

ПРОЕКТУВАННЯ І МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СЕНСОРІВ

SENSORS DESIGN AND MATHEMATICAL MODELING

УДК 681.586, 537.32;
PACS 71.30.+H, 73.20.FZ

ПАРАМЕТРЫ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ СХЕМ СЧИТЫВАНИЯ ИК-ФПУ

*Ф. Ф. Сизов, В. С. Тыжневый, В. П. Рева**

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины, пр. Науки 41, Киев,
03028, e-mail: sizov@isp.kiev.ua

*Институт микроприборов НАН Украины, ул. Северно-Сырецкая 3, Киев, 04136

Аннотация

ПАРАМЕТРЫ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ СХЕМ СЧИТЫВАНИЯ ИК-ФПУ

Ф. Ф. Сизов, В. С. Тыжневый, В. П. Рева

Исследованы вольтамперные характеристики МОП-транзисторов при $T = 300$ К и $T = 77$ К. Проведен анализ и сравнение различных методик определения порогового напряжения МОП-транзисторов при комнатной и криогенной температурах, а также вычислены подвижность и коэффициент уменьшения подвижности носителей заряда. Промоделировано функционирование транзисторов в рамках программы PSPICE для $T = 300$ К и $T = 77$ К и проведено сравнение результатов моделирования с экспериментом. Полученные данные позволяют моделировать основные элементы схем считывания при $T = 77$ К.

Ключевые слова: МОП-транзистор, пороговое напряжение, подвижность, схемы считывания.

Анотація

ПАРАМЕТРИ ТА МОДЕЛЮВАННЯ МОН-ТРАНЗИСТОРІВ СХЕМ ЗЧИТУВАННЯ ІЧ-ФПП

Ф. Ф. Сизов, В. С. Тыжневый, В. П. Рева

Були досліджені вольтамперні характеристики МОН-транзисторів при $T = 300$ К та $T = 77$ К. Проведено аналіз та порівняння різних методик визначення порогової напруги МОН-транзисторів при кімнатній та криогенних температурах, а також обчислені рухливість та коефіцієнт зменшення рухливості носіїв заряду. Промодельовано функціонування транзисторів у рамках програми PSPICE для $T = 300$ К та $T = 77$ К та проведено порівняння результатів моделювання з експериментом. Отримані данні дозволяють моделювати основні елементи схем зчитування при $T = 77$ К.

Ключові слова: МОН-транзистор, порогова напруга, рухливість, схеми зчитування.

Abstract**PARAMETERS AND MODELING OF MOSFETS OF IR-FPA READOUTS***F. F. Sizov, V. S. Tizhnevyy, V. P. Reva*

Current-voltage characteristics of MOSFETs at $T = 300$ K and $T = 77$ K were investigated. Analysis and comparison of different methods of extraction MOSFET threshold voltage at room and cryogenic temperature was performed, carriers mobility and mobility attenuation factor were calculated. Operation of MOSFETs was simulated by PSPICE program at $T = 300$ K and $T = 77$ K, and comparison of the results of modeling with experimental results was performed. Extracted data allow to model basic elements of readouts at $T = 77$ K.

Keywords: MOSFET, threshold voltage, mobility, readouts IC.

1. Введение

Среди фотоприемных устройств (ФПУ) инфракрасного (ИК) диапазона спектра, используемых для получения изображений в реальном масштабе времени, имеется достаточно большое число материалов, из которых может быть изготовлена их фоточувствительная часть — линейки или матрицы фотоприемников. Среди них наибольшее распространение в системах технического видения с предельными характеристиками имеют ФПУ на основе узкощелевых твердых растворов кадмий-ртуть-теллур (КРТ) (см., напр., [1,2]). Такие многоэлементные ФПУ, дающие возможность получать изображения в ИК области спектра в реальном масштабе времени, могут функционировать лишь при наличии устройств считывания — специальных больших интегральных схем, с помощью которых осуществляется обработка электрических сигналов от фоточувствительных ячеек приемников излучения.

Первые такие устройства считывания для многорядных линейчатых ФПУ с временной задержкой и накоплением (ВЗН) для приемников излучения ИК области спектра $\lambda = 8 - 12$ мкм были реализованы в начале 1990-х годов на основе кремниевых интегральных схем, включающих приборы с зарядовой связью (ПЗС) [2,3]. В настоящее же время для схем считывания приемников излучения и для других участков ИК спектра ФПУ второго и третьего поколений (крупноформатные двуцветные или многоцветные матрицы) основной технологией для больших интегральных схем считывания является кремниевая КМОП (комплементарный металл-окисел-полупроводник) технология. Эта технология, имеющая заметно большие возможности в реализации функций

управления ФПУ по сравнению с ПЗС технологиями, позволяет реализовать все необходимые функции обработки информации и обеспечить работу ФПУ в фокальной плоскости при криогенных температурах. КМОП технологии могут быть универсальным средством для современных ФПУ на основе КРТ и, практически, любого типа приемников излучения, функционирующих как при температуре окружающей среды, так и при криогенных температурах ($T < 100$ K).

Одной из важнейших стадий в производстве схем считывания является их проектирование, которое при разработке новых схемотехнических решений обычно составляет большую часть времени производства схемы считывания. Однако, одной из основных проблем проектирования схем считывания для криогенных ФПУ является корректный учет характеристик транзисторов и пассивных элементов схем для оптимального их функционирования при криогенных температурах.

Существующие программные продукты (напр., Cadence, Mentor graphics) позволяют проектировать интегральные схемы, работающие в области $T \sim 300$ K и больше, но они не дают возможности смоделировать работу схем считывания, например, при температуре жидкого азота, при которой эксплуатируются ФПУ с предельными характеристиками, так как температурные параметры моделей МДП транзисторов не обеспечивают нужной точности и зачастую не работают из-за несходимости параметров моделей даже при температурах порядка $T \sim -60^\circ\text{C}$. Моделирование работы схем считывания при криогенных температурах возможно при подстановке в модели МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) транзис-

торов, параметров, определенных при данной температуре. Построение модели для области температур $T \sim 77$ К требует определения характеристик транзисторов, подобных тем, которые используются в моделях при комнатной температуре.

Исследования разработанных ранее схем считывания [4,5] с использованием вышеуказанных программных продуктов с параметрами транзисторов приводимых лишь для температур вблизи комнатной температуры, показали, что при охлаждении интегральных схем считывания до температуры $T = 77$ К наибольшее значение для полевых транзисторов таких схем имеют два эффекта:

1) повышение значения порогового напряжения при охлаждении полевого транзистора, которое зависит от изменения уровня Ферми полупроводника;

2) значительное возрастание величины подвижности носителей при низких температурах, зависящее от усредненного пути пробега между фоновыми взаимодействиями.

Поэтому целью данной работы являлось: сравнение разных методов получения величины порогового напряжения (V_{th}), установление их различия при комнатной температуре и температуре жидкого азота; установление таких основных параметров, важных для проектирования транзисторов, как подвижности носителей при $T = 300$ К и $T = 77$ К и коэффициент уменьшения подвижности θ .

2. Эксперимент

Определение V_{th} возможно двумя способами: как физического, так и электрического параметра модели [6]. В первом случае V_{th} — это напряжение, при котором возникает сильная инверсия, оно зависит от потенциала плоских зон, потенциала Ферми, обратного смещения, подающегося на подложку, а также размеров полевого транзистора. Во втором случае V_{th} определяется из экспериментальных данных, хотя также является условием достижения сильной инверсии.

Для определения величины порогового напряжения, как электрического параметра модели, нет единого метода, который позволил бы определить V_{th} однозначно. Это связано, по крайней мере, с двумя факторами: 1) разная технология изготовления полевых транзисто-

ров, которая влияет на применимость методов вычисления, например, определение V_{th} как физического параметра модели не будет точным; 2) точность приборов, с помощью которых снимаются вольтамперные характеристики полевых транзисторов. В литературе встречается множество методов определения V_{th} . В [7] сделано сравнение методов и приведена таблица коэффициентов корреляции между V_{th} , полученных разными методами. Часть методов основана на том, что пороговое напряжение определяется как напряжение V_{gs} — напряжение затвор-исток, при котором ток достигает некоторого постоянного значения: метод постоянного тока CC (constant current), метод линейной экстраполяции LE (linear extrapolation), метод квадратичной экстраполяции SRE (square root extrapolation). Часть методов основана на экстраполяции линейной области зависимости I_{ds} от V_{gs} : LE, SRE, CLE (corrected LE). Часть методов определения V_{th} зависит от поведения $g_m = \frac{dI_{ds}}{dV_{gs}}$, $G_{out} = \frac{dI_{ds}}{dV_{ds}}$ и $\frac{dg_m}{dV_{gs}}$: GME (g_m extrapolation), метод предложенный в [8], метод крутизны TC (transconductance).

Поэтому выбор метода определения V_{th} является важной задачей определения корректного значения этого параметра, влияющего на характеристики схемы считывания в целом. Например, метод постоянного тока требует большой точности для токов в подпороговой и близкой к ней области, а метод TC очень чувствителен к шумам в измерении и каждый метод имеет свои недостатки.

Для расчета параметров моделей транзисторов использовано базовое уравнение для тока:

$$I_{ds} = \frac{\mu W_{eff} C_{ox}}{L_{eff}} \left[(V_{gs} - V_{th}) V_{ds} - \frac{V_{ds}^2}{2} \right] \quad (1)$$

где μ — подвижность носителей в канале, W_{eff} — эффективная ширина канала, L_{eff} — эффективная длина канала, C_{ox} — емкость подзатворного оксида, V_{ds} — напряжение сток-исток и

$$V_{th} = V_{fb} + 2\phi_f + \gamma(2\phi_f - V_{bs})^{\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

Уравнение (1) определяет ток для линейной области. Уравнение (2) — определение V_{th} как физического параметра модели. Для малых V_{ds} следует упрощенное уравнение (1):

$$I_{ds} = \beta(V_{gs} - V_{th})V_{ds}. \quad (3)$$

В уравнении (3) ток имеет линейную зависимость по V_{gs} при других неизменных параметрах. Это значит, что для линейной области зависимости I_{ds} от V_{gs} можно определить β и подвижность носителей μ_0 .

$$\beta = KP \frac{W_{eff}}{L_{eff}} \quad (4)$$

$$\mu_0 = \frac{KP}{C_{ox}} \quad (5)$$

Для получения V_{th} использовано 3 различных метода: метод GME, ТС и метод, предложенный в [8]. На рис.1 и рис.2 приведены типичные вольтамперные характеристики транзистора при комнатной температуре и температуре жидкого азота, которые в дальнейшем будут использованы для расчета V_{th} и подвижности носителей μ_0 . Данные получены для n -канальных полевых транзисторов с размерами $W_{eff} = 50 \mu\text{m}$ и $L_{eff} = 50 \mu\text{m}$, толщиной подзатворного оксида 500 \AA и концентрацией примеси бора в объеме полупроводника $1.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

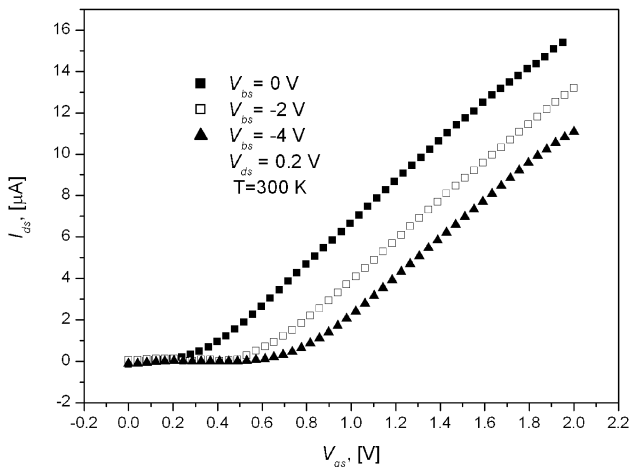


Рис. 1. Типичные вольтамперные характеристики для полевого транзистора $50 \times 50 \mu\text{m}$ при комнатной температуре.

Суть метода GME заключается в том, что вычисляется производная $g_m = \frac{dI_{ds}}{dV_{gs}}$ -крутизна и в точке кривой $I_{ds}(V_{gs})$, которая соответствует максимуму g_m , проводится касательная, пересечение которой с осью абсцисс будет давать V_{th} [9].

2-й метод, который был применен нами для вычисления V_{th} , описан в [8]. Метод заключается в том, что пороговое напряжение можно получить из отношения $\frac{I_{ds}}{G_{out} V_{ds}}$.

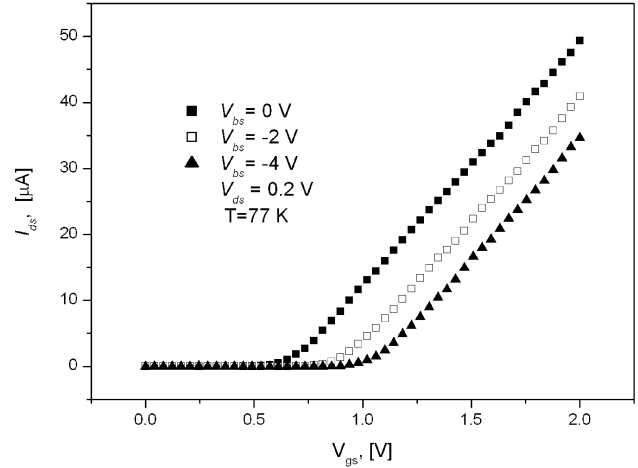


Рис. 2. Типичные вольтамперные характеристики для полевого транзистора $50 \times 50 \mu\text{m}$ при температуре жидкого азота.

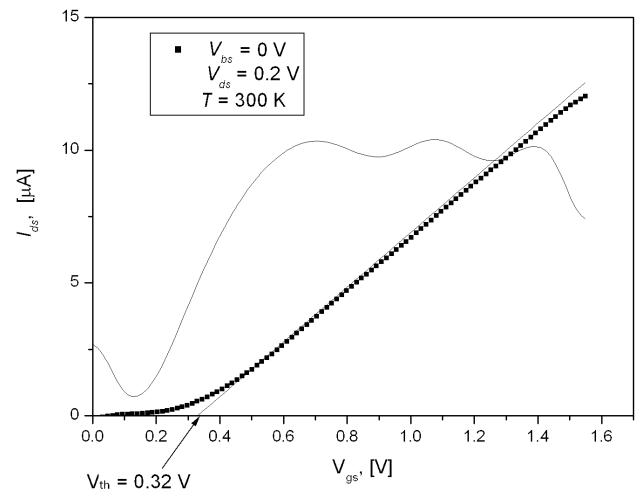


Рис. 3. Вычисление V_{th} по методу GME.

$$G_{out} = \frac{dI_{ds}}{dV_{ds}} = \frac{\mu W_{eff} C_{ox}}{L_{eff}} [(V_{gs} - V_{th}) - V_{ds}] \quad (6)$$

$$V_{th} = V_{gs} - V_{ds} \frac{I_{ds} - 0.5 V_{ds} G_{out}}{I_{ds} - V_{ds} G_{out}} \quad (7)$$

Этот метод можно применять только в линейной области зависимости I_{ds} от V_{ds} .

На рис.3 и рис.4 можно увидеть различия этих двух методов: для определения порогового напряжения V_{th} используются различные вольтамперные характеристики полевого транзистора.

Также для вычислений V_{th} был использован метод второй производной. В этом методе пороговое напряжение определяется как то напряжение, для которого вторая производная от I_{ds} по V_{gs} имеет максимум [9].

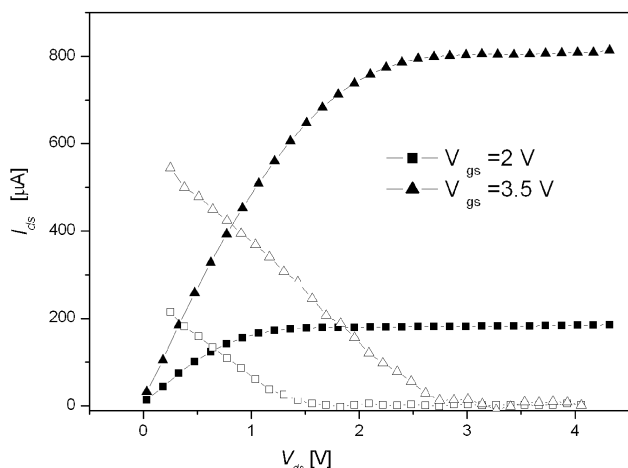


Рис. 4. Вычисление V_{th} по [8]

Сравнение 3-х методов приведено в табл.1 для $T = 300\text{ K}$ и $T = 77\text{ K}$.

Видно, что наибольшее различие методов получается при определении V_{th} для $V_{bs} = 0\text{ В}$.

Для того, чтобы определить возможную причину этого эффекта, в первую очередь необходимо установить, почему при ненулевых смещениях V_{bs} , разность между V_{th} для разных методов является меньше, чем для $V_{bs} = 0\text{ В}$. Предварительный анализ показал, что в основном это может быть обусловлено наличием в канале встроенных примесей, которые дают носители n -типа. При нулевом V_{bs} носители остаются у поверхности раздела Si-SiO_2 и дают свой вклад в заряд канала. Если подать обратное смещение на подложку, то электроны будут оттягиваться вглубь объема полупроводника и, соответственно, не будут давать вклада в заряд канала. На рис.1 и рис.2 можно увидеть, что для $T = 300\text{ K}$ и $V_{bs} = 0\text{ В}$ кривая имеет больший радиус кривизны в точке перегиба, чем для отрицательных V_{bs} , т.е. для $V_{bs} = 0\text{ В}$ есть дополнительный вклад в заряд канала.

Таблица 1

Пороговые напряжения для разных V_{bs} , вычисленные тремя различными методами при $T = 300\text{ K}$ и $T = 77\text{ K}$.

$V_{bs}, \text{ В}$	$T = 300\text{ K}$			$T = 77\text{ K}$		
	$V_{th}, \text{ В GME}$	$V_{th}, \text{ В TC}$	$V_{th}, \text{ В по [8]}$	$V_{th}, \text{ В GME}$	$V_{th}, \text{ В TC}$	$V_{th}, \text{ В по [8]}$
0	0.33	0.35	0.45	0.69	0.71	0.72
-2	0.55	0.56	0.55	0.93	0.91	0.89
-4	0.73	0.71	0.67	1.05	1.07	1.05

3. Моделирование полевого транзистора с помощью программы PSPICE

Было проведено моделирование работы полевого транзистора с помощью PSPICE — level 3 при $T = 300\text{ K}$. В модель были подставлены параметры $\text{NSUB} = 1.3e + 15$, $\text{PHI} = 0.3$, $L = W = 50\text{ }\mu\text{м}$, $\text{TOX} = 500\text{ \AA}$ и параметры, полученные нами из эксперимента для $V_{bs} = 0\text{ В}$, из табл.1, $V_{TO} = V_{th} = 0.33\text{ В}$ и подвижность $U_0 = \mu_0 = 680 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$ получаем данные из PSPICE, которые мало отличаются от данных эксперимента — рис.5.

При построении модели учитывалось влияние R_s и R_d — сопротивления истока и стока в виде $R_s = R_d = 0\text{ Ом}$. Т.е. здесь не ставилась проблема исключения сопротивления. Это значит, что недостаток определения V_{th} методом GME не влияет на определение порогового напряжения для исследованных транзисторов в рамках расчетов по программе PSPICE. В то время, как метод крутизны, разработанный для того, чтобы избежать зависимости от последовательного сопротивления, очень

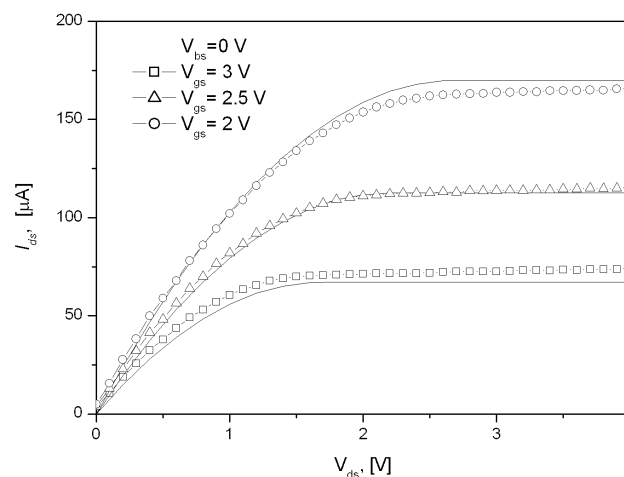


Рис.5. Результаты моделирования PSPICE (изображены сплошной линией).

чувствителен к шумам в измерениях, так как вторая производная эквивалентна высокочастотному фильтру. А применение сглаживания экспериментальной кривой искажает значение порогового напряжения. Приведенные данные в табл.1 показывают, что для $V_{bs} = 0\text{ В}$

есть большое отклонение для V_{th} , вычисленно-го по методу [8]. Тогда можно сделать вывод, что надежным методом вычисления порого-вого напряжения для заземленной подложки является GME метод, в то время как методы ТС, [8] позволяют отбросить ошибочные зна-чения.

4. Вычисление подвижности носителей μ_0 и коэффициента уменьшения подвижности θ

В [10] дан вывод для зависимости μ_{eff} от на-пряженности поля E :

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_0} = 1 - \exp(\alpha^2)(1 - erf\alpha).$$

И для больших напряженностей

$$\theta = \frac{(V_{G1} - V_{th} - V_{ds})G_{out2} - (V_{G2} - V_{th} - V_{ds})G_{out1}}{(V_{G2} - V_{th})(V_{G1} - V_{th} - V_{ds})G_{out2} - (V_{G1} - V_{th})(V_{G2} - V_{th} - V_{ds})G_{out1}} \tag{11}$$

В табл.2 показаны результаты вычислений для μ_0 при комнатной температуре и темпера-туре жидкого азота. При $T = 77$ К подвижность имеет значения, которые совпадают со зна-чениями, приведенными в [11]. Моделирова-ние работы полевого транзистора с помощью PSPICE для $T = 77$ К показывает несовпадение моделирования и эксперимента значительно большее, чем для $T = 300$ К.

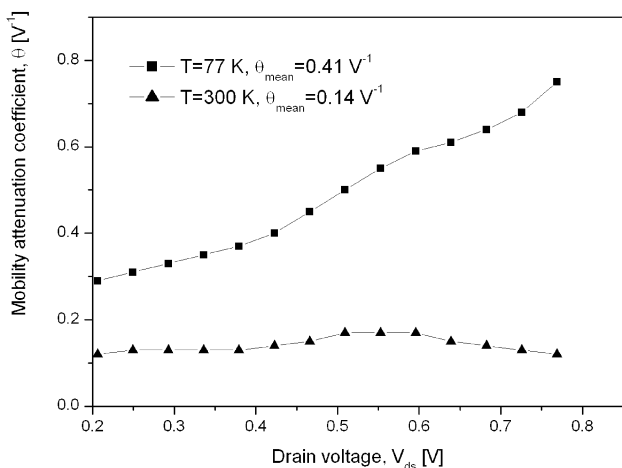


Рис. 6. Коэффициенты уменьшения подвижности в зависимости от V_{ds} при $T=300$ К и $T=77$ К.

Но величины подвижности и порогового напряжения, полученные нами из экспери-мента можно взять за основу для построения модели. Например, если взять вместо величи-

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_0} \cong 2\alpha/\pi^{\frac{1}{2}}, \tag{8}$$

где $\alpha = (qE_v\tau)^{-1}(2mkT)^{\frac{1}{2}} \tag{9}$

E_v — вертикальное поле в объеме полупровод-ника, τ — время релаксации.

Из (8)-(9) видно, что величина $\frac{1}{\mu_{eff}}$ имеет линейную зависимость по E_v . Если учесть то, что E пропорционально $(V_{gs} - V_{th})$ при условии сильной инверсии, можно получить [6]

$$\mu_{eff} = \frac{\mu_0}{1 + \theta(V_{gs} - V_{th})} \tag{10}$$

Мы вычисляли подвижность μ_0 по формулах (3)-(5), а коэффициент уменьшения подвиж-ности по формуле (11) приведенной в [8]

ны подвижности $\mu_0 = 2800$ см²/V с при $T=77$ К величину $\mu_0 = 3000$ см²/V с, то совпадение по-лучается значительно лучше.

Таблица 2
Подвижность носителей при $T=300$ К и $T = 77$ К.

$\mu_{mean}, \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{c}$		V_{bs}, V
$T=300\text{K}$	$T=77\text{K}$	
686	2809	0
681	2856	-2
694	3014	-4

5. Заключение

1. Разные методы определения V_{th} при $V_{bs} = 0$ В дают разные значения. Из получен-ных данных можно сделать предположение, что для исследованных транзисторов это мо-жет быть связано со встроенными примесями, которые дают носители n-типа. Показать это можно моделированием работы транзистора с помощью PSPICE, результаты которого сов-падают с экспериментальными более точно, если исключить влияние встроенных приме-сей. Из проведенного исследования видно, что надежным методом вычисления порого-вого напряжения для заземленной подложки является GME метод.

2. Моделирование работы полевого тран-зистора с помощью PSPICE показало, что

при подстановке вычисленных значений порогового напряжения и подвижности носителей (при комнатной температуре) следуют данные, которые совпадают с экспериментальными.

3. Оценки показывают, что величины подвижности носителей μ_0 и коэффициента уменьшения подвижности носителей θ совпадают с данными других работ. При подстановке этих величин и V_{th} в модель PSPICE есть несовпадение данных моделирования и экспериментальных данных. Однако эти величины являются приемлемыми для построения моделей МДП транзисторов, которые при криогенных температурах могут быть использованы для моделирования и проектирования схем считывания при данных температурах.

Работа частично выполнена в рамках интеграционного проекта №3.20 СО РАН и НАН Украины.

6. Литература

1. A. Rogalski, Infrared Detectors. Gordon and Breach Science Publishers, 2000.
2. J. — P. Chamonal, E. Mottin, P. Audebert, M. Ravetto, M. Caes, J. — P. Chatard, Long linear MWIR and LWIR HgCdTe arrays for high-resolution imaging, Proc. SPIE, v. 4130, 452–462 (2000).
3. Ph. Tribolet, Ph. Chorier, A. Manissadjian, P. Costa, J-P. Chatard, High performance infrared detectors at Sofradir, Proc. SPIE, v. 4028, 438–456 (2000).
4. F. F. Sizov, Yu. P. Derkach, V. P. Reva, Yu. G. Kononenko. MCT sensor readout devices with charge current injection and preliminary seagnal treatment. Testing procedure. Opto-Electronics Review, v.7, p.327-338 (1999).
5. F. F. Sizov, V. P. Reva, Yu. P. Derkach, A. G. Golenkov, V. V. Zabudsky, S. V. Korinets. Composite readouts with TDI and “dead” elements deselection. Proc. SPIE, v.5074, p. 911 — 917 (2003).
6. D.P. Foty. MOSFET modeling with SPICE principles and practice, 1997, Prentice-Hal.
7. Terada K., Nishiyama K., Hatanaka K. — I. Comparison of MOSFET-threshold-voltage extraction methods// Solid-State Electronics. — 2001. — v. 45. — P. 35-40.
8. He J., Zhang X., Wang Y., and Huang R. New method of extraction of MOSFET parameters// IEEE Electron Device Letters. — 2001. — v. 22. — N 12. — P. 597-599.
9. Ortiz-Conde A., Sanchez F., and Liou J. J.. On the extraction of threshold voltage, effective channel length and series resistance of MOSFETs// Journal of Telecommunications and Information Technology. — 2000. — v. 3-4. — P. 43-58.
10. Schrieffer J.R. Effective carrier mobility in surface-space charge layers// Phys. Rev. — 1955. — v. 97. — N 3. — P. 641-646.
11. Glidden R.M., Lizotte S.C., Cable J.S., Mason L.W., Cao C. Optimization of cryogenic processes for Sub-10°K applications.// Proc. SPIE, v. 6884 Infrared Readout Electronics (1992) p. 2-3.