____ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ __ ПРОЦЕССОВ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.382.323

ЭФФЕКТ САМОНАГРЕВАНИЯ В СУБМИКРОННЫХ КНИ КМОП ТРАНЗИСТОРАХ

© 2021 г. С. В. Румянцев^{а, *}, А. С. Новоселов^{а, **}, Н. В. Масальский^{а, ***}

^а Федеральное государственное учреждение Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской АН,

Нахимовский проспект, 36, корп. 1, Москва, 117218 Россия

*E-mail: Sergey_Rumyancev@srisa.ru **E-mail: Anton_Novoselov@srisa.ru ***E-mail: volkov@niisi.ras.ru Поступила в редакцию 14.07.2020 г. После доработки 05.11.2020 г. Принята к публикации 07.12.2020 г.

Обсуждаются результаты исследования вклада механизма самонагревания в вольт-амперные характеристики частично обедненных КНИ МОП транзисторов с топологическими нормами 0.25, 0.35 и 0.5 микрон при высоких управляющих напряжениях и температуре 25 и 300°С. Показано, что действие данного механизма существенно изменяет вольт-амперные характеристики всех исследуемых типов транзисторов. Определены отличия во влиянии механизма самонагревания на характеристики транзисторов *n*- и *p*-типа для анализируемых технологических норм.

Ключевые слова: высокотемпературная электроника, технология "кремний на изоляторе", КНИ МОП транзистор, самонагревание, моделирование

DOI: 10.31857/S0544126921030078

ВВЕДЕНИЕ

Эффект самонагревания для субмикронных КНИ транзисторов обладает редким деградационным свойством, он является самым серьезным ограничением при высоких значениях затворных (U_{gs}) и стоковых (U_{ds}) напряжений на транзисторе [1-3]. В данном случае его проявление приводит к резкому росту локального перегрева устройства. Поэтому его не учет при разработке микроэлектронной аппаратуры сопряжен с высокой вероятностью неконтролируемой работы микросхем входящих в ее состав, чаще всего в предельных режимах работы. Несомненно, от этого пострадает и надежность аппаратуры в целом.

Отметим, что технология КНИ является основной технологической платформой высокотемпературной электроники [4]. Она способна эффективно снижать температурную деградацию ключевых характеристик кремниевого МОП транзистора.

В проведенных исследованиях решается задача в условиях стационарных электрических и тепловых полей определить вклад эффекта самонагревания в вольт-амперные характеристики (BAX) субмикронных *n*- и *p*- канальных КНИ МОП транзисторов в температурном диапазоне от 25 до 300°С для трех технологических процессов с топологическими нормами 0.25, 0.35 и 0.5 мкм.

Представляемая работа является продолжением нашей работы [5]. Мы в своих настоящих исследованиях используем экспериментальные методики и математические модели, апробированные в ней.

1. ТЕСТОВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Для исследований были разработаны тестовые кристаллы для соответствующих топологических норм, каждый из которых содержал конструктивные варианты работающих в режиме частичного обеднения *n*-и *p*-транзисторов А-и Н-типов [6, 7]. Все использованные КНИ структуры изготовлены по технологии SIMOX. Основные параметры КНИ-структуры приведены ниже в табл. 1–3, где *W*, *L* – ширина и длина активной области транзистора.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

В работе решалась задача — определить вклад механизма самонагревания в ВАХ для стационарных электрических и тепловых полей. Мы тестировали КНИ пластины, на всех гранях которых происходит свободный теплообмен с окружающей средой, температура которой постоянна. Измерения ВАХ транзисторов выполнялись на измерительном комплексе Keysight Technologies с зондовой станцией Suss Microtech, позволяющем проводить измерения на пластине в диапазоне

ЭФФЕКТ САМОНАГРЕВАНИЯ В СУБМИКРОННЫХ КНИ

Таблица 1. Толщины слоев КНИ-структуры

| Наименование споев и областей | Толщина, мкм | | |
|--|---------------|---------------|--------------|
| Паименование слосв и областей | 0.25КНИ | 0.35КНИ | 0.5КНИ |
| Области скрытого изолирующего окисла | 0.14-0.16 | 0.14-0.16 | 0.15 |
| Области истока и стока N- и P-канальных транзисторов | 0.18-0.20 | 0.18 - 0.20 | 0.19 |
| Области боковой изоляции | 0.20-0.25 | 0.20 - 0.25 | 0.19 |
| Области подзатворного окисла | 0.0040-0.0045 | 0.006 - 0.007 | 0.0110-0.012 |
| Области поликремния затвора | 0.25 - 0.27 | 0.25 - 0.27 | 0.24 - 0.28 |

Таблица 2. Концентрации слоев

| Наименование области | Легирующая примесь | Уровень легирования, 1/см ⁻³ | | |
|----------------------|--------------------|---|------------|------------|
| | | 0.25КНИ | 0.35КНИ | 0.5КНИ |
| PWELL | Бор | 4.00E + 17 | 2.50E + 17 | 1.90E + 17 |
| NWELL | Фосфор | 6.00E + 17 | 2.70E + 17 | 2.10E + 17 |
| PLDD | Бор | 9.00E + 18 | 9.00E + 18 | 9.00E + 18 |
| NLDD | Фосфор | 1.10E + 19 | 1.10E + 19 | 1.10E + 19 |
| PPLUS | Бор | 1.50E + 20 | 1.50E + 20 | 1.50E + 20 |
| NPLUS | Фосфор | 2.00E + 20 | 2.00E + 20 | 2.00E + 20 |

Таблица 3. Топология транзисторов

| | | Технология 0.25КНИ | | | |
|----------------|------|--------------------|------|------|--|
| Тип | A | | Н | | |
| Проводимость | п | р | п | р | |
| <i>L</i> , мкм | 0.24 | 0.24 | 0.28 | 0.28 | |
| <i>W</i> , мкм | 4.8 | 4.8 | 2.66 | 4.76 | |
| | | Технология 0.35КНИ | | | |
| Тип | A | | Н | | |
| Проводимость | п | р | п | р | |
| <i>L</i> , мкм | 0.35 | 0.35 | 0.35 | 0.35 | |
| <i>W</i> , мкм | 3.5 | 7.0 | 3.5 | 7.0 | |
| | | Технология 0.5КНИ | | | |
| Тип | A | | Н | | |
| Проводимость | п | р | п | р | |
| <i>L</i> , мкм | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | |
| <i>W</i> , мкм | 8.6 | 8.6 | 10.0 | 10.0 | |

температур от -60 до 300°С. Измерения выполнялись по истечении длительного промежутка времени, в течении которого, по нашим оценкам, прекращались все тепловые переходные процессы.

Вклад самонагревания экстрагируется из результатов моделирования, поскольку экспериментально его необходимо экстрагировать из измерений стоковой проводимости в импульсном режиме [8]. Это путь очень ресурсно-затратный, поскольку в каждом случае необходимо подбирать длительность импульса.

Для моделирования электротепловых характеристик КНИ МОП транзистора мы рассматривали четырехслойную структуру, схема которой приведена на рис. 1.

Каждый слой характеризуется собственным температурным распределением и теплофизическими параметрами: плотностью, теплоемкостью, теплопроводностью [1, 9]. Источник тепла

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА том 50 № 4 2021



Рис. 1. Структурная схема КНИ КМОП транзистора, где 1 – тонкая кремневая пленка, 2 – тепловой источник (активная область транзистора), 3 – пленка SiO₂ (захороненный BOX окисел), 4 – кремневая подложка, 5 – пленка SiO₂ (межслойный диэлектрик).



Рис. 2. ВАХ для *p*- и *n*-транзисторов А-типа 0.25КНИ 25°С (верхний) и 300°С (нижний) при $U_{gs} = 3.3$ В: сплошная — экспериментальные данные; длинная штриховая — расчет с учетом самонагревания; короткая штриховая — без учета самонагревания.



Рис. 3. ВАХ для *p*- и *n*-транзисторов Н-типа 0.25КНИ 25°С (верхний) и 300°С (нижний) при U_{gs} = 3.3 В. (Обозначения соответствуют подписи рис. 2.)

расположен внутри структуры и является активной (рабочей) областью транзистора с площадью $s_a = W \times L$. Геометрические размеры слоев 1, 3, 4 и 5 по длине и ширине совпадают и составляют 20 мкм. Размеры слоя 2 (значения L и W) выбираются из таблицы для каждой технологии, типа

конструкции и типа проводимости транзистора. Толщина слоев 1, 2 и 3 выбираются из таблиц по тому же правилу. Для всех образцов толщина слоя 4 равна 0.6 мм и толщина слоя 5–10 мкм.

ВАХ для каждого типа КНИ МОП транзисторов вычисляются с помощью апробированной



Рис. 4. ВАХ для *p*- и *n*-транзисторов А-типа 0.35КНИ 25°С (верхний) и 300°С (нижний) U_{gs} = 3.5 В. (Обозначения соответствуют подписи рис. 2.)



Рис. 5. ВАХ для *p*- и *n*-транзисторов Н-типа 0.35КНИ 25°С (верхний) и 300°С (нижний) $U_{gs} = 3.5$ В. (Обозначения соответствуют подписи рис. 2.)

токовой модели с учетом эффекта самонагревания [5], откалиброванной на основе экспериментальных данных для температуры 25°С.

Температурное поле в рассматриваемой структуре для стационарного случая определяем из решения системы уравнений теплопроводности и электротепловой обратной связи [10] с учетом того, что, во-первых, температура активной области транзистора Та постоянна по всему ее объему, вовторых, рассеиваемая транзистором мощность

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА том 50 № 4 2021



Рис. 6. ВАХ *p*- и *n*-транзисторов по технологии 0.5КНИ при $U_{gs} = 5.5$ В, где блок (*a*) – транзистор А-типа при 25°С, блок (*b*) – транзистор А-типа при 300°С, блок (*b*) – транзистор Н-типа при 25°С, блок (*b*) – транзистор – Н-типа при 300°С. (Обозначения соответствуют подписи рис. 2.)

зависит от Та, в третьих градиент температуры активной области транзисторов *n*- и *p*-типов с ростом окружающей температуры одинаков [5]. Распределения температуры рассчитываются численно с использованием итерационного алгоритма во взаимодействии с программной средой COMSOL Multiphysics [11] до тех пор, пока рассеиваемая мощность не будет изменяться.

На рисунках ниже приведены ВАХ КНИ МОП транзистора n- и p-типа $I_{ds}(U_{ds})$, которые позволяют оценить влияние механизма самонагревания в

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА том 50 № 4 2021



Рис. 7. Зависимость приращения тока (ΔI_{ds}) от ширины активной области (W) для трех технологии: блок (a) 0.25КНИ при $U_{gs} = 3.3$ В, блок (δ) 0.35КНИ при $U_{gs} = 3.3$ В, блок (δ) 0.5КНИ при $U_{gs} = 5.5$ В. В каждом блоке левый рисунок для транзистора Н-типа и правый рисунок для транзистора А-типа. На всех рисунках самая верхняя *n*-тип и $T = 25^{\circ}$ С, ниже *p*-тип и $T = 25^{\circ}$ С, следующая *n*-тип и $T = 300^{\circ}$ С и самая нижняя *p*-тип и $T = 300^{\circ}$ С.

диапазоне температур окружающей среды от 25 до 300°С.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно приведенным результатам калибровка моделей транзисторов проведена на приемлемом уровне — максимальное отклонение данных составляет менее 5%. Отличие для *n*- и *p*- транзисторов напрямую связано с температурно-зависимыми особенностями переноса заряда в обоих типах транзисторов [12].

По результатам моделирования видно, что действие механизма самонагревания для КНИ МОП транзисторов обоих типов существенно изменяют ВАХ. Относительное уменьшение максимального тока транзистора, в этом случае для *n*-и *p*-транзисторов достигает 22 и 20.6% соответственно. Что также объясняется особенностями переноса заряда. При температуре 300°С этот вклад существенно снижается и составляет около 8% для всех типов транзисторов.

На рис. 2–7 приведены численно рассчитанные зависимости вклада самонагревания в ВАХ исследуемых транзисторов от ширины транзистора ($\Delta I_{ds}(W)$) для температур окружающей среды от 25 до 300°С.

Из полученных данных следует, что все зависимости $\Delta I_{ds}(W)$ нелинейные, однако на них можно выделить линейный участок характерный для

Таблица 4. Минимальный и максимальный вклад самонагревания (ток в мкА)

| Тип | А | | Н | |
|--------------|------------|------------|-------------|------------|
| проводимость | п | р | п | р |
| 0.25 | 0.0/0.2973 | 0.0/0.3839 | 0.0/0.4702 | 0.0/0.3249 |
| 0.35 | 0.0/0.4903 | 0.0/0.4910 | 0.0/0.4939 | 0.0/0.495 |
| 0.5 | 0.0/0.5681 | 0.0/0.4926 | 0.01/0.7238 | 0.0/0.5561 |

области W > 3L (при максимальных стоковом и затворном напряжениях). Также следует отметить, что вклад для транзисторов с п-проводимостью всегда превалирует над *p*-типом. Это отличие также зависит от температуры. Разница между вкладом самонагревания для *n*- и *p*-типов при 25°C примерно в два раза больше, чем при 300°C.

В табл. 4 для всех исследуемых транзисторов приведены вызванное действием механизма самонагревания максимальное и минимальное уменьшение тока транзистора ΔI_{ds} , связанное с граничными значениями ширины транзистора W, которые определяются требованиями проектирования.

Важно, что при небольших флуктуациях температуры из-за консервативности системы вклад самонагревания практически не изменяется. Для 25°С численно установлено, что если флуктуации составляют до 1.5°С, то вклад самонагревания практически не изменяется. При 300°С максимальное значение отклонения температуры может достигать 8°С.

При снижении затворного напряжениях эффект самонагревания проявляется менее значительно в основном из-за изменения транспорта носителей, связанного с уменьшением напряженности продольного электрического поля. Уровень рассеиваемой мощности ниже из-за более низкого тока транзистора, температура активной области также заметно снижается [5]. Это приводит к ослаблению эффекта самонагревания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе экспериментальных данных численно исследован вклад эффекта самонагревания в ВАХ частично обедненных КНИ МОП транзисторов, выполненных по технологии с топологическими нормами 0.25, 0.35 и 0.5 микрон при высоких управляющих напряжениях и температуре 25 и 300°С. Из результатов моделирования на апробированной токовой модели с учетом механизма самонагревания видно, что действие механизма самонагревания существенно изменяет ВАХ всех исследуемых типов транзисторов. Относительное уменьшение максимального тока транзистора, в этом случае для *n*- и *p*-транзисторов достигает 22 и 20.6% соответственно. При температуре 300°С этот вклад существенно снижается и составляет около 8% для всех типов транзисторов. Численно рассчитанные зависимости вклада самонагревания от ширины транзистора нелинейные, однако на них можно выделить линейный участок характерный для области W > 3L (при максимальных стоковом и затворном напряжениях). Следует отметить, что вклад для транзисторов с п-проводимостью всегда превалирует над *p*-типом. Это отличие также зависит от температуры. Разница между вкладом самонагревания для n- и *p*-типов при 25°C примерно в два раза больше, чем при 300°C.

Полученные результаты позволяют критически оценить влияние эффекта самонагревания на характеристики транзисторов, что является чрезвычайно актуальной и важной задачей при разработке термостабильных микросхем.

Публикация выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН на 2021 год (Проведение фундаментальных научных исследований (47 ГП) по теме № 0580-2021-0006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Fiegna C., Yang Y., Sangiorgi E., O'Neill A.G.* Analysis of self-heating effects in ultra thin body SOI MOSFETs by device simulation // IEEE Trans. Electron. Devices. 2008. V. 55. № 1. P. 233–244.
- 2. *Neamen D.* Semiconductor physics & devices: basic principles. New York, McGaw-Hill. 2011. P. 760.
- Watson J., Castro G. High temperature electronic pose design and reliability challenge. Analog Dialog. 2012. V. 46. http://www.analog.com/(дата обращения: 12.03.2019).
- 4. Wolpert D., Ampadu P. Managing temperature effects in nanoscale adaptive system. Springer-Verlag New York. 2012.
- Румянцев С.В., Новоселов А.С., Масальский Н.В. Исследование электротепловых характеристик частично обедненных субмикронных КНИ КМОП транзисторов в расширенном диапазоне температур // Микроэлектроника. 2020. Т. 49. № 1. С. 33–39.
- 6. Волков С.И. Опыт разработки радиационно-стойких библиотек и СБИС с применением специализированной САПР. URL: http://www.myshared.ru/ slide/467770/ (дата обращения: 2018).
- Транзистор со структурой метал—оксид—полупроводник на подложке кремний на изоляторе: пат. 2477904 Рос. Федерация: МПК H01L29/78/Бабкин С.И., Волков С.И., Глушко А.А.; заявитель и патентообладатель Учреждение Российской академии наук Научно-исследовательский институт системных исследований РАН (НИИСИ РАН) (RU); заявл. 25.07.2011; опубл. 20.03.2013.
- 8. Jin W., Liu W., Fung S., Chan P., Hu C. SOI thermal impedance extraction methodology and Its significance for circuit simulation // IEEE Trans Electron Device. 2001. V. 48. № 4. P. 730–736.
- 9. *Marani R., Perri A.G.* Analytical electro thermal modeling of multi layer structure electronic devices // The Open Electrical & Electronic Engineering J. 2010. № 4. P. 32–39.
- Vassighi A., Sachdev M. Thermal and power management of integral circuits. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 2006.
- URL: https://www.comsol.ru/heat-transfer-module. Программное обеспечение для расширенного моделирования теплопередачи (дата обращения 17.02.2018).
- 12. *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984.