

# Создание низкотемпературных аналоговых ИС для обработки импульсных сигналов датчиков

## Часть 1

Олег Дворников, Владимир Чеховский,  
Валентин Дятлов (г. Минск, Беларусь),  
Николай Прокопенко (г. Шахты, Ростовская обл.)

В статье приведены основные параметры интегральных схем, которые улучшаются при снижении температуры, и области применения низкотемпературных микросхем. Основное внимание уделено выбору конструктивно-технологического базиса аналоговых криогенных микросхем и минимизации отрицательных эффектов, возникающих при низких температурах.

### ВВЕДЕНИЕ

Большинство серийно выпускаемых ИС обеспечивает требуемый уровень параметров в диапазоне температур  $-40...+85^{\circ}\text{C}$ , хотя существуют микросхемы, способные работать в расширенном диапазоне температур  $-60...+125^{\circ}\text{C}$ .

При снижении рабочей температуры некоторые параметры ИС улучшаются, а именно, увеличивается:

- быстродействие КМОП-вентилей – из-за увеличения подвижности основных носителей заряда и, следовательно, крутизны КМОП-транзисторов, снижения барьерных ёмкостей р-п-переходов, уменьшения допустимого перепада логических уровней, обусловленного более резкой передаточной характеристикой [1, 2];
- полоса пропускания аналоговых КМОП-схем – благодаря повыше-

нию крутизны КМОП-транзисторов и уменьшению ёмкостей р-п-переходов;

- отношение сигнал/шум – благодаря уменьшению теплового шума и фликкер-шума [3];
- точность преобразования – в том числе, из-за уменьшения падения напряжения на паразитных сопротивлениях полупроводниковых областей и межсоединений и уменьшения температурных градиентов на кристалле [4, 5];
- надёжность – из-за экспоненциальной зависимости интенсивности отказов от температуры, а также уменьшения обратных токов, утечек и эффекта защёлкивания [2];
- эффективность работы мощных усилителей и источников питания.

При низких температурах возникают и отрицательные эффекты, главны-

ми из которых являются значительное снижение усиления биполярных транзисторов (БТ) [6] и появление изгиба выходных вольтамперных характеристик (ВАХ) МДП-транзисторов (так называемый эффект «плавающего тела» (kink effect) [7]). Тем не менее, актуальность создания ИС для криогенных температур сохраняется, благодаря постоянно расширяющейся области их применения (см. таблицу 1). Потребность рынка в низкотемпературной радиоэлектронной аппаратуре стимулирует разработку новых технологических маршрутов (техмаршрутов), материалов и транзисторных структур, которые не отражены в таблице 1.

Создание криогенных микросхем крайне важно для космических применений. Это обусловлено тем, что температура вблизи и на поверхности большинства планет Солнечной системы и Луны ниже  $-60^{\circ}\text{C}$  (см. таблицу 2), а использование нагревателей на основе радиоактивных материалов, из-за необходимости применения экранов, защищающих электронику от воздействия проникающей радиации, существенно увеличивает массу и габариты космических аппаратов.

Таблица 1. Области применения низкотемпературной электроники [4, 5, 8]

Область применения	Преимущество	Режим работы	Применяемая технология	Типичная частотная область	Типичная температура, К
Обработка сигналов матриц ИК-датчиков	Близкое расположение от источников сигналов	Аналоговый / цифровой	Si КМОП	От звуковых частот до нескольких МГц	4...200
ОУ и мультиплексоры общего применения	Близкое расположение от источников сигналов	Аналоговый / цифровой	Si КМОП	Звуковые частоты	2...77
Измерительные приборы и анализаторы сигналов	Высокое быстродействие, высокая рабочая частота	Аналоговый/цифровой	ИС на эффекте Джозефсона	СВЧ	4
Приёмники для радиоастрономии и космической связи	Низкий шум	Аналоговый	GaAs МДП, GaAs/AlGaAs МДП, SiGe	СВЧ	20
Предварительные усилители для датчиков магнитного резонанса и детекторов частиц	Близкое расположение от источников сигналов, низкий шум	Аналоговый	GaAs МДП	ВЧ/СВЧ	4...77
Мощные усилители и преобразователи	Улучшенная эффективность	Аналоговый	Полупроводниковая	От постоянного тока до СВЧ	77
Магнитометры	Высокая чувствительность	Аналоговый	Приборы на эффекте Джозефсона	ВЧ	4
Предварительные усилители для ИК-датчиков	Близкое расположение от ИК-датчиков, низкий шум	Аналоговый	Si ПТП/КМОП	Звуковые частоты	4...77
Обработка сигналов радаров, связь, спектральный анализ	Широкая полоса пропускания	Аналоговый	Si КМОП, SiGe	СВЧ	4 К

Примечания: ИК – инфракрасный, МДП – транзистор со структурой металл-диэлектрик-полупроводник, ПТП – полевой транзистор с р-п-переходом, Si – кремний, SiGe – кремний-германий, GaAs – арсенид галлия, AlGaAs – арсенид алюминия-галлия, ВЧ (СВЧ) – высокая (сверхвысокая) частота

Необходимость проектирования низкотемпературной электроники для космических применений подтверждается рядом примеров.

Так, в Основах государственной политики РФ в области космической деятельности на период до 2030 года и дальнейшую перспективу, установлено, что в государственные интересы РФ в области космической деятельности входит получение научных данных о космосе, Земле и других небесных телах, в том числе исследование Луны, Марса, других тел Солнечной системы. Поэтому одной из главных целей в области космической деятельности является создание научно-технического и технологического потенциалов в целях обеспечения готовности и реализации масштабных космических проектов по углублённому изучению Вселенной и Солнечной системы (в первую очередь, окололунного пространства, Луны и Марса).

По словам главы НПО им. С.А. Лавочкина Виктора Хартова в список из семи критических технологий, лежащих в основе планируемых к реализации программ изучения поверхности Луны

и Марса, входят «технологии высокоточной и безопасной посадки, технологии глубинного (не менее 2 метров) забора грунта, технологии робототехнических средств стыковки и захвата орбитальных объектов в автоматическом режиме, высоко- и низкотемпературная электроника».

Проблемам низкотемпературной электроники уделяют большое внимание специалисты как в США [8], так и в Европе [9]. Исследования проводятся по следующим основным направлениям:

- применение новых материалов (Ge, SiGe, GaAs, InGaAs/InAlAs, GaN/AlGaN), техмаршрутов, модернизация транзисторов для работы при температуре жидкого азота и жидкого гелия, в том числе, кремниевых полевых транзисторов с р-n-переходом (ПТП) [3, 9, 10], БТ [11, 12] и МДП-транзисторов [10, 13], Ge ПТ [14], GaAs ПТП [15, 16], кремний-германиевых биполярных гетеротранзисторов (SiGe HBT) [17–19];
- создание новых средств измерений, моделирования и проектирования низкотемпературных ИС; уточнение Spice-моделей кремниевых инте-

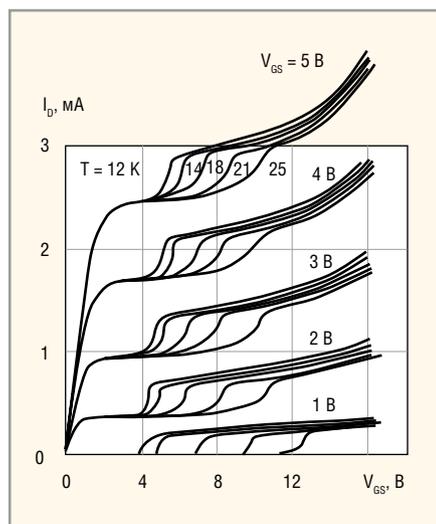
**Таблица 2. Средняя температура на космических аппаратах около разных планет [8]**

Наименование планеты	Средняя температура	
	К	°С
Марс	226	–47
Марс (поверхность)	153...293	–120...20
Луна (полюса)	38	–235
Юпитер	122	–151
Сатурн	90	–183
Уран	64	–209
Нептун	51	–222
Плутон	44	–229

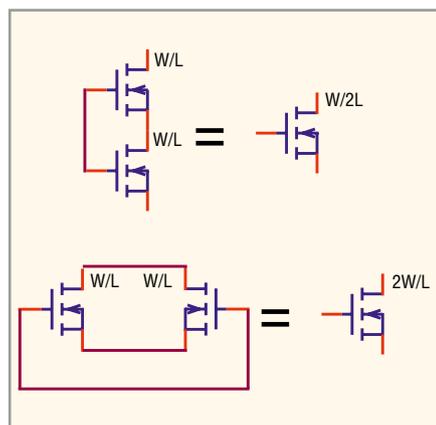
гральных элементов для температур ниже 40 К [14, 20];

- исследование параметров серийно выпускаемых ИС и электрорадиоэлементов (резисторов, конденсаторов, индуктивностей) при низких температурах [17, 21].

Криогенные аналоговые микросхемы широко применяются в приборах ядерной электроники для регистрации сверхмалых сигналов различных детекторов частиц, ионизирующих и оптических излучений. При этом, чаще всего, в качестве входного малошумящего транзистора используется охлаждаемый кремниевый ПТП [22–24].



**Рис. 1.** Зависимость тока стока ( $I_D$ ) от напряжения сток–исток ( $V_{GS}$ ) для транзисторов п-МОП с отношением ширины затвора ( $W$ ) к его длине ( $L$ ), равной 50/10 мкм, при разных напряжениях затвор–исток ( $V_{GS}$ ) и температурах ( $T$ ) [20]



**Рис. 2.** Схемы включения КМОП-транзисторов для масштабирования их параметров

**Таблица 3.** Параметры активных элементов, изготовленных по техмаршруту Ni-CMOS II с длиной затвора, равной 2 мкм, в диапазоне температур [26]

Тип структуры	Параметр	Тип канала	Температура, К		
			300	77	4,2
Рабочая	Пороговое напряжение, В	n	0,59	1,04	1,08
		p	-0,74	-1,20	-1,43
	Крутизна (относительная)	n	1,0	1,6	1,6
		p	1,0	1,4	1,4
Паразитная	Пороговое напряжение, В	n	39,4	53,4	41,8
		p	-35,8	-44,2	-45,9

**Таблица 4.** Параметры пассивных элементов, изготовленных по техмаршруту Ni-CMOS II с длиной затвора, равной 2 мкм, в диапазоне температур [26]

Параметр	Тип структуры	Температура, К		
		300	77	4,2
Сопротивление	n+ исток	1	0,76	0,72
	Поликристаллический кремний	1	0,89	0,88
	Алюминий	1	0,14	0,05
	p-карман	1	0,30	>10 <sup>5</sup>
Ёмкость	p-n-переход	1	0,7...0,8	-
Усиление по току	Биполярный транзистор	1	0,017	0,0017
Ток защёлкивания (относительный)	Паразитный тиристор	1	>1000	>1000

Низкотемпературная электроника также применяется в научном приборостроении, в измерительных и медицинских приборах, в приборах для исследований Арктики и Антарктики.

Целью предлагаемого обзора является изучение и систематизация возможностей и особенностей проектирования низкотемпературных аналоговых интегральных схем для обработки импульсных сигналов датчиков.

### ВЫБОР КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО БАЗИСА АНАЛогоВЫХ КРИОГЕННЫХ МИКРОСХЕМ

Известно, что низкотемпературные аналоговые ИС могут быть реализованы как на биполярных, так и полевых транзисторах, однако при выборе конструктивно-технологического базиса аналоговых криогенных микросхем необходимо учитывать ряд особенностей.

1. МОП-техмаршруты наиболее часто применяются при создании цифровых и аналого-цифровых ИС. При уменьшении температуры большинство параметров МОП-элементов улучшается (см. таблицы 3 и 4), но возрастает пороговое напряжение и появляется изгиб выходной ВАХ в схеме с общим истоком (см. рис. 1). В транзисторах р-МОП изгиб ВАХ менее заметен, чем в п-МОП, и может быть минимизирован при правильном смещении n-кармана [25].

Известно, что прецизионные аналоговые микросхемы не следует создавать на КМОП-транзисторах [27]. Если

же КМОП-техмаршрут применяется для изготовления сложно функциональных низкотемпературных микросхем, содержащих аналоговые компоненты, при проектировании рекомендуется учитывать следующее [20]:

- при схемотехническом моделировании не допускается применение Spice-параметров моделей, предоставляемых изготовителями микросхем, так как обычно эти параметры не предназначены для описания характеристик интегральных элементов при криогенных температурах. Следует предварительно измерить параметры КМОП-транзисторов нескольких конструкций («базовых» транзисторов) при требуемой температуре и идентифицировать их Spice-параметры;
- масштабирование ВАХ КМОП-транзисторов необходимо осуществлять не изменением отношения ширины канала  $W$  к длине  $L$ , а последовательно-параллельным соединением «базовых» транзисторов одной и той же конструкции (см. рис. 2);
- существующий технологический разброс параметров полупроводниковых слоёв приводит к увеличению в 2–3 раза разброса ВАХ КМОП-транзисторов при криогенных температурах (см. рис. 3), поэтому необходимо применение специальных топологий транзисторов для согласования их параметров;
- для увеличения коэффициента усиления напряжения и уменьшения уровня шума, приведённого ко входу, часто используют подпороговый режим работы (режим слабой инверсии) КМОП-транзисторов. Область насыщения ВАХ (высокого выходного малосигнального сопротивления) в режиме слабой инверсии описывается соотношением [28]:

$$I_{Dw} = I_{Dow} \exp \left( \frac{V_{GS} - V_{TH}}{N_w \phi_T} \right), \quad (1)$$

где  $I_{Dw}$  – ток стока в подпороговой области ВАХ,  $V_{GS}$  – напряжение затвор–исток,  $I_{Dow}$  – ток стока при  $V_{GS} = V_{TH}$ ,  $V_{TH}$  – пороговое напряжение МДП-транзисторов (напряжение отсечки ПТП),  $\phi_T = kT/q$  – температурный потенциал,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура,  $q$  – заряд электрона,  $N_w$  – фактор, характеризующий отклонение ВАХ в подпороговой области от экспоненты, обычно  $N_w = 1...2$ .

Для нормальных условий (300 К) температурный потенциал составляет около 26 мВ, а при температуре жидкого

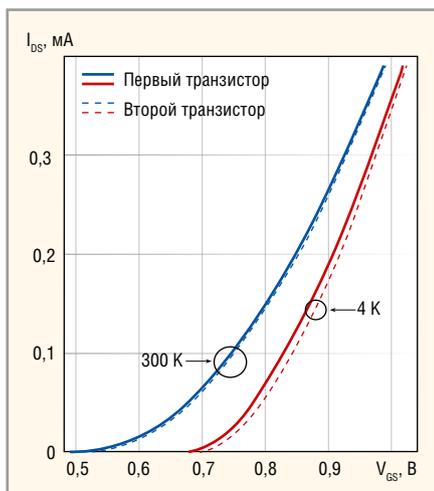


Рис. 3. Типовое различие передаточных характеристик двух рядом расположенных МОП-транзисторов при разных температурах [20]

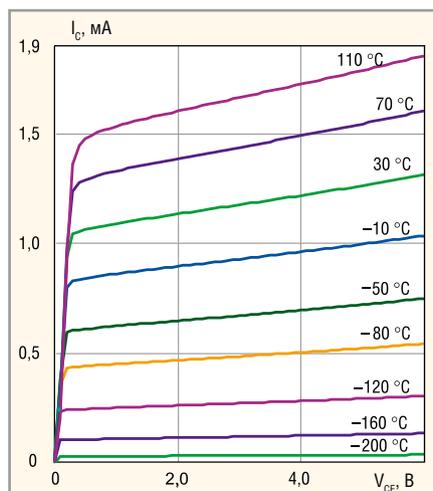


Рис. 4. Зависимость коллекторного тока ( $I_C$ ) вертикального p-р-п-транзистора от напряжения коллектор–эмиттер ( $V_{CE}$ ) при токе базы  $I_B = 8$  мкА и разных температурах

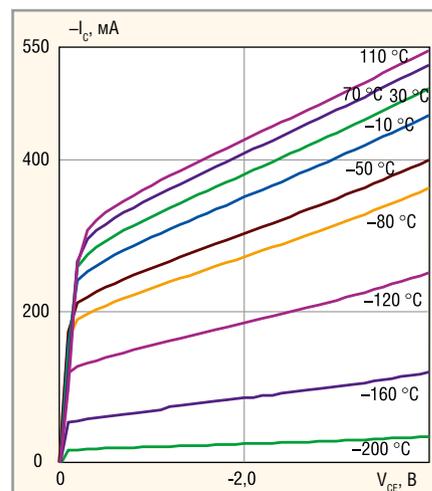


Рис. 5. Зависимость тока коллектора ( $I_C$ ) горизонтального p-р-п-транзистора от напряжения коллектор–эмиттер ( $V_{CE}$ ) при токе базы  $I_B = -8$  мкА и разных температурах

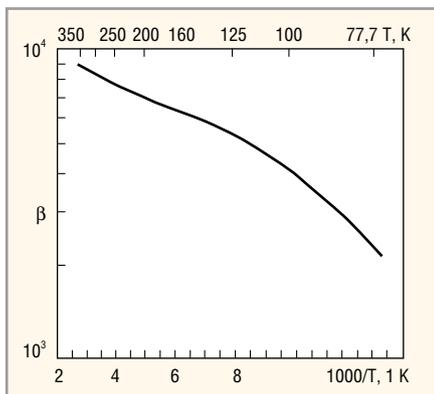


Рис. 6. Зависимость коэффициента передачи тока  $\beta$  от температуры для модернизированного БТ [11, 12]

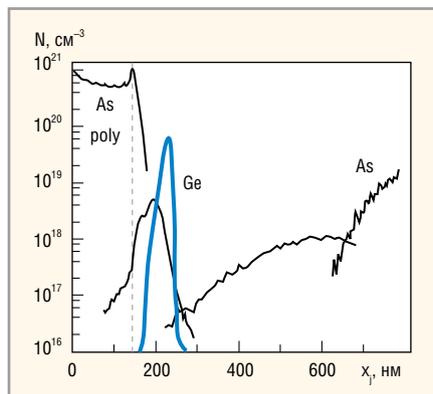


Рис. 7. Типовой профиль распределения примеси (зависимость концентрации  $N$  от глубины залегания  $x$ ) в SiGe HBT

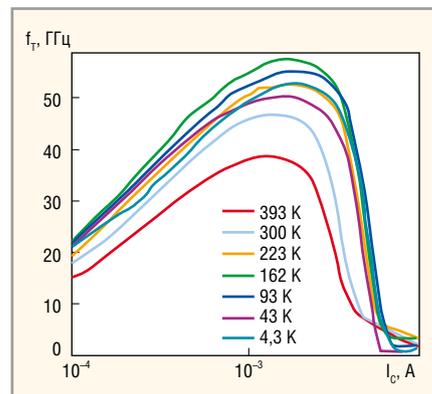


Рис. 8. Зависимость граничной частоты ( $f_T$ ) от тока коллектора ( $I_C$ ) при разной температуре для SiGe HBT

азота – 6,3 мВ. Поэтому технологический разброс значения порогового напряжения приведёт к значительному разбросу токов стока, и применение режима слабой инверсии в низкотемпературных аналоговых ИС не рекомендуется.

Необходимо учитывать, что со снижением температуры уменьшается область напряжения исток–сток, в которой МДП-транзистор обладает высоким выходным сопротивлением. Это, с одной стороны, обусловлено ростом порогового напряжения при низких температурах, а с другой стороны – малым напряжением пробоя промежутка сток–исток транзисторов с коротким каналом.

Тепловой шум КМОП-транзисторов уменьшается с температурой, однако фликкер-шум при криогенных температурах может и уменьшаться, и возрастать, в зависимости от особенностей конкретного технологического маршрута.

2. Усиление БТ значительно уменьшается при температуре жидкого азота, что иллюстрируют результаты измерений ВАХ в схеме с общим эмиттером (ОЭ) (см. рис. 4 и 5) для транзисторов базового матричного кристалла АБМК-1.3 [29]. Для увеличения коэффициента усиления БТ в схеме с общим эмиттером ( $\beta$ ) в некоторых работах [11, 12] выполнена оптимизация транзисторной структуры, а именно, эмиттерная область сформирована из поликристаллического кремния и использованы слабелегированные базовая и коллекторная области, что позволило существенно повысить усиление БТ при температуре жидкого азота (см. рис. 6).

К сожалению, такие БТ обладают невысоким быстродействием, плохой радиационной стойкостью, малым напряжением Эрли (низким выходным малосигнальным сопротивлением) и чрезвычайно высоким напряжением коллектор–эмиттер при насыщении ( $V_{CES}$ ). Например,  $V_{CES} = 3,5$  В при

$I_B = 0,5$  мкА и  $T = 300$  К. При низких температурах ( $T = 78$  К)  $V_{CES}$  уменьшается до 0,5 В, но такие БТ нельзя применять в широком диапазоне температур и, следовательно, в космической электронике.

По мнению некоторых специалистов, наилучшим решением для синтеза аналоговых низкотемпературных ИС является использование SiGe HBT. При уменьшении температуры в SiGe HBT повышается  $\beta$ , напряжение Эрли, граничная частота ( $f_T$ ), но уменьшается  $\beta$  в режиме малых токов [5, 18, 19]. Кроме того, возможно одновременное формирование на одном кристалле кремний-германиевых биполярных и МДП-транзисторов, что является большим преимуществом при создании аналого-цифровых микросхем.

На рисунках 7–10 приведены профиль распределения примеси в SiGe HBT, сформированном по техмаршруту IBM SiGe 5AM [19], основные статические и частотные параметры в диапазоне температур, которые подтверждают

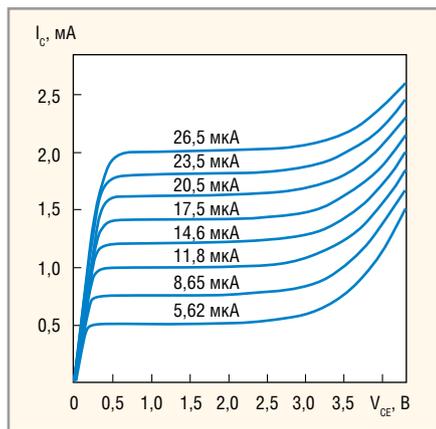


Рис. 9. Выходная ВАХ в схеме с ОЭ при температуре 300 К для SiGe HBT

возможность создания низкотемпературных быстродействующих аналоговых ИС. Однако SiGe HBT не пригодны для синтеза малошумящих усилителей, работающих с высокоимпедансными источниками сигналов.

3. Преимуществом кремниевых ПТП, по сравнению с МДП-транзисторами и GaAs ПТ, является предельно малый уровень шумов на частотах менее 10 кГц [3] при сравнимых с МДП-транзисторами величинах входных токов при криогенных температурах. Крутизна кремниевых ПТП увеличивается при уменьшении температуры до -110...-120°C, а при дальнейшем понижении температуры – уменьшается. Эти особенности ВАХ наблюдаются для ПТП, изготовленных по разным технологическим маршрутам (см. рис. 11 и 12).

Известно, что для ПТП справедливы соотношения [27]:

$$g_M = \frac{dI_D}{dV_{GS}} \approx 2\sqrt{I_D \text{BETA}}, \quad (2)$$

$$\text{BETA} = \frac{4\epsilon\epsilon_0\mu_{CH}W}{3aL}, \quad (3)$$

где  $g_M$  – передаточная проводимость (крутизна),  $I_D$  – ток стока, BETA – коэффициент пропорциональности (удельная крутизна),  $\mu_{CH}$  – подвижность основных носителей заряда в канале,  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника,  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума,  $W, L$  – ширина и длина затвора, соответственно,  $a$  – половина толщины токопроводящей части канала в отсутствие внешнего напряжения.

Сравнение кривых на рисунке 12, относящихся к одному и тому же транзистору при токах стока, отличающихся в 10 раз, показывает, что во всём диапазоне температур отношение крутизны составляет  $\sqrt{10}$ , что согласуется с соот-

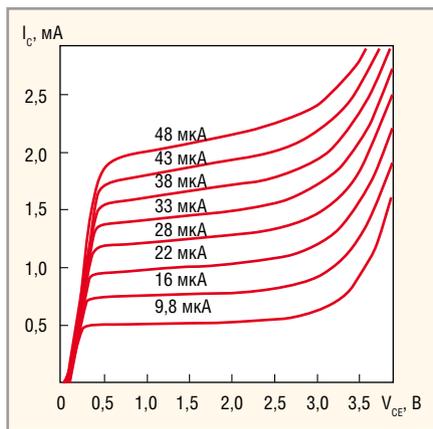


Рис. 10. Выходная ВАХ в схеме с ОЭ при температуре 43 К для SiGe HBT

ношением (2). В то же время, сравнение кривых, относящихся к транзисторам с отличающейся в 10 раз шириной затвора и работающим при одинаковых токах стока, выявило, что крутизна ПТП масштабируется не пропорционально  $\sqrt{W}$ , что объясняется существованием и температурной зависимостью сопротивления полупроводниковой области истока (RS). Так, для схемы с общим истоком

$$g_{MRS} = \frac{g_M}{1 + g_M RS}, \quad (4)$$

где  $g_{MRS}$  – крутизна в схеме с общим истоком с учётом сопротивления истока RS.

Следует отметить, что ПТП обычно применяют в качестве охлаждаемого входного транзистора, так как реализация функционально законченных аналоговых устройств на их основе затруднена.

Продолжение следует.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *El-Ghanam S.M.* Performance of Electronic Switching Circuits Based on Bipolar Power Transistors at Low Temperature. *Cryogenics*. Vol. 51. N3. 2011. P. 117–123.
2. *Hu J.* Low Temperature Effects on CMOS Circuits. [www.users.eecs.northwestern.edu/~jhu304/files/lowtemp.pdf](http://www.users.eecs.northwestern.edu/~jhu304/files/lowtemp.pdf).
3. *Goldberg R.T.* Fabrication and Characterization of Low-Noise Cryogenic Si JFETs. *Proceedings Electrochemical Society PV*. 95-9. P. 428–439.
4. *Kirschman R.K.* Low Temperature Electronics. *Circuits and Devices*. N3. 1990. P. 12–24.
5. *Cressler J.D.* Low-Temperature Electronics. 6th International Planetary Probe Workshop. Atlanta, Georgia. Short Course on Extreme Environments Technologies. 21.06.2008.
6. *Woo J.C.S.* Non-ideal Base Current in Bipolar Transistors at Low Temperatures. *IEEE*

*Transactions on Electron Devices*. Vol. 34. N1. 1987. P. 130–138.

7. *Broadbent S.B.* CMOS Operation Below Freezout. *Proceedings of the Workshop on Low Temperature Semiconductor Electronics*. 1989. P. 43–47.
8. *Patterson R.L.* Assessment of Electronics for Cryogenic Space Exploration Missions. *Cryogenics*. Vol. 46. N2–3. 2006. P. 231–236.
9. *Armandillo E.* Low Temperature Electronics for Space Applications. *Journal de Physique*. Vol. 6. 1996. C3. P. 177–185.
10. *Ardelean J.* Preamplifiers for Room Temperature and Cryogenic Calorimetry Applications Based on DMILL Technology. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. Vol. A376. 1996. P. 217–224.
11. *Woo J.C.S.* Optimization of Silicon Bipolar Transistors for High Current Gain at Low Temperatures. *IEEE Transactions on Electron Devices*. Vol. 35. N8. 1988. P. 1311–1321.
12. *Jayadev T.S.* Bipolar Transistors for Low Noise, Low Temperature Electronics. *Cryogenics*. Vol. 30. N2. 1990. P. 137–140.
13. *Li Y.* The Operation of 0.35  $\mu\text{m}$  Partially Depleted SOI CMOS Technology in Extreme Environments. *Solid-State Electronics*. Vol. 47. N6. 2003. P. 1111–1115.
14. *Goryachev M.* Cryogenic Transistor Measurement and Modeling for Engineering Applications. *Cryogenics*. Vol. 50. N6–7. 2010. P. 381–389.
15. *Battistoni G.* Cryogenic Performance of Monolithic MESFET Preamplifiers for LAR Calorimetry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. Vol. A395. 1997. P. 134–140.
16. *Battistoni G.* Monolithic GaAs Current-Sensitive Cryogenic Preamplifier for Calorimetry Applications. *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)*. Vol. 61B. 1998. P. 511–519.
17. *Buchanan E.D.* Cryogenic Applications of Commercial Electronic Components. *Cryogenics*. Vol. 52. N10. 2012. P. 550–556.
18. *Najafizadeh L.* SiGe BiCMOS Precision Voltage References for Extreme Temperature Range Electronics. *Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting*. 2006. P. 1–4.
19. *Cressler J.D.* Operation of SiGe Bipolar Technology at Cryogenic Temperatures. *Proceedings of the First European Workshop on Low Temperature Electronics*. *J. Phys. IV France* 04 (1994) C6-101-C6-110. [www.dx.doi.org/10.1051/jp4:1994616](http://www.dx.doi.org/10.1051/jp4:1994616).
20. *Ferrari G.* Measurement Currents Below 4K. *Cryogenic Electronics*. Milano. November 22. 2012.
21. *El-Ghanam S.M.* Performance of Electronic Switching Circuits Based on Bipolar Power Transistors at Low Temperature. *Cryogenics*. Vol. 51. N3. 2011. P. 117–123.

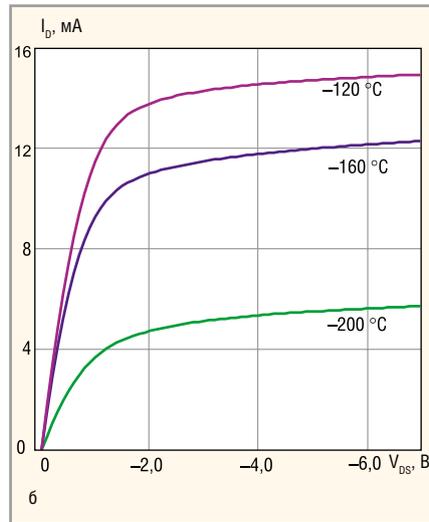
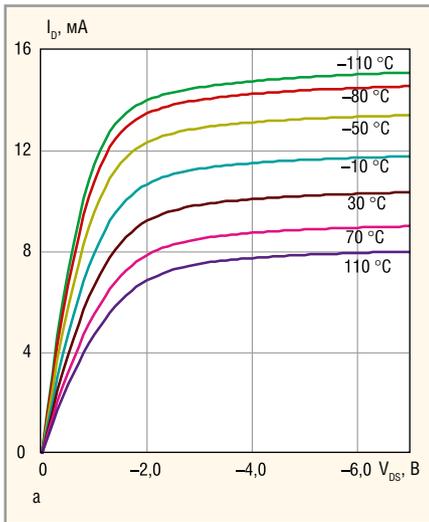


Рис. 11. Зависимость  $I_D$  от  $V_{DS}$  для р-ПТП АБМК-1.3 при  $V_{GS} = 0$  и разных температурах:

а – в диапазоне температур от  $-110$  до  $110$  °С; б – в диапазоне температур от  $-200$  до  $-120$  °С

22. Manfredi P.F. Monolithic JFET Preampfier with Nonresistive Charge Reset. IEEE Transactions on Nuclear Science. Vol. 45. 1998. P. 2257–2260.
23. Charge Sensitive Preampfier. A-250. A New State-of-the-Art. www.amptek.com.
24. A250 Application Notes. (AN250-2, Revision 3). www.amptek.com.
25. Broadbent S.B. CMOS Operation Below Free-

zeout. Proceedings of the Workshop on Low Temperature Semiconductor Electronics. 1989. P. 43–47.

26. Hanamura S. Operation of Bulk CMOS Devices at Very Low Temperatures. IEEE Journal of Solid-State Circuits. Vol. 21. N3. 1986. P. 484–490.
27. Абрамов И.И., Дворников О.В. Проектирование аналоговых микросхем для прецизионных измерительных систем. Минск. 2006.

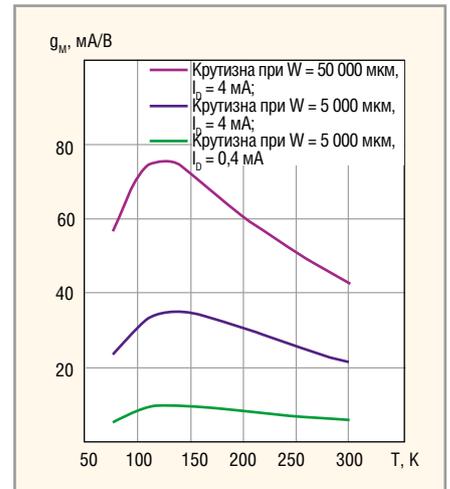


Рис. 12. Температурная зависимость крутизны ( $g_m$ ) р-канальных ПТП с  $L = 1,2$  мкм, сформированных по техмаршруту DMILL [10]

28. Дворников О.В. Проектирование аналоговых микросхем на МОП-транзисторах. Часть 1: Малосигнальная модель МОП-транзистора с источниками шумов. Электронные компоненты. № 8. 2009. С. 52–55.
29. Прокопенко Н.Н. Элементная база радиационно-стойких информационно-измерительных систем. Шахты: ФГБОУ ВПО «ЮРГУЭС». 2011.

