077, ATF35143, NE3210S01, FHC40LG) отказов отмечено не было. Отобран ATF36077 как не имеющий изменений тока утечки затвора (признака деградации).

4. Результаты измерений

На рис. 2 показана амплитудно-частотная характеристика усилителя. Легко видеть, что усилитель можно питать напряжением $1 \pm 0.15\text{ В}$ без какой-либо дополнительной стабилизации. Из графиков рис. 3 следует, что температурные вариации коэффициента усиления не превышают $0.015\text{ дБ}/^{\circ}\text{C}$ и вполне удовлетворяют требованиям к стабильности усилителей систем связи. Отметим, что РНЕМТ как таковому свойственна стабильность порядка $0.03\text{ (дБ}/^{\circ}\text{C})/\text{дБ}$. Повышенная стабильность в нашем случае есть результат действия автосмещения и местных обратных связей (L3, L7 на рис. 1).

Измеренное значение шумовой температуры усилителя во всем диапазоне рабочих частот при напряжении питания более 0.7 В не превышает 20 К при $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 100 К при $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Коэффициент стоячей волны по входу/выходу – в пределах $2.5/1.5$. Динамический параметр $P_{1\text{дБ}}$ – не хуже 0 дБм (напряжение питания $U_c > 0.7\text{ В}$). Потребляемая мощность при вариациях напряжения питания в пределах $0.5 \div 1.15\text{ В}$ составляет $3 \div 20\text{ мВт}$.

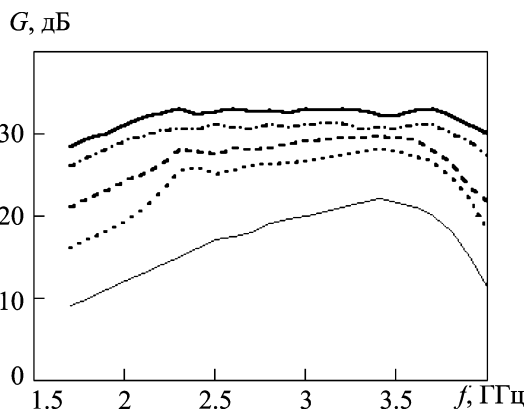


Рис. 2. Измеренная амплитудно-частотная характеристика усилителя при следующих напряжениях питания: сплошная линия – 1.15 В , штрих-пунктирная – 1 В , штриховая – 0.85 В , пунктирная – 0.7 В , тонкая сплошная – 0.5 В . Потребляемый ток находится в пределах $5 \div 15\text{ мА}$

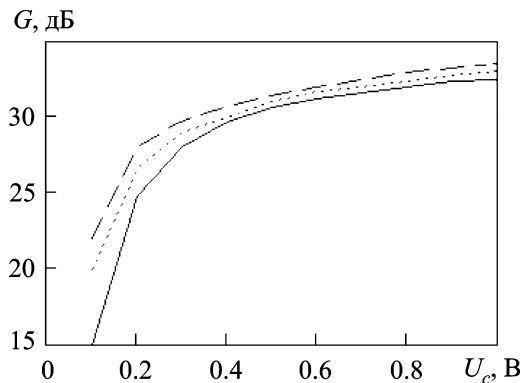


Рис. 3. Измеренная зависимость коэффициента усиления G от напряжения питания U_c для трех значений окружающей температуры: штриховая, пунктирная и сплошная линии соответствуют температурам $-100, 0$ и $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$

Все измеренные характеристики позволяют классифицировать усилитель как маломощный, высокоэкономичный, с высокой температурной стабильностью электрических характеристик.

5. Выводы

В настоящей работе предложено использовать псевдоморфные гетероструктурные полевые GaAs транзисторы как активные элементы высокоэкономичных особо термостойких усилителей. Экспериментальное усилительное устройство на диапазон $1 \div 4\text{ ГГц}$ функционирует в интервале температур от -100 до $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ с сохранением основных электрических характеристик. Представляется обоснованным вывод о перспективности использования GaAs РНЕМТ во входных узлах приемной техники, работающей в экстремальных эксплуатационных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Майская В. Элементная база электроники // Электроника: НТБ. – 2006. – № 5. – С. 1–27.
2. Шахнович И. Твердотельные СВЧ приборы и технологии. Состояние и перспективы // Электроника: НТБ. – 2005. – № 5. – С. 58–64.
3. Лебедев А., Сбруев С. SiC электроника. Прошлое, настоящее, будущее // Электроника: НТБ. – 2006. – № 5. – С. 28–41.
4. Neudeck P. G., Garverick S. L., Stry D. J., Chen Liang-Yu, Beheim G. M., Krasovski M. J., and Mehregany M. Extreme temperature 6H-SiC JFET integrated circuit technology // Phys. Status Solidi A. – 2009. – Vol. 206, No. 10. – P. 2329–2345.
5. Chao Liu, Yanbo Li, and Yiping Zeng. Progress in Antimonide Based III – V Compound Semiconductors and Devices // Engineering. – 2010. – No. 2. – P. 617–624.

6. Bautista J. J. HEMT low-noise amplifiers. In: Macgregor S. Reid editor. Low-noise systems in the deep space network. – Pasadena, CA: Jet propulsion laboratory, California institute of technology, 2008. – 389 p.
7. Agilent Technologies Products Technical Data. High Intercept Low Noise Amplifiers for 1500 MHz through 2500 MHz using the ATF-34143 Low Noise PHEMT. – Application Note 1175. – 2002. – P. 1–7. Available from: www.semiconductor.agilent.com
8. Korolev A. M., Shulga V. M., and Shnyrcov V. I. Radio-frequency ultra-low DC power consumption HEMT amplifier for quantum measurements at mK-temperature range // Rev. Sci. Instrum. – 2011. – Vol. 82, No. 1. – P. 1145–1146.
9. Королев А. М., Шульга В. М. Ненасыщенный режим как альтернативный метод обеспечения устойчивости малошумящих усилителей на полевых транзисторных гетероструктурах // Радиофизика и радиоастрономия. – 2011. – Т. 16, No. 4. – С. 433–439.
10. Королев А. М. Усилитель промежуточной частоты супергетеродинного радиоастрономического приемника // Приборы и техника эксперимента. – 2011. – № 1. – С. 88–90.

О. М. Корольов

Радиоастрономічний інститут НАН України,
вул. Червонопрапорна, 4, м. Харків, 61002, Україна

ГЕТЕРОСТРУКТУРНІ ПОЛЬОВІ ТРАНЗИСТОРИ ЯК
АКТИВНІ ЕЛЕМЕНТИ ПРИЙМАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ
ДЛЯ ОСОБЛИВО ЖОРСТКИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Запропоновано використовувати псевдоморфні польові транзистори з високою рухливістю електронів (PHEMT)

як активні елементи високоекономічних мікрохвильових ($1 \div 4$ ГГц) підсилювачів, працюючих у широкому інтервалі оточуючих температур. Експериментальний підсилювач функціонує в інтервалі температур від -100 до $+100$ °С зберігаючи основні електричні характеристики. Видається обґрунтованим висновок про перспективність використання GaAs PHEMT у приймачах, що працюють в безперервному режимі за екстремальних навколишніх умов.

A. M. Korolev

Institute of Radio Astronomy,
National Academy of Sciences of Ukraine,
4, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine

PHEMTS AS CIRCUIT ELEMENTS
FOR LOW-POWER-CONSUMPTION
RECEIVERS/AMPLIFIERS OPERATING
IN A WIDE TEMPERATURE RANGE ENVIRONMENT

The PHEMTs are proposed to be used as circuit elements for low-power-consumption microwave ($1-4$ GHz) amplifiers operating in a wide temperature range environment. Experimental amplifier operates within temperatures -100 to $+100$ °C preserving the general electrical properties. It seems reasonable to conclude prospects of using GaAs PHEMTs in the stand-by receivers operating in extreme environment conditions.

Стаття поступила в редакцію 18.12.2013