

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

УДК 621.382.323

ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА САМОНАГРЕВАНИЯ НА ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ НА СТРУКТУРЕ “КРЕМНИЙ НА ИЗОЛЯТОРЕ” ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

© 2020 г. Н. В. Масальский*

Научно-исследовательский институт системных исследований РАН,
Нахимовский пр., 36, корп. 1, Москва, 117218 Российская Федерация

*E-mail: volkov@niisi.ras.ru

Поступила в редакцию 26.04.2019 г.

После доработки 13.08.2019 г.

Принята к публикации 26.08.2019 г.

Обсуждается подход для исследования влияния эффекта самонагрева на вольт-амперные характеристики (ВАХ) субмикронных полевых транзисторов на структуре “кремний на изоляторе” в диапазоне окружающих температур 225...350°C. Подход заключается в комбинировании экспериментальных данных и результатов численного моделирования. Показано, что с ростом окружающей температуры вклад механизма самонагрева последовательно снижается. Отмечена различная динамика спада тока *n*- и *p*-транзисторов, которая является значимой для аналоговых приложений, что необходимо учитывать при проектировании высокотемпературных схем. Предложенная методология позволяет критически оценить влияние самонагрева на ВАХ транзисторов в широком диапазоне высоких и температур и управляющих напряжений.

DOI: 10.31857/S0033849420070086

ВВЕДЕНИЕ

Высокотемпературная микроэлектроника — специализированное направление современной электроники, изделия которой должны функционировать в температурных условиях значительно превышающих коммерческий диапазон (выше 200°C). Одним из технологических базисов высокотемпературной электроники является технология кремний на изоляторе (КНИ), которая эффективно ограничивает температурную деградацию ключевых характеристик кремниевого метал–оксид–полупроводник (МОП) транзистора [1]. Однако для КНИ МОП-транзистора толстый погруженный окисел кремния под тонкопленочной кремниевой рабочей областью (областью канала транзистора) является определяющим условием для ярко выраженного проявления механизма самонагрева [2, 3]. Он наиболее сильно и опасно проявляется в аналоговых приложениях КНИ МОП-транзисторов. В данном случае он является самым серьезным ограничением при высоких значениях затворных $U_{зат}$ и стоковых $U_{ст}$ напряжений, что приводит к резкому росту локального перегрева устройства и при определенных условиях может привести к потере его функциональной устойчивости [https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/high-temperature-electronic-pose-design-challenges.html/].

В данной работе для транзисторов, выполненных на основе отечественного базового КНИ КМОП процесса с топологическими нормами 0.5 мкм, решается задача — определить вклад эффекта самонагрева в их вольт-амперные характеристики (ВАХ) в температурном диапазоне выше 200°C.

1. ТЕСТОВЫЙ ТРАНЗИСТОР

Для исследования возможностей технологии был разработан тестовый кристалл, включающий в себя различные конструктивные варианты транзисторов А-типа, работающих в режиме частичного обеднения [http://www.myshared.ru/slide/467770/]. Тестовый кристалл содержит также набор транзисторных структур, который предоставляет возможность построения параметров SPICE-моделей. Преемственность базовой технологии подразумевала использование КНИ-структур, изготовленных по технологии SIMOX [https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/high-temperature-electronic-pose-design-challenges.html/, http://www.myshared.ru/slide/467770/]. Их основные параметры: толщина кремниевой пленки 180 нм; толщина слоя изолирующего окисла 150 нм; удельное сопротивление подложки *p*-типа 10...20 Ом см. Толщину затворного окисла оценивали по оптическим измерениям на установке АРЕС 3020 и по вольт-фарадным характеристикам МОП-кон-

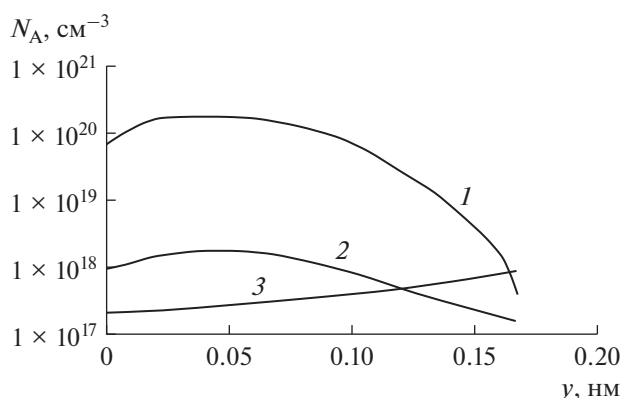


Рис. 1. Профили легирования областей транзистора по глубине: 1 – область сток/исток, 2 – низколегированная область, 3 – область канала.

денсаторов, она составила 15 нм. Профили легирования областей стока и истока, областей с пониженной концентрацией легирования и области канала приведены на рис. 1.

В исследовании мы решали задачу – определить вклад эффекта самонагрева для случая стационарных электрических и тепловых полей. Мы рассматривали безкорпусную пластину, у которой на всех ее гранях происходит свободный теплообмен с окружающей средой, при этом отсутствует принудительное охлаждение. Учет теплоотводящих свойств корпуса – отдельная задача, поскольку эти свойства зависят не только от материала, но и от конструкции корпуса. При этом они действуют на все транзисторы одинаково. С практической точки зрения разработчикам микросхемы хорошо известны теплоотводящие свойства конкретного корпуса, и поэтому им важно знать влияние самонагрева на токовые характеристики отдельного транзистора. Это позволяет достоверно оценить работу конкретного электронного узла.

В эксперименте пластина была закреплена на специальной конструкции, чтобы обеспечить максимально свободную нижнюю поверхность. Температура пластины контролировалась при помощи резистивных “свидетелей”. Когда окружающая температура и температура пластины становились одинаковыми, на транзисторы подавалось напряжение. Измерения ВАХ транзисторов проводили по истечении длительного (несколько десятков минут) промежутка времени. Их выполняли на измерительном комплексе Hewlett Packard с зондовым устройством, позволяющим проводить измерения на пластине в диапазоне температур $-60...300^{\circ}\text{C}$. Вклад самонагрева экстрагируется из результатов измерения стоковой проводимости в импульсном режиме [3]. При тестовых измерениях в диапазоне температур $125...225^{\circ}\text{C}$ с шагом 20°C в каждом случае приходилось подбирать длительность импульса. В нашем случае создать натурные условия для окружающей среды, включая и температуру

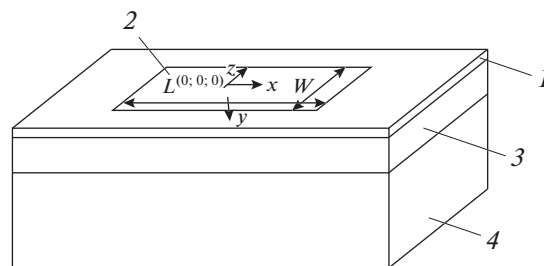


Рис. 2. Структурная схема КНИ МОП транзистора: 1 – тонкая кремневая пленка, 2 – тепловой источник (активная область транзистора), 3 – пленка SiO_2 , 4 – кремневая подложка.

подложки, температура которой выше 225°C , не представляется технически возможным. Поэтому, опираясь на экспериментальные данные, мы численно исследовали влияние самонагрева на ВАХ КНИ КМОП-транзисторов в диапазоне высоких температур.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для моделирования электротепловых характеристик КНИ МОП-транзистора была рассмотрена трехслойная структура (см. рис. 2). Каждый слой характеризуется собственным температурным распределением и теплофизическими параметрами: плотностью, теплоемкостью, теплопроводностью [4]. Источник тепла расположен на верхней поверхности кристалла и занимает активную область, площадь которой $s_a = W \times L$ (W , L – ширина и длина активной области транзистора). Геометрические размеры слоев 1–3 следующие: $L_x^{(1)} = L_z^{(1)} = 20$ мкм для всех трех слоев; $L_y^{(1)} = 0.18$ мкм для верхнего слоя, $L_y^{(2)} = 0.15$ мкм – для среднего слоя и $L_y^{(3)} = 0.6$ мм для нижнего слоя. Активная область $L = 0.5$ мкм, $W = 3.1$ мкм.

Температурное поле для стационарного случая в рассматриваемой трехслойной структуре определяем из решения системы уравнений теплопроводности и электротепловой обратной связи [5, 6] с учетом того, что, во-первых, температура активной области транзистора T_a одинакова в каждой ее точке и, во-вторых, рассеиваемая транзистором мощность зависит от T_a . Распределение температуры рассчитывается численно с использованием итерационного алгоритма во взаимодействии с программной средой COMSOL Multiphysics [https://www.comsol.ru/heat-transfer-module. Программное обеспечение для расширенного моделирования теплопередачи] до тех пор, пока рассеиваемая транзистором мощность не будет изменяться. Полученное распределение температуры с установленным значением электрической мощности используется для расчета токов транзисторов. Они вычисля-

ются с помощью двумерных моделей для n - и p -канальных транзисторов, разработанных в системе приборно-технологического моделирования Sentaurus TCAD, в частности, с опцией “Thermodynamic” [https://www.synopsys.com/silicon/tcad/device-simulation/sentaurus-device.html/] (мы используем достаточно старую версию TCAD), учетом температурных зависимостей физических параметров кремния. TCAD-модели откалиброваны по экспериментальным характеристикам для 225°C . Следует отметить, что разработанные модели структурно связаны с TCAD-моделями транзисторов обоих типов для того же технологического процесса, которые были откалиброваны на рабочую температуру 25°C [http://www.myshared.ru/slide/467770/] и применялись для моделирования в диапазоне температур $-60\dots 125^\circ\text{C}$.

На рис. 3 приведены результаты моделирования основных температурных зависимостей, которые характеризуют влияние самонагрева на ВАХ КНИ МОП-транзисторов. Зависимости, представленные на рис. 3а, иллюстрируют изменение температуры активной области транзистора n - и p -типов с ростом окружающей температуры T_o . Отметим, что они имеют одинаковую крутизну и при высоких температурах параметр $\Delta T = T_a - T_o$ меняется незначительно.

На рис. 3б приведены ВАХ КНИ МОП-транзистора n - и p -типа $I_{ct}(U_{ct})$ при $U_{зат} = 5.5$ В, которые позволяют оценить влияние самонагрева в диапазоне высоких температур окружающей среды.

Как показывают результаты, калибровка моделей транзисторов проведена на приемлемом уровне – максимальное отклонение данных составляет менее 3%. Отличие в поведении ВАХ для n - и p -транзисторов напрямую связано с температурно-зависимыми особенностями переноса заряда в них [4]. Дополнительное исследование показало, что максимальное расхождение токов в диапазоне высоких (>3.5 В) приложенных напряжениях для высокотемпературной модели и экспериментальных ВАХ при температурах 125 и 25°C составляет 5 и 11% соответственно.

По результатам моделирования видно, что действие механизма самонагрева для КНИ МОП транзисторов обоих типов заметно, и их ВАХ имеют ярко выраженный участок “отрицательного дифференциального сопротивления” [2, 3]. При этом с ростом температуры этот вклад постепенно снижается. В табл. 1 для транзисторов n - и p -типов приведены величина тока транзистора I_{ct} и уменьшение тока транзистора ΔI_{ct} , вызванное действием механизма самонагрева при напряжениях $U_{ct} = U_{зат} = 5.5$ В.

Из результатов моделирования следует, что спад тока транзисторов с ростом температуры T_o последовательно снижается. При этом вклад механизма существенно зависит от значения T_o . В

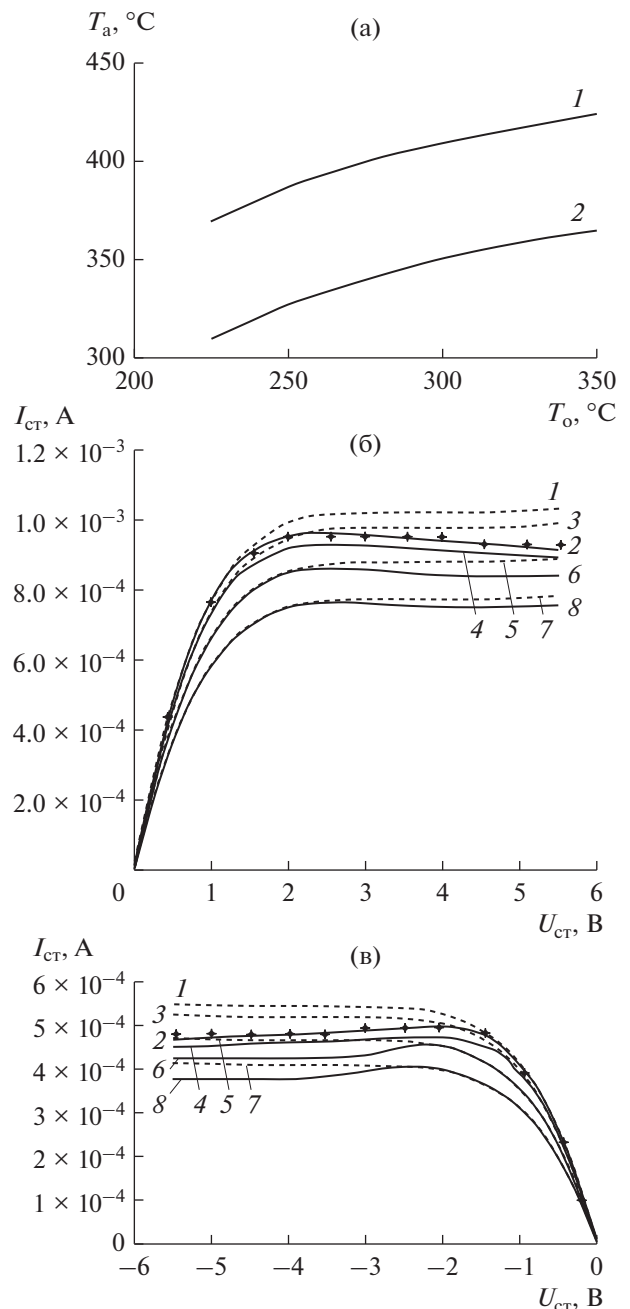


Рис. 3. Зависимость $T_a(T_o)$ при $U_{ct} = U_{зат} = 5.5$ В: 1 – транзистор n -типа, 2 – транзистора p -типа (а); а также ВАХ $I_{ct}(U_{ct})$ КНИ МОП транзисторов n -типа (б) и p -типа (в) при $T_o = 225$ (1,2), 250 (3,4), 300 (5,6) и 350°C (7,8) без учета самонагрева (1, 3, 5, 7) и с учетом самонагрева (2, 4, 6, 8), звездочки – экспериментальные данные.

общем случае зависимость $\Delta I_{ct}(T_o)$ нелинейная и имеет свои особенности для каждого типа транзистора. В исследуемом диапазоне температур вклад самонагрева при $U_{ct} = U_{зат} = 5.5$ В уменьшается для n -транзистора в 2.8 раза, для p -транзистора в 2.2 раза. Относительный спад тока транзистора для n -типа снижается с 11.6 до

Таблица 1. Температурные характеристики тока транзисторов

$T_0, ^\circ\text{C}$	n/p	
	$I_{\text{ст}}, \text{A}$	$\Delta I_{\text{ст}}, \text{A}$
225	$1.0341 \times 10^{-3} / 5.5003 \times 10^{-4}$	$1.2101 \times 10^{-4} / 0.8303 \times 10^{-4}$
250	$9.8943 \times 10^{-4} / 5.2638 \times 10^{-4}$	$1.0222 \times 10^{-4} / 0.7531 \times 10^{-4}$
300	$8.9514 \times 10^{-4} / 4.7219 \times 10^{-4}$	$0.5878 \times 10^{-4} / 0.4749 \times 10^{-4}$
350	$7.8800 \times 10^{-4} / 4.1535 \times 10^{-4}$	$0.4318 \times 10^{-4} / 0.3800 \times 10^{-4}$

5.5% и для p -типа – с 15 до 9%. Различия в динамике спада тока транзисторов из-за самонагрева может быть существенным для аналоговых приложений [1], что необходимо учитывать при проектировании высокотемпературных схем.

Например, рассмотрим генератор управляемый ток, выполненный по КНИ-технологии с проектными нормами 0.5 мкм. Если его частота генерации близка к резонансной частоте самонагрева f_{th} [3], то сброс частоты выходного сигнала через большое число циклов может достигать до 20%. Его можно преодолеть только с помощью оригинального конструкторского решения, например, выбрать другие рабочие частоты, что необходимо сделать на стадии формирования проекта. К сожалению, такой подход применим лишь в конкретном случае. Различная динамика спада тока стока приводит к появлению нескольких резонансных частот. В диапазоне высоких температур они будут не сильно отличаться друг от друга, поэтому из проекта можно исключить весь этот частотный диапазон.

В случае цифровых схем частота переключения транзисторов, даже если и совпадает с f_{th} , то время в состоянии “Включено” составляет несколько микросекунд, и поэтому эффект самонагрева практически не проявляется при любых температурах.

Важно, что при небольших флуктуациях окружающей температуры вклад самонагрева практически не изменяется. Для 225°C экспериментально установлено, что если флуктуации составляют до 3%, то вклад самонагрева практически не изменяется.

Следует отметить, что методика учета влияния механизма самонагрева, развиваемая в данной работе, дает близкие к экспериментальным данным результаты в большинстве случаев аналоговых приложений, выполненных по 0.5 мкм технологии для коммерческого температурного диапазона [<https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/high-temperature-electronic-pace-design-challenges.html/>].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе экспериментальных данных численно исследован вклад эффекта самонагрева в ВАХ субмикронных частично обедненных КНИ МОП n - и p -транзисторов в области высоких (выше 200°C) температур и высоких управляющих напряжений. Детальный учет этого процесса поз-

воляет достоверно оценить снижение тока транзистора, которое нелинейным образом зависит от окружающей температуры. По данным моделирования в диапазоне температур 225...350°C вклад саморазогрева при $U_{\text{ст}} = U_{\text{зат}} = 5.5 \text{ В}$ уменьшается для n -транзистора в 2.8 раза, а для p -транзистора в 2.2 раза. Относительный спад тока транзистора для n -типа снижается с 11.6 до 5.5% и для p -типа с 15 до 9%. Такая различная динамика тока n - и p -транзисторов является значимой для аналоговых приложений, что необходимо учитывать при проектировании высокотемпературных схем.

Предложенная методология позволяет критически оценить влияние эффекта самонагрева на характеристики транзисторов, что является чрезвычайно актуальной и важной задачей при разработке и проектировании высокотемпературных микросхем. Недооценка этого факта приводит к необоснованным значениям максимальной температуры отдельного КНИ МОП-транзистора и переоценке его предельных энергетических возможностей и всей микросхемы в целом, что особенно важно для аналоговых приложений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН (выполнение фундаментальных научных исследований ГП 47) по теме № 0065-2019-0001 “Математическое обеспечение и инструментальные средства для моделирования, проектирования и разработки элементов сложных технических систем, программных комплексов и телекоммуникационных сетей в различных проблемно-ориентированных областях” (AAAA-A19-119011790077-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wolpert D., Ampadu P.* Managing Temperature Effects in Nanoscale Adaptive System. N.Y.: Springer-Verlag, 2012.
2. *Wang L., Fjeldly T., Iniguez B. et al.* // IEEE Trans. 2000. V. ED-47. № 2. P. 387.
3. *Jin W., Liu W., Fung S. et al.* // IEEE Trans. 2001. V. ED-48. № 4. P. 730.
4. *Colinge J.-P.* Silicon Insulator Technology: Materials to VLSI. Boston: Kluwer Acad. Publ., 1997.
5. *McAlister S.P., Lafontaine H.* // Solid State Electron. 2004. V. 48. № 6. P. 2001.
6. *Marani R., Perri A.G.* // The Open Electrical & Electronic Engineering J. 2010. № 4. P. 32.