

**Всероссийский конкурс научно-исследовательских работ студентов вузов
в области нанотехнологий и наноматериалов**

Раздел конкурса

Наноэлектроника

(название научного раздела конкурса по приказу Федерального агентства по образованию)

ВУЗ

МГТУ имени Н.Э. Баумана

(название вуза)

Факультет

Информатика и системы управления (ИУ)

(название факультета)

Кафедра Проектирование и технология производства электронной аппаратуры (ИУ4)

(название кафедры)

**Разработка методики моделирования субмикронных МДП-
транзисторов в системе TCAD**

Выполнил:

Студент _____ (Глушко А.А.)

Научный руководитель _____ (Макарчук В.В.)

2009 г.

Аннотация

Настоящая работа посвящается особенностям моделирования субмикронных МДП-транзисторов в системе TCAD. В ней проводится исследование воздействия температуры и радиации на структуры, изготовленные по КНИ-технологии. Приведены рекомендации по оптимизации счета в САПР TCAD.

Разработанная методика моделирования субмикронных транзисторов может быть использована при решении задач разработки новой технологии изготовления КМДП СБИС, для расчета воздействия дестабилизирующих факторов, а также для решения задач исследования физических процессов, протекающих в КМДП-структуре.

Abstract

This work is devoted to the features of CMIS simulation in the TCAD system. The research of temperature and radiation action is made for structures produced for SOI technology. The recommendations of simulation optimization in TCAD are given.

The developed submicron transistors simulation methods may be used where new technology of CMIS VLSI producing is being developed, for calculation of CMIS-structures where destabilize factors are affecting and for deciding problems of physical process research in CMIS-structure.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Теоретические основы работы МОП-транзисторов с коротким каналом.....	6
1.1. Фундаментальные уравнения: Уравнение Пуассона, уравнения непрерывности. Модели переноса носителей	6
1.3. МДП-транзистор. Электрические характеристики.	7
1.4. Эффекты, связанные с малыми размерами	10
1.5 Влияние внешних воздействий на подвижность носителей	11
1.7. Технология «Кремний на изоляторе»	12
Выводы.....	15
2. Моделирование температурных и радиационных воздействий	16
2.1. Температурная зависимость электрических характеристик КМДП-структур с проектными нормами 0,5 мкм.....	16
2.2. Эффект саморазогрева в КНИ-структурах с шириной затвора 0,35 мкм.....	22
2.3. Определение порядка величины связанного положительного заряда в захороненном окисле КНИ-структуры	23
2.4. Исследование поведения транзистора в двух режимах облучения	26
Выводы.....	29
3. Разработка методики моделирования КМДП-структур в САПР TCAD	30
3.1. Квазистационарное моделирование. Модель вычислений в TCAD	30
3.2. Определение точности вычислений. Выбор начального приближения	32
3.3. Скрипт для сохранения результатов расчета	33
Выводы.....	35
Заключение	36
Список использованных источников	37

Введение

Увеличение сложности проектируемых микросхем, требование высокого быстродействия проектируемых СБИС, заставляют сегодня разработчиков электронной аппаратуры переходить на проектные нормы 0,35 – 0,25 мкм. Такой переход связан с вполне определенными трудностями: во-первых, необходимо спроектировать технологический процесс, провести подбор технологических режимов для получения заданных структур; во-вторых, для того чтобы схема могла в заданных условиях функционировать, требуется обеспечить заданные электрические характеристики МДП-транзисторов. Расчет этих характеристик становится очень трудоемким, поскольку для описания короткоканальных эффектов требуются более точные, а следовательно, и более сложные математические модели транзистора. Вдобавок разработчику необходимо знать, в каком температурном диапазоне сможет работать данная микросхема. Как известно, полупроводниковые микросхемы чувствительны к колебаниям температуры и, следовательно, необходимо прогнозировать возможные отклонения параметров при изменениях температуры окружающей среды.

Чувствительны интегральные микросхемы и к воздействию радиационного излучения. Естественно, необходимо предсказывать нежелательные изменения свойств КМОП-структуры после воздействия радиации. Аналитический расчет подобных структур практически невозможен, а эксперимент является дорогостоящим и неприемлемым.

Особенно актуален последний вопрос для расчета КНИ-структур, поскольку до сих пор нет их точного математического описания. Известен ряд явлений, которыми данные структуры отличаются от эпитаксиальных благодаря скрытому окислу. Например, при протекании больших токов через n-канальный КНИ-транзистор в области канала образуются электронно-дырочные пары. Дырки вследствие действия внешнего поля уходят вглубь платины, накапливаясь вблизи границы скрытого окисла. Это скопление в конечном счете приводит к изменению электрических характеристик КНИ-транзистора. Получить представление о распределении заряда в транзисторе на базе эксперимента не удается.

В этих условиях становится неприемлемо использовать метод проб и ошибок, в котором без гарантии какого-либо положительного результата проводится серия экспериментов, стоящая огромных материальных и временных затрат. Поэтому необходимо использовать все более мощные средства моделирования технологического процесса производства СБИС. Необходимо отметить, что в настоящее время существует несколько систем TCAD таких фирм, например, как TMA Inc. (США), ISE Integrated Systems Engineering AG (Швейцария), Synopsys Inc. (США) и Silvaco International (США). Эти системы обеспечивают возможность сквозного моделирования технологического процесса производства СБИС. Однако перед расчетом необходимо провести ряд мероприятий.

Таким образом наряду с основной задачей – получить предельно-допустимые эксплуатационные характеристики МДП-структуры, требуется решить ряд дополнительных задач.

Во-первых, необходимо провести настройку моделей в TCAD по экспериментальным данным. Предварительные расчеты показали, что уже для технологии 0,35 мкм наблюдается существенное расхождение между данными эксперимента и расчетными в TCAD, заложенными в него и используемыми по умолчанию. Для расчета технологических процессов 0,25 мкм и менее эти модели становятся неприемлемыми.

Во-вторых, нужна методика моделирования указанных процессов в применяемом САПре TCAD, которая позволила бы быстро и точно проводить расчет транзисторных структур КМДП СБИС. Дело в том, что выбор физической модели, точности вычислений, правила регенерации сетки, наименьшего, наибольшего и начального шага сходимости, использование Ньютоновских или Гуммелевских итераций – весь выбор предоставлен пользователю TCAD, и от того, насколько грамотно будут назначены эти величины, и какие модели и методы будут выбраны зависит точность вычислений и временные затраты на

расчет двумерной структуры.

Анализ методик применения TCAD показал, что на данный момент нет никаких четких правил, воспользовавшись которыми, можно оптимизировать процесс вычислений. В ряде случаев существующая методика расчета может привести к неприемлемо малому шагу сходимости или к нарушению сходимости вообще, что в свою очередь приводит к большим временным затратам при расчете сложной структуры и даже к принудительному завершению процесса моделирования с частичной потерей данных. Особенно это проявляется при расчете трехмерных структур, где количество узлов сетки в сотни раз превышает количество узлов двумерной структуры.

Настоящая работа посвящена разработке методики моделирования МДП-транзисторов с минимальными проектными нормами 0,35 мкм, позволяющая устранить указанные выше проблемы расчета, а также приводится типовой расчет двумерной КНИ-структуры на воздействия температуры и радиации.

1. Теоретические основы работы МОП-транзисторов с коротким каналом

1.1. Фундаментальные уравнения: Уравнение Пуассона, уравнения непрерывности. Модели переноса носителей

В системах конструктивно-технологического моделирования расчет полупроводниковых структур сводится к решению методом конечных элементов фундаментальных полупроводниковых дифференциальных уравнений – уравнения Пуассона, уравнений непрерывности для электронов и дырок и уравнений для электрического тока, определяемых моделью переноса носителей.

Уравнение Пуассона описывается как

$$\operatorname{div} \varepsilon \operatorname{grad} \psi = -q (p - n + N_{D+} - N_A),$$

где ε - диэлектрическая проницаемость вещества, в котором решается уравнение, q – заряд электрона, p и n - концентрации электронов и дырок, N_{D+} - число ионизированных атомов донорной примеси, N_A - число ионизированных атомов акцепторной примеси.

Уравнения непрерывности для электронов и дырок записываются как

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \bar{J}_n &= -q(G - R) + q \frac{\partial n}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \bar{J}_p &= q(G - R) + q \frac{\partial p}{\partial t}, \end{aligned}$$

Здесь \bar{J}_n и \bar{J}_p - векторы плотности электронного и дырочного тока соответственно, G – скорость генерации носителей, R – скорость рекомбинации носителей.

Из моделей переноса в полупроводнике широко используется диффузионно-дрейфовая модель, которая описывается уравнениями

$$\begin{aligned} \bar{J}_n &= -q(\mu_n n \operatorname{grad} \psi - D_n \operatorname{grad} n), \\ \bar{J}_p &= -q(\mu_p p \operatorname{grad} \psi - D_p \operatorname{grad} p), \end{aligned}$$

здесь μ_n, μ_p - подвижности электронов и дырок, D_n, D_p – коэффициенты диффузии электронов и дырок

Эти соотношения образуют систему замкнутых дифференциальных уравнений в частных производных. Уравнение Пуассона, являющееся одним из уравнений Максвелла, описывает распределение заряда в полупроводниковом приборе. Уравнения непрерывности описывают локальное равновесие между приходом и уходом электронов и дырок. Выражения для токов задают абсолютное значение, направление и ориентацию электронного и дырочного токов.

Примем следующие допущения:

Диэлектрическая проницаемость ε в уравнении Пуассона в общем случае является тензором второго ранга. Поскольку все обычные полупроводниковые материалы имеют кубическую кристаллическую структуру, а двуокись кремния аморфна, то никакой анизотропии в ней нет, и диэлектрическую проницаемость можно представить скалярной величиной. С большой точностью можно полагать, что диэлектрическая проницаемость однородна даже для вырожденных полупроводников.

Так как в МДП-транзисторе ток определяется неосновными носителями, то он описывается, главным образом, уравнением непрерывности для одного типа носителей. Если пренебречь лавинными эффектами, то остальные процессы генерации в МДП-транзисторе незначительны.

При необходимости учета лавинных эффектов оба уравнения непрерывности решаются совместно. При этом образованные за счет ионизации основные носители

отталкиваются от стокового и истокового контактов и перемещаются в подложку. Существует несколько способов учета падения напряжения, обусловленного током в подложку:

Термодинамическая модель – учитывает нагревание структуры за счет протекания токов. В этом случае уравнения переноса выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned}\bar{J}_n &= -q(\mu_n n (\text{grad } \psi + P_n \nabla T) - D_n \text{grad } n), \\ \bar{J}_p &= -q(\mu_p p (\text{grad } \psi + P_p \nabla T) - D_p \text{grad } p),\end{aligned}$$

где P_p и P_n – термоэлектрические коэффициенты, T – абсолютная температура.

Термодинамическая модель пригодна для моделирования КНИ-структур, где учет эффекта саморазогрева структуры за счет протекания токов важен из-за затрудненного теплообмена активной области транзистора с подложкой, обусловленного плохой теплопроводностью скрытого окисла.

Распределение температур получается путем решения еще одного уравнения:

$$\begin{aligned}c \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}(K \text{grad } T) &= -\text{div}((P_n T + \Phi_n) \bar{J}_n + (P_p T + \Phi_p) \bar{J}_p) - (E_C + \frac{3}{2} kT) \text{div} \bar{J}_n - \\ &- (E_V + \frac{3}{2} kT) \text{div} \bar{J}_p + qR(E_C - E_V + 3kT),\end{aligned}$$

где K – теплопроводность вещества, c – теплоемкость вещества, Φ_n , Φ_p – квазиуровни Ферми для электронов и дырок, k – постоянная Больцмана, E_C и E_V – энергетические уровни границ зоны проводимости и валентной зоны, соответственно.

Гидродинамическая модель (модель энергетического баланса) – описывается значительно более сложными уравнениями и предназначена для моделирования структур размеров глубокого субмикрона.

В различных литературных источниках модель излагается в нескольких вариантах. Полное описание модели состоит из восьми дифференциальных уравнений в частных производных, в то время как более простая форма представляется в виде 6 дифференциальных уравнений в частных производных.

В гидродинамической модели допускается, что температуры электронов и дырок T_n и T_p не равны температуре кристаллической решетки. К 3 фундаментальным уравнениям в полупроводнике добавляются 3, с помощью которых может быть определены эти температуры.

В этом случае плотности электронного и дырочного тока определяются как

$$\begin{aligned}\bar{J}_n &= q\mu_n (n(\text{grad } E_C) + kT_n (\text{grad } n) + kn(\text{grad } T_n) - \frac{3}{2} nkT_n \text{grad}(\ln m_e)), \\ \bar{J}_p &= q\mu_p (p(\text{grad } E_V) + kT_p (\text{grad } p) + kp(\text{grad } T_p) - \frac{3}{2} pkT_p \text{grad}(\ln m_h)),\end{aligned}$$

где m_e и m_h – эффективные массы электронов и дырок соответственно.[1]

1.3. МДП-транзистор. Электрические характеристики.

МДП-транзистор представляет собой структуру, приведенную на рис. 1.2.

На рисунке 1.2 выделены цветом затвор – управляющий электрод, и области истока и стока – сильнолегированные области, к которым подключены внешние металлические контакты (в данном случае приведена структура n-канального транзистора, у которого области стока и истока легированы донорной примесью, а подложка слабо легирована акцепторной примесью).

Слаболегированные области (LDD) стока и истока 2 формируются для ограничения

величины тока, протекающего через транзистор, что приводит к снижению негативных эффектов, вызванных «горячими» электронами. Получение сильнолегированной области осуществляют с помощью спейсеров 4, не допускающих проникновение имплантированных ионов в слаболегированную область

Рассмотрим функционирование подобной структуры.

Прежде всего следует рассмотреть случай, когда напряжение сток — исток V_{DS} равно нулю, а напряжение затвор — исток V_{GS} изменяется в положительном направлении. Для $V_{GS} < V_T$, где V_T — пороговое напряжение (напряжение, необходимое для образования инверсионного слоя), прибор находится в подпороговом режиме.

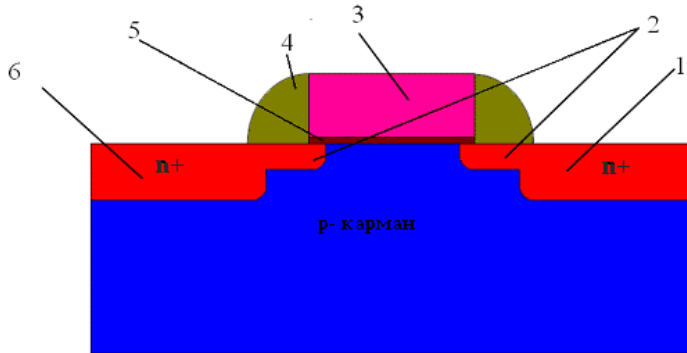


Рис. 1.2. Структура МДП-транзистора

1. Сильно легированная область истока;
2. Слаболегированные области истока/стока;
3. Затвор;
4. Спейсер;
5. Подзатворный диэлектрик;
6. Сильнолегированная область стока

Если V_{GS} начинает превосходить V_T , то глубина обедненной области насыщается и электроны притягиваются к поверхности, образуя инверсионный слой. Обычно считается, что этот инверсионный слой представляет собой прямоугольную область, равномерно заполненную носителями на глубину, равную примерно 100 Å. Фактически концентрация носителей в инверсионном слое спадает приблизительно

экспоненциально по направлению от поверхности вглубь. Носители в инверсионной области являются подвижными, образуя вблизи поверхности проводящий слой, соединяющий исток со стоком.

По мере дальнейшего увеличения V_{GS} потенциал на поверхности лишь медленно увеличивается относительно $2\phi_b$, а возрастающее напряжение затвора падает на окисле. Таким образом, напряжение затвора служит для создания проводящего канала между истоком и стоком.

Напряжение на стоке обеспечивает поток электронов от истока к стоку. При $V_{GS} < V_T$ и $V_{DS} > 0$ (подпороговый режим) протекает небольшой, но потенциально важный ток. Так как область между истоком и стоком обеднена, протекающий ток обусловлен диффузией. Этот ток, как будет показано, является постоянным для любых напряжений стока, превосходящих 100 мВ. Подпороговый ток влияет на скорость, с которой может происходить открывание или закрывание прибора, а также на

На каждой выходной характеристике можно выделить 3 области: область роста тока пропорционально напряжению (1), область обеднения инверсионного слоя (2), в которой наблюдается отклонение зависимости от пропорциональной, и область насыщения (3), в которой происходит полное обеднение инверсионного слоя и рост тока стока при увеличении напряжения сток-исток прекращается. Величина тока, проходящего через транзистор в области насыщения, называется током насыщения транзистора.[2]

Напряжение, при котором происходит насыщение транзистора может быть определено как разность между напряжением на затворе, при котором проводилось построение выходной характеристики транзистора и пороговым напряжением транзистора. Поэтому уже при напряжении между стоком и истоком менее 3,3 В, если напряжение затвор-исток равно 3,3 В происходит насыщение транзистора. Поскольку на ток в режиме насыщения практически не меняется, под величиной тока насыщения можно понимать ток,

протекающий через МДП-транзистор при $U_{ds}=U_{gs}=3,3$ В.

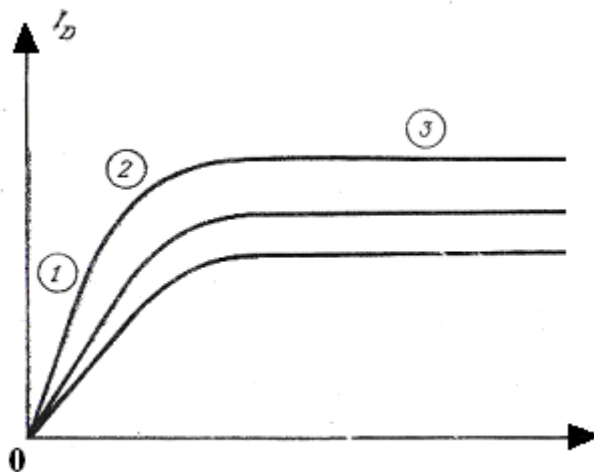


Рис. 1.3. Статические выходные характеристики МДП-транзистора: 1 — линейная область, 2 — область вблизи насыщения, 3 — область насыщения.

Основными электрическими характеристиками МДП-транзистора являются статические выходные характеристики, пороговая характеристика и крутизна.

Статические выходные характеристики представляют собой зависимости тока стока от напряжения между стоком и истоком при фиксированных значениях напряжения между затвором и истоком. Семейство выходных характеристик приведено на рис. 1.3.

Пороговая характеристика представляет собой зависимость тока стока (или приведенного) от напряжения между затвором и истоком при фиксированном напряжении между стоком и истоком (Рис. 1.4)

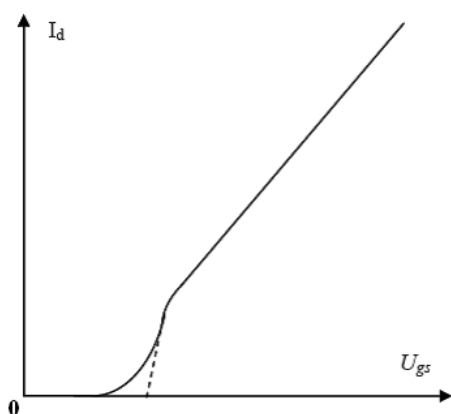


Рис. 1.4. Пороговая характеристика МДП-транзистора

Пороговое напряжение V_T определяется следующим образом. на пороговой характеристике определяется точка перегиба графика, и в этой точке проводится касательная к графику пороговой характеристики. Абсцисса точки пересечения этой касательной с горизонтальной осью и определяет пороговое напряжение.

Пороговая характеристика является одной из наиболее важных, поскольку именно она определяет переход транзистора из открытого состояния в закрытое и наоборот. Пороговая характеристика влияет на статические передаточные характеристики

логических вентилях и их статическую помехоустойчивость.

На практике пороговую характеристику строят при небольших напряжениях сток-исток (порядка 100 мВ).

Еще один важный параметр МДП-транзистора – его крутизна, она определяется по пороговой характеристике. Крутизна транзистора рассчитывается по формуле:

$$\beta = \frac{L \cdot I_D \left(\max \left(\frac{\partial I_D}{\partial V_g} \right) \right)}{V_d \cdot \left(V_g \left(\max \left(\frac{\partial I_D}{\partial V_g} \right) \right) - V_T - \frac{V_d}{2} \right) W}$$

Здесь L – ширина затвора транзистора, W – длина затвора транзистора, V_d – напряжение на стоке относительно истока, V_T – пороговое напряжение, $I_D \left(\max \left(\frac{\partial I_D}{\partial V_g} \right) \right)$ –

значение тока стока в точке перегиба пороговой характеристики, $V_g(\max(\frac{\partial I_D}{\partial V_g}))$ - значение напряжение между затвором и истоком, полученное в точке перегиба пороговой характеристики.[9]

1.4. Эффекты, связанные с малыми размерами

Уменьшение размеров МДП-транзисторов привело к тому, что длины каналов снизились до сотен нанометров. Это уменьшение размеров приборов позволило повысить быстродействие схем и увеличить плотность их упаковки. По мере того как размеры уменьшались, поведение приборов во все большей степени стало определяться такими прежде пренебрегавшимися эффектами второго порядка, как изменение порогового напряжения в зависимости от размеров приборов, модуляция подпорогового тока напряжением стока, ограничение дрейфовой скорости носителей и появление «горячих» носителей.

Подпороговый ток обусловлен инверсным зарядом, который существует при затворных напряжениях, меньших порогового напряжения в его обычном определении. Приближенную теорию, описывающую токи в этой области характеристик, рассмотрев случай малых напряжений сток-исток и предположив равенство потенциала в электронейтральном объеме кремния и потенциала у поверхности кремния. Для этого режима можно написать уравнение Пуассона, включающее в себя как инверсный заряд, так и заряд неподвижных акцепторов:

$$\frac{d^2\Phi}{dx^2} = \frac{qN_a}{\epsilon_s} (1 + \exp(q \frac{\Phi - |\Phi_p|}{kT}))$$

Здесь Φ – потенциал, q – заряд электрона, N_a – концентрация атомов примеси, ϵ_s – диэлектрическая проницаемость кремния, T – абсолютная температура по шкале Кельвина, Φ_p – потенциал Ферми в кремнии.

Проделав ряд выкладок, можно получить выражение для поверхностного заряда Q_n в виде функции затворного напряжения V_G , напряжения канала и порогового напряжения. Результат имеет вид:

$$Q_n = -\frac{kT}{q} \left(\frac{q\epsilon_s N_a}{|\Phi_p|} \right)^{1/2} \exp\left(\frac{q(V_G - V_T - V_C(x) + V_S)}{\xi kT} \right),$$

где ξ – коэффициент, зависящий от толщины подзатворного окисла и от концентрации примеси в приповерхностном слое подложки, V_G – напряжение на затворе, V_T – пороговое напряжение, $V_C(x)$ – напряжение в точке канала с абсциссой x , V_S – напряжение на истоке.

Предпороговая область характеризуется настолько низкими поверхностными плотностями свободных носителей, что диффузионные токи, пропорциональные градиенту концентрации носителей, играют здесь большую роль, чем дрейфовые токи (пропорциональные концентрации носителей). Поэтому в предпороговой области дрейфовыми токами можно пренебречь и считать, что ток стока полностью определен механизмом диффузии.

Еще один эффект короткоканальных МДП-транзисторов – зависимость порогового напряжения от длины канала. Классические уравнения порогового напряжения базируются

на одномерной теории, которая предполагает, что объемный заряд под затвором зависит только от вертикального электрического поля. Однако стоковый и истоковый $p-n$ -переходы на самом деле влияют на объемный заряд в области канала, и с уменьшением длины канала это влияние становится все более существенным.

Приближенный метод, позволяющий рассчитать зависимость порогового напряжения от длины канала, состоит в том, что при малых напряжениях сток-исток заряд обедненной области, наведенный напряжением затвора, считается сосредоточенным в объеме, сечение которого представляет собой трапецию (см. рис. 1.5). Учитывая это, имеем:

$$Q = qx_{d \max} W N_a \frac{L + L_1}{2},$$

где W – ширина канала, а N_a – концентрация примеси, $x_{d \max}$ – высота трапеции, L – длина основания трапеции непосредственно под подзатворным окислом, L_1 – длина основания трапеции у подложечной стороны обедненной области.

Если длина канала велика, то $L \approx L_1$ и классическая теория расчета порогового напряжения дает точные результаты. При малых длинах канала пороговое напряжение становится меньше. Зависимость порогового напряжения от длины канала получается путем подстановки выражения для объемного заряда Q в классическое выражение для порогового напряжения.

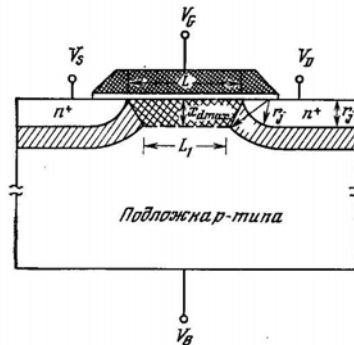


Рис. 1.5. Геометрическая модель распределения пространственного заряда в короткоканальных МДП-транзисторах

вблизи стока возможен только с помощью решения двумерного уравнения Пуассона на ЭВМ. Однако возможен и приближенный анализ с помощью закона Гаусса и разумных приближений, касающихся заряда, сосредоточенного вокруг области сильного поля. Таким способом можно получить выражение для распределения поля вдоль границы раздела $Si - SiO_2$. Показано, что в короткоканальных транзисторах напряженность электрического поля на интервале от конца эффективной области канала до стокового перехода приближенно описывается функцией гиперболического косинуса.[3]

Электрическое поле вблизи угла перехода под границей кремний-окисел, где стоковый переход находится непосредственно под затвором, обычно максимально в МОП-транзисторе и оказывает решающее влияние на эффекты горячих носителей. Носители называются «горячими», поскольку их взаимодействие с электрическим полем сообщает им значительно более высокую кинетическую энергию, чем энергия, соответствующая температуре окружающей среды.

Точный расчет электрического поля

1.5 Влияние внешних воздействий на подвижность носителей

Подвижность носителей заряда равна отношению скорости направленного движения заряженных частиц под воздействием электрического поля к напряженности этого поля.

Подвижность носителей заряда можно оценить по формуле:

$$\mu = \frac{q\tau}{m^*},$$

где q – заряд электрона, m^* – эффективная масса носителей заряда, τ – среднее время свободного пробега носителей заряда (среднее время между двумя соударениями).

На подвижность зарядов влияют в основном 2 фактора: хаотические колебания атомов кристаллической решетки (рассеяние носителей заряда на тепловых колебаниях атомов кристаллической решетки) и электрические поля ионизированных примесей

(рассеяние на ионах примесей).

При больших температурах преобладает рассеяние носителей заряда на тепловых колебаниях атомов кристаллической решетки. При этом справедлива зависимость

$$\mu \sim T^{-\frac{3}{2}}$$

Иными словами, с увеличением температуры подвижность носителей тока уменьшается.

В диапазоне малых температур с повышением температуры уменьшаются тепловые скорости хаотического движения носителей заряда, что приводит к увеличению времени пребывания носителя вблизи иона примеси, т.е. увеличивается длительность воздействия электрического поля иона примеси на носитель заряда. Поэтому в диапазоне малых температур с уменьшением температуры подвижность носителей уменьшается.

При увеличении концентрации примесей увеличивается и рассеяние на ионах примесей, т.е. уменьшается подвижность носителей заряда. Однако в диапазоне высоких температур преобладающим механизмом рассеяния носителей даже при большой концентрации примесей остается рассеяние на тепловых колебаниях атомов кристаллической решетки, и соответственно кривые температурной зависимости подвижности носителей заряда в диапазоне высоких температур практически не смещаются с увеличением концентрации примесей.

Зависимость подвижности от температуры в САПР TCAD представляется с помощью выражения

$$\mu = \mu_L \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-\gamma},$$

где $T_0 = 300 \text{ K}$, μ_L – подвижность при температуре T_0 , γ – показатель степени уменьшения подвижности с ростом температуры.

Для учета влияния ионов примеси, сильных полей используется широкий спектр моделей подвижности. При одновременной активации нескольких моделей подвижности итоговая подвижность рассчитывается из соотношения.

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_1} + \dots + \frac{1}{\mu_n}, \text{ где}$$

μ_1, \dots, μ_n - подвижности, рассчитанные с учетом различных моделей рассеяния.[4]

1.7. Технология «Кремний на изоляторе»

Несмотря на то, что экспериментально продемонстрировано, как обычная планарная объемная КМДП технология может быть использована вплоть до длины канала 15 нм, совсем не очевидно, что такое сокращение размеров будет сопровождаться соответствующим улучшением характеристик приборов. Проблема состоит в ухудшающемся электростатическом контроле заряда в кремнии затвором и, соответственно, плохой воспроизводимости характеристик транзисторов ультрамалых размеров. »

Технология «кремний-на-изоляторе» (КНИ) рассматривается как естественная преемница объемной технологии. Считается, что последовательное развитие технологии КНИ должно привести к достижению предельных характеристик кремниевых КМДП-схем.

Исторически МДП транзисторы, изготовленные по технологии «кремний-на-изоляторе» (международный термин «Silicon-on-Insulator», SOI MOSFET), появились достаточно давно как элементы схем специального применения.

Первые КНИ транзисторы имели структуру «кремний-на-сапфире», и их главным достоинством считалось отсутствие радиационно-индуцированных токов в pn-переходах стока и истока. До начала 90-х гг. XX в. КНИ технологии не рассматривались как серьезная

альтернатива коммерческой объемной технологии, главным образом, из-за своей дороговизны. Со временем выяснилось, что КНИ МОПТ имеют существенные функциональные преимущества над транзисторами обычных объемных технологий с неизолированной подложкой.

В настоящее время КНИ структуры активно проникают в коммерческие технологии. Предполагается, что этот процесс будет идти еще быстрее по мере повышения степени интеграции и, в конце концов, КНИ станет доминирующей коммерческой технологией.

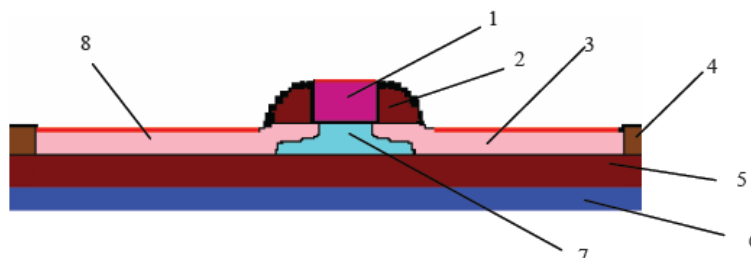


Рис. 1.6. Структура КНИ-транзистора:

1) Затвор; 2) Спейсер; 3) Область истока; 4) Вертикальная изоляция STI; 5) Скрытый окисел; 6) Подложка; 7) Карман (body) транзистора; 8) Область стока.

Активная область КНИ МДП транзистора (рис.1.6), именуемая базой или «телом» (международный термин *body*), представляет собой тонкую кремниевую пленку между контактами стока и истока, изолированную со всех сторон слоями окислов. Скрытый окисел, или захороненный окисел (международный термин *buried oxide, BOX*), в КНИ структурах изолирует активную область прибора от подложки, а вертикальная изоляция (как правило, STI) делает невозможными токи утечки и тиристорный эффект между двумя соседними приборами.

Транзисторы и изготовленные по технологии КНИ обладают рядом важных преимуществ над транзисторами объемных технологий с аналогичной проектной нормой.

1. Область стока/истока расположена прямо над скрытым окислом, поэтому изоляция скрытым окислом имеет существенно меньшую емкость, чем изоляция *pn*-переходом в объемных транзисторах, что объясняется большей толщиной скрытого окисла и меньшей диэлектрической проницаемостью окисла по сравнению с кремнием. Это дает уменьшение паразитных емкостей (на 30...50%) и соответствующее увеличение быстродействия из-за уменьшения времени задержки *RC*.

2. По той же причине, из-за уменьшения паразитной емкости, уменьшается динамическое энергопотребление (приблизительно на 30 % при той же тактовой частоте и напряжении питания).

3. Улучшается электростатическое качество транзисторов за счет подавления геометрических короткоканальных эффектов. Повышается (на ~ 15 %) плотность интеграции за счет уменьшения расстояния между транзисторами.

4. В КНИ схемах отсутствуют эффекты влияния общей подложки на пороговые напряжения, как это имеет место в схемах объемной КМДП технологии.

5. КНИ транзисторы могут иметь очень малое (близкое к минимальному) значение подпорогового размаха (-60 мВ/декаду при комнатных температурах), что позволяет снизить пороговое напряжение до 0.3 В, не увеличивая статические токи утечки. Соответственно, это позволяет уменьшать напряжения питания и динамическое энергопотребление.

6. Уменьшаются перекрестные помехи между линиями в смешанных схемах.

7. Из-за высокой степени изоляции перекрываются пути для развития паразитного тиристорного эффекта, часто имеющего место в *pnpr*-структурах объемных КМДП технологий. Отсутствуют ионизационные токи в *pn*-переходах при внешних импульсных ионизационных воздействиях. Поэтому КНИ транзисторы чрезвычайно устойчивы к

воздействию импульсной радиации, однако могут возникать проблемы с толстым скрытым окислом, где может накапливаться радиационно-индуцированный заряд и появляться дополнительный канал утечек.

Толщина кремниевой базы КНИ МОПТ может быть различной. Различают КНИ структуры с толстым слоем кремния ($d > 1$ мкм), которые используются в мощных приборах, и тонкопленочные структуры ($d < 0.2...0.3$ мкм), используемые в интегральных схемах высокой степени интеграции.

Один из нежелательных эффектов, протекающих в КНИ-структуре с плавающей базой – кинк-эффект, который заключается в следующем. При достаточно большом напряжении сток-исток вблизи области стока электроны разгоняются до больших скоростей, вызывая процесс ударной ионизации и образования электронно-дырочных пар.

Электроны уходят в сток, а дырки выбрасываются электрическим полем обедненной области в нейтральную область кремния, накапливаясь в изолированной подложке.

Избыточный заряд дырок (основных носителей) за очень малые времена диэлектрической релаксации достигает своего стационарного значения, распределяясь на площади базы и уменьшая толщину обедненного слоя x_d и плотность заряда в нем.

На выходной ВАХ транзистора образуется скачок тока. Амплитуда этого скачка и потенциал изолированной базы определяются балансом процесса рекомбинации в теле и ударной ионизации. В цифровой технике кинк-эффекты могут привести даже к некоторому увеличению быстродействия за счет повышения тока насыщения транзистора, хотя и вызывают разбросы времен задержки для разных элементов.

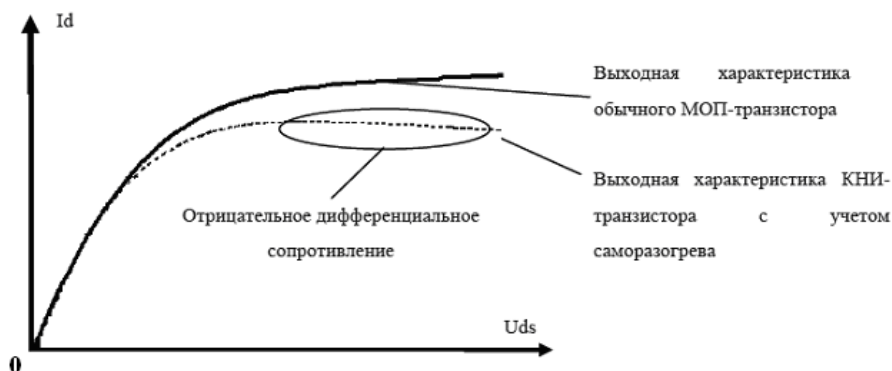


Рис. 1.7. К пояснению эффекта саморазогрева

Еще один эффект, характерный для КНИ – эффект сильного саморазогрева. Дело в том, что скрытый окисел сильно затрудняет отвод тепла в подложку. В результате КНИ структуры обладают большими тепловыми постоянными времени. Повышение температуры функционирования из-за омического тепловыделения при больших токах приводит к снижению подвижности. Таким образом, в КНИ транзисторах часто наблюдаются эффекты отрицательного дифференциального сопротивления, как показано на рисунке 1.7.[4]

1.8. Влияние радиационного излучения на электрические характеристики КНИ МДП-структур.

Электрические характеристики МДП-транзисторов меняются и в условиях радиационного облучения. Дело в том, что в процессе облучения происходит ионизация атомов кремниевого окисла с образованием электронно-дырочных пар. Под действием внешнего электрического поля электроны и дырки начинают двигаться, причем подвижность электронов значительно выше подвижности дырок, что позволяет электронам легко покидать окисел и не накапливаться в нем.

Иначе обстоит дело с дырками. Малая подвижность способствует их попаданию в устойчивые состояния, называемые ловушками, обусловленные дефектами в окисле и на

границе окисел-кремний. Концентрация ловушек определяется, вообще говоря, качеством окисла, что, в свою очередь, зависит от технологии его получения.

В результате в скрытом и подзатворном окисле накапливается положительный связанный заряд, который ухудшает характеристики n-канального транзистора – снижает пороговое напряжение. При достаточно больших значениях накопленного заряда возможно образование паразитного канала.

Скорость генерации электронно-дырочных пар определяется накопленной дозой облучения и напряженностью электрического поля в момент определения скорости генерации.

Режим включения транзистора, при котором происходит его облучение, также определяет, насколько сильно меняются характеристики транзистора.

Как уже упоминалось ранее, генерация поверхностных состояний усиливает температурную зависимость порогового напряжения.

Решить задачу уменьшения чувствительности МДП-транзисторов к радиации можно двумя способами: подачей на подложку кремния отрицательного напряжения и создание вблизи захороненного окисла сильнолегированной области противоположного типа проводимости по отношению к области стока/истока. Первый способ грубо говоря компенсирует действие положительного захваченного заряда, а второй – затрудняет формирование паразитного канала в донной области КНИ-транзистора. Кроме того, сильнолегированная область позволит сделать контакт к BODY транзистора, что уменьшит другие нежелательные эффекты, о которых упоминалось выше.

Выводы

Обзор литературных источников показал, что основными характеристиками МДП-транзистора являются его выходные и пороговые характеристики, а также приведенная крутизна. По этим параметрам судят о качестве изготовленных интегральных микросхем.

На характеристики транзисторов сильно влияют колебания температуры и воздействия ионизирующих излучений. Они могут привести к нестабильной работе схемы и, возможно, к выходу схемы из строя.

Особенно чувствительны к нежелательным эффектам схемы, изготовленные по КНИ-технологии. Полная изоляция активных областей от общей подложки приводит к ухудшению теплопередачи и усилению эффектов саморазогрева, уменьшающего подвижность носителей в канале транзистора и тем самым влияющего на электрические параметры транзистора.

Изоляция от общей подложки способствует изменению потенциала в кармане транзистора и возможному открыванию паразитного биполярного транзистора.

Для устранения всех нежелательных эффектов стремятся обеспечить надежный контакт к карману КНИ-транзистора, обеспечивая сильное легирование областей вблизи дна скрытого окисла.

Учет всех вышеперечисленных эффектов возможен только при использовании современных систем конструктивно-технологического моделирования, в которой необходимо предварительно провести аттестацию калибровку всех применяемых моделей. Решение этих задач и будет изложено в следующих главах.

2. Моделирование температурных и радиационных воздействий

Микросхемы КМОП имеют свои «слабые места». Это, в первую очередь, их чувствительность к температуре и радиационным воздействиям. С увеличением температуры сильно меняются пороговые напряжения полевых транзисторов, резко возрастают потребляемые токи и токи утечки. Для вычислительных средств, работающих на базе электронных ключей, величина порогового напряжения определяет статическую помехоустойчивость в режимах логического нуля и единицы. Изменение температуры таким образом может привести к нестабильной работе всего устройства.

Электрические параметры КМДП-схем чувствительны и к воздействиям радиационного ионизирующего излучения, вызывающего деградацию диэлектрика, обусловленную накоплением радиационно встроенного заряда. Механизм возникновения этого заряда и его зависимость от режима работы структуры в момент облучения – эти вопросы будут рассмотрены ниже.

2.1. Температурная зависимость электрических характеристик КМДП-структур с проектными нормами 0,5 мкм

Разработчикам интегральных схем важно знать, как влияет температура на электрические характеристики микросхемы. Оценить эти зависимости аналитически довольно сложно, к тому же такая оценка оказывается недостаточно точной. Для получения более точного прогноза поведения микросхем в различных температурных условиях может быть использован аппарат компьютерного моделирования технологических процессов производства интегральных микросхем (Technology Computer Aided Design - TCAD). В настоящей работе для решения поставленной задачи использовался программный комплекс конструктивно-технологического моделирования TCAD.

Задача решалась в несколько этапов: 1) Определение точности температурных моделей TCAD. 2) Построение семейства пороговых характеристик транзисторов при различных температурах. 3) Получение зависимости электрических параметров от температуры.

Оценка точности температурных моделей TCAD проводилась на основе экспериментальных данных о характеристиках транзистора на эпитаксиальных структурах с шириной затвора 0,5 мкм.

На рисунках 2.1 и 2.2 приведены пороговые характеристики р-канального и н-канального транзистора с шириной затвора 0,5 мкм при температуре 90 °С, полученные теоретически (с использованием моделирования) и экспериментально. Как видно из графиков, результат моделирования почти полностью попадает в 15%-е поле разброса электрических характеристик.

На рисунках 2.3 и 2.4 приведены выходные характеристики н-канального и р-канального транзистора при температуре 90 °С, полученные теоретически (с использованием моделирования) и экспериментально. Результат моделирования практически при всех напряжениях на стоке отличается от измерений также не более, чем на 15%.

Следующий этап – получение семейства пороговых и выходных характеристик. Эти характеристики строились для транзисторов с шириной поликремниевого затвора 0,5 мкм при температурах 100 К – 400 К с шагом 100 К. Семейство пороговых характеристик при напряжении $U_{ds}=0,1$ В для р-канального и н-канального транзистора приведены на рисунках 2.5 и 2.6. соответственно. На этих характеристиках будем оперировать приведенным током насыщения.

И, наконец, для построения зависимости порогового напряжения от температуры необходимо составить таблицу значений пороговых напряжений. Следует отметить, что пороговое напряжение в нашем случае будет определяться следующим образом: на стокзатворной характеристике определяется точка перегиба графика, и в этой точке

проводится касательная. Абсцисса точки пересечения этой касательной с горизонтальной осью и определяет пороговое напряжение.

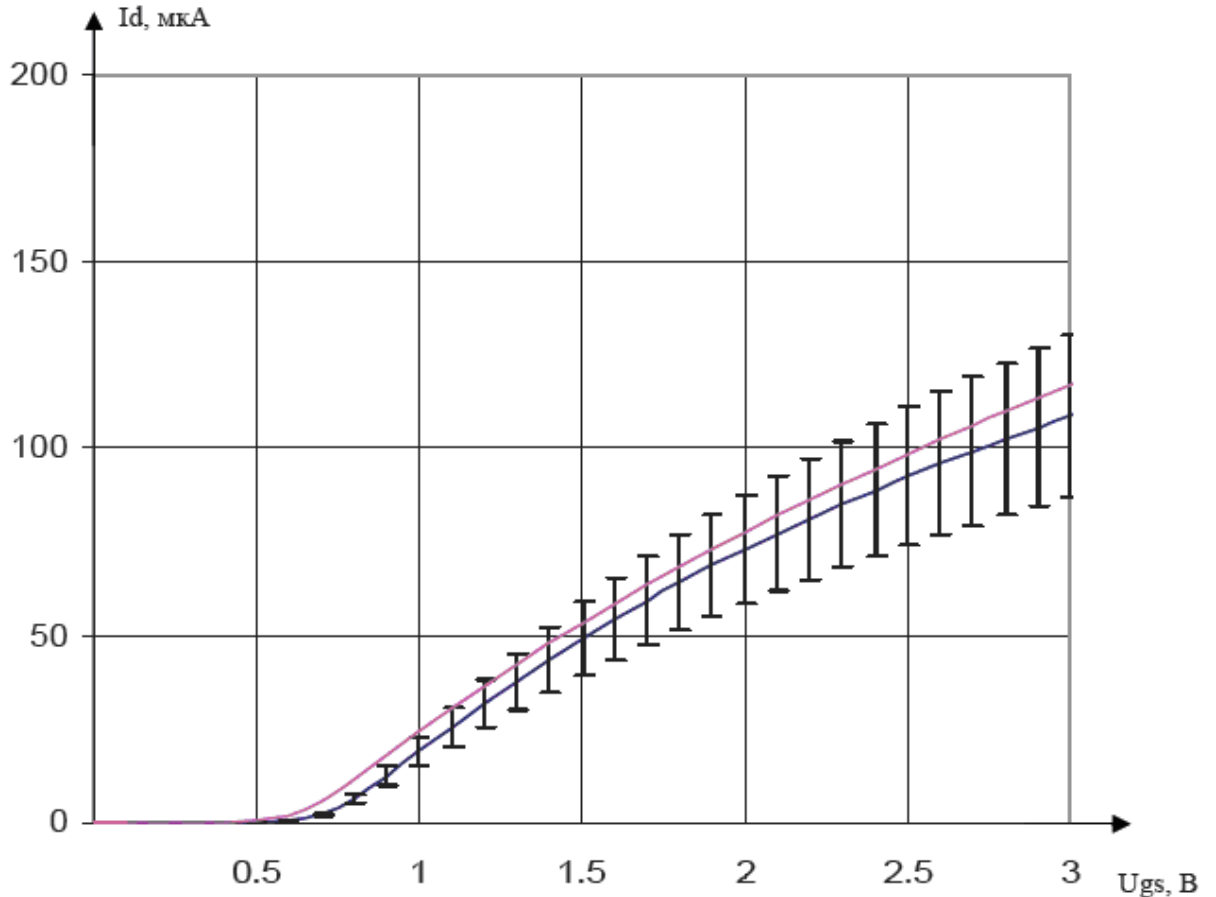


Рис. 2.1. К оценке точности температурной модели TCAD для пороговой характеристики р-канального транзистора

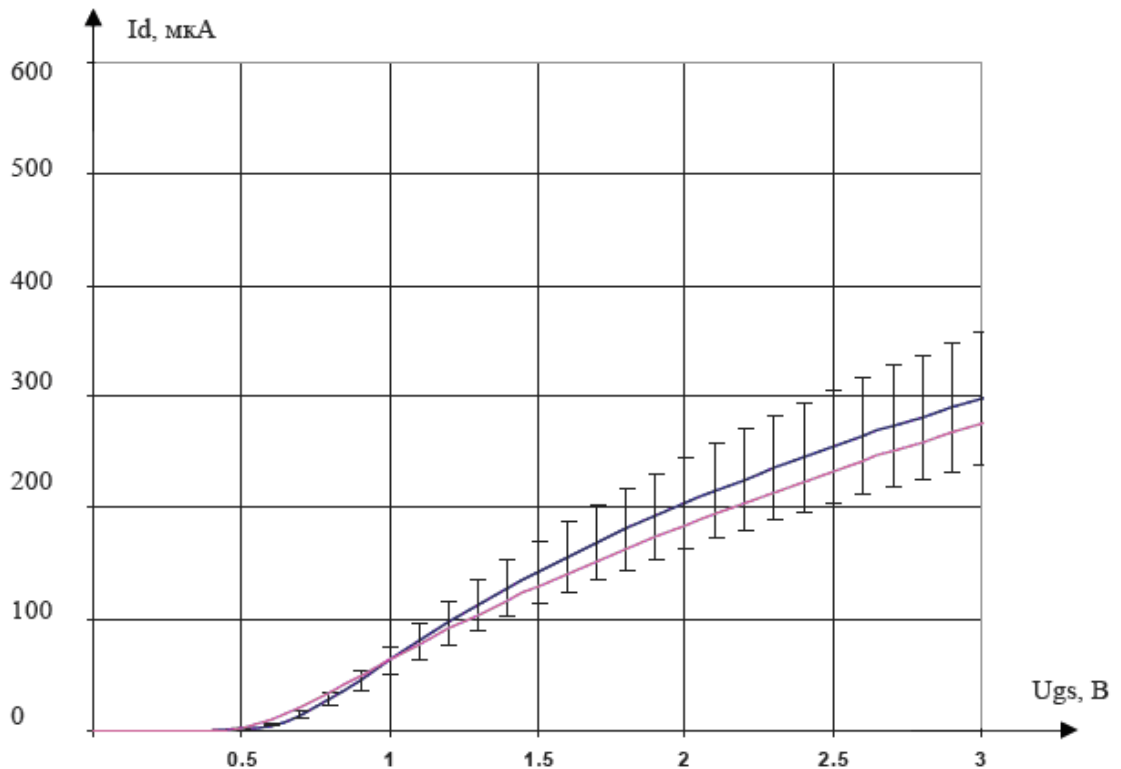


Рис. 2.2. К оценке точности температурной модели TCAD для пороговой характеристики п-канального транзистора

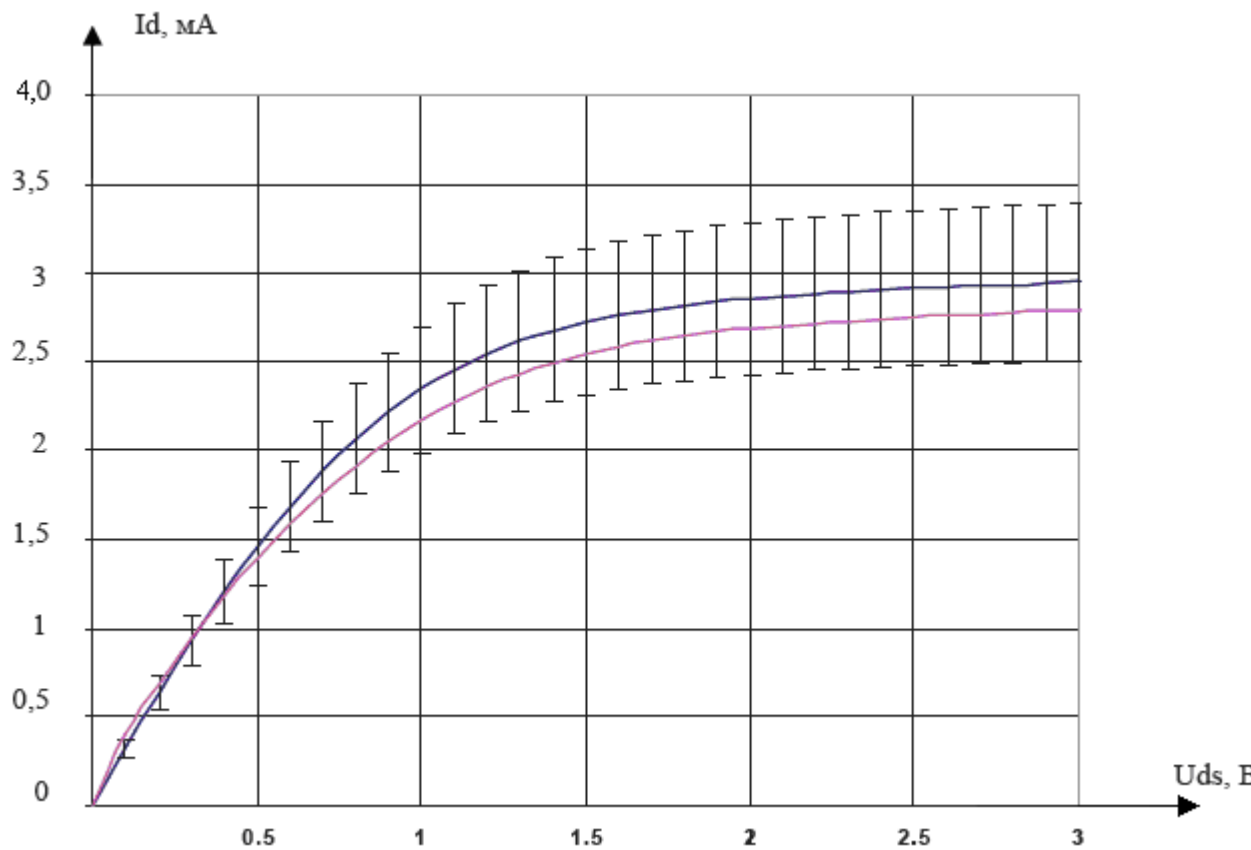


Рис. 2.3. К оценке точности температурной модели TCAD для выходной характеристике n-канального транзистора

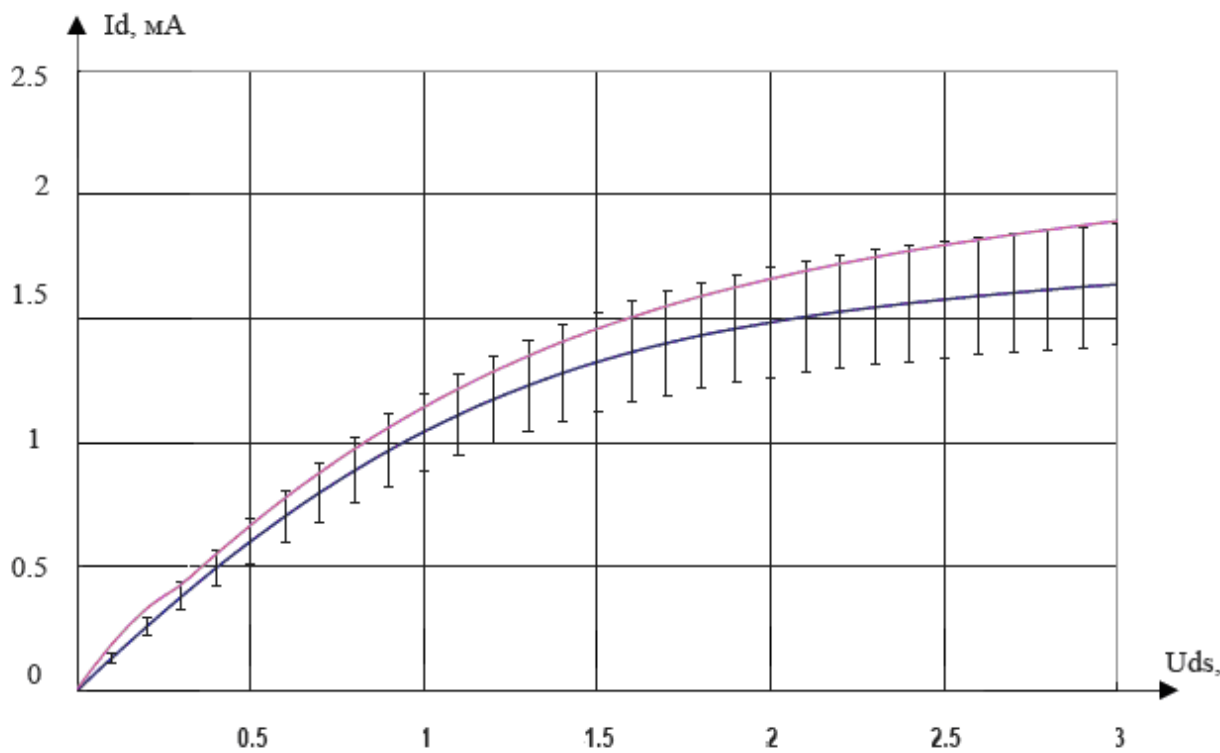


Рис. 2.4. К оценке точности температурной модели TCAD для выходной характеристике p-канального транзистора

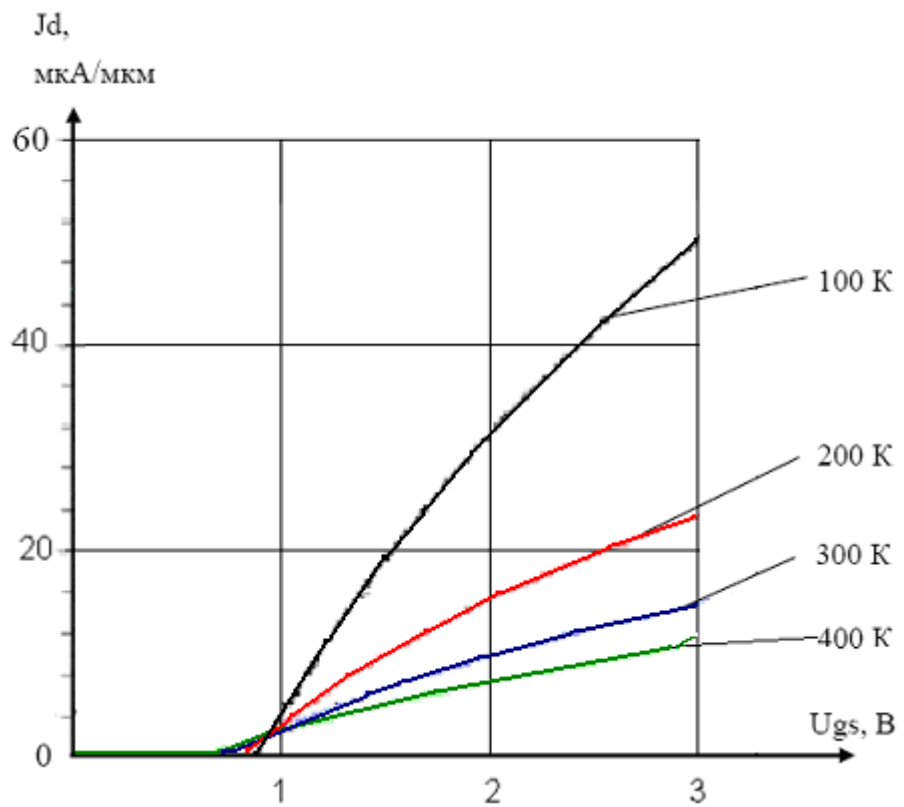


Рис. 2.5. Семейство пороговых характеристик р-канального транзистора с шириной затвора 0,5 мкм. Значения токов и напряжений взяты по абсолютной величине

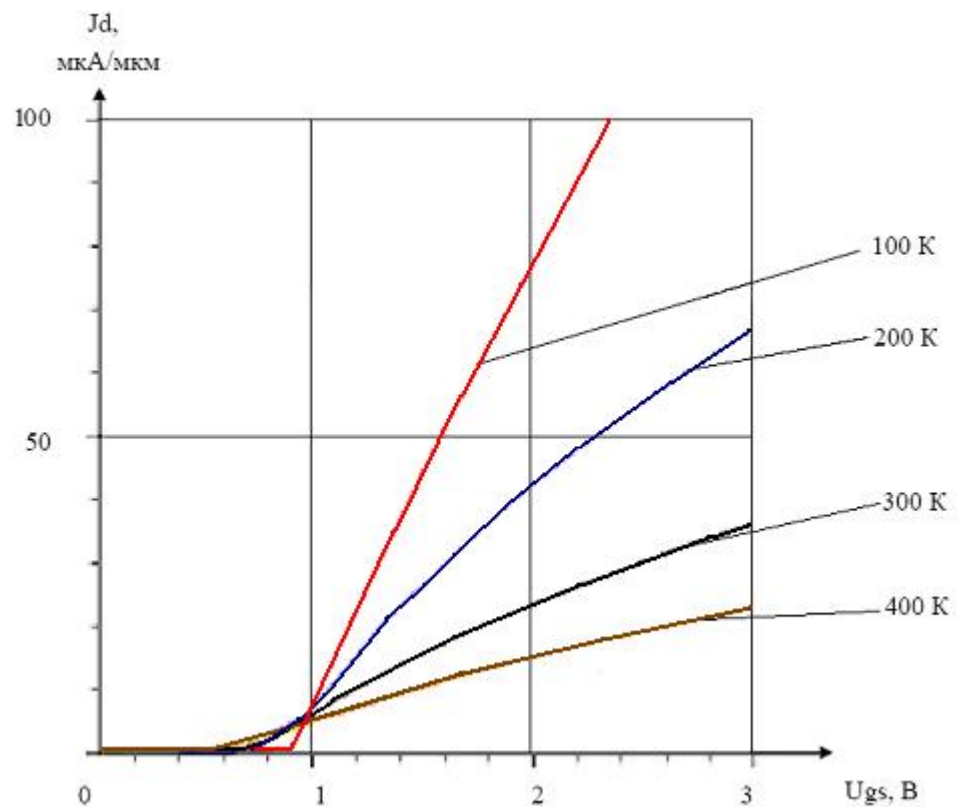


Рис. 2.6. Семейство пороговых характеристик п-канального транзистора с шириной затвора 0,5 мкм.

На основе таблицы значений порогового напряжения при различных температурах были построены графики зависимости порогового напряжения от температуры для р-канального и n-канального транзисторов. Эти графики представлены на рисунках 2.7 и 2.8.

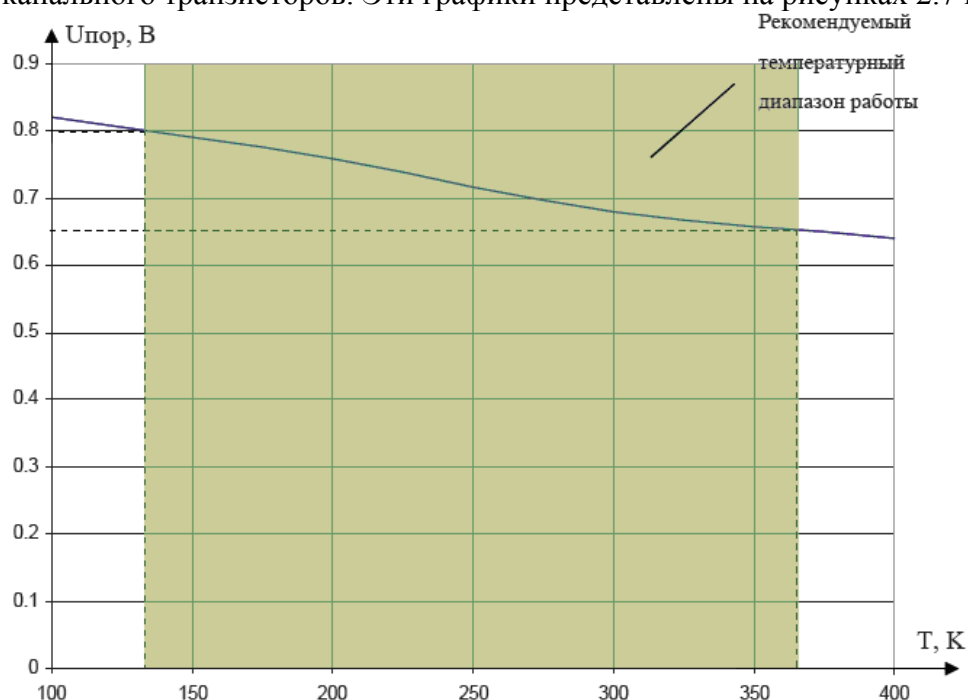


Рис. 2.7. Зависимость абсолютного значения порогового напряжения р-канального транзистора с шириной затвора 0,5 мкм от температуры

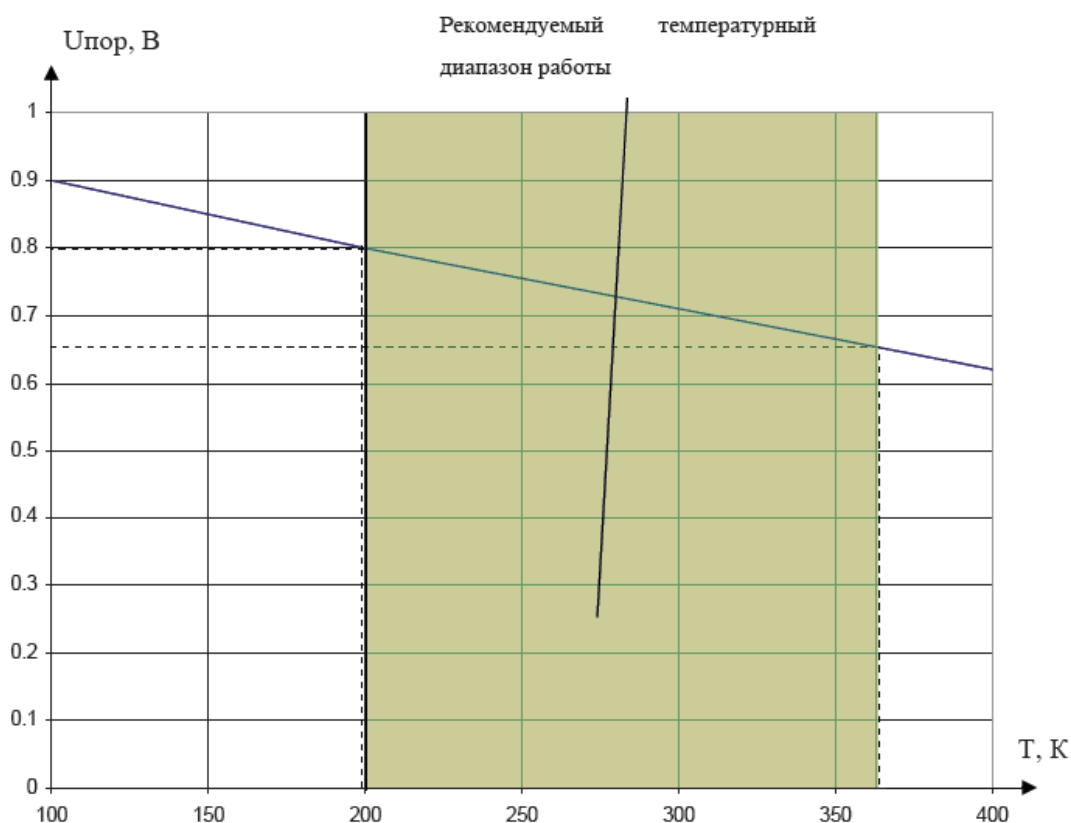


Рис. 2.8. Зависимость порогового напряжения n-канального транзистора с шириной затвора 0,5 мкм от температуры.

Как видно из графиков на рис. 2.7 и 2.8, абсолютное значение порогового напряжения уменьшается с увеличением температуры. Это происходит из-за увеличения концентрации неосновных носителей в кармане полевого транзистора, что облегчает условия

формирования проводящего канала, и индуцированный канал возникает при меньшем напряжении на затворе. Учитывая, что пороговое напряжение при обычных условиях для технологии с проектными нормами 0,5 мкм обычно предполагается равным 0,7 В для транзисторов такого типа, становится очевидно, что температурный диапазон работы микросхемы следует ограничить. При высоких температурах КМОП-структуры практически теряют те свойства, благодаря которым они нашли применение в современном производстве интегральных микросхем. На практике допускается изменение порогового напряжения в пределах 0,65 .. 0,8 В. Это соответствует на графике температурному диапазону 200...370 К (от - 73 до 97 °С) для n-канального и 140 ...360 К (от -133 до 87 °С) для p-канального. Следовательно для определения рекомендуемого температурного диапазона работы интегральной микросхемы, нужно выбрать пересечение температурных диапазонов работы r-канального и n-канального транзисторов. В результате получим температурный диапазон от -73 до +87 °С.

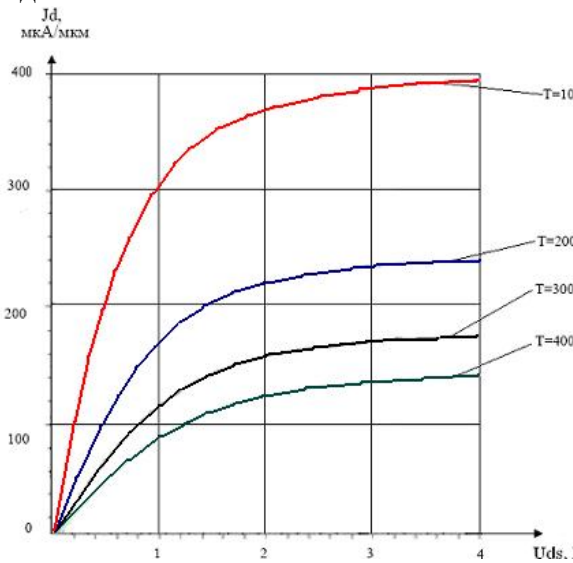


Рис. 2.9. Семейство выходных характеристик r-канального транзистора с шириной затвора 0,5 мкм. Значения токов и напряжений даны по абсолютной величине

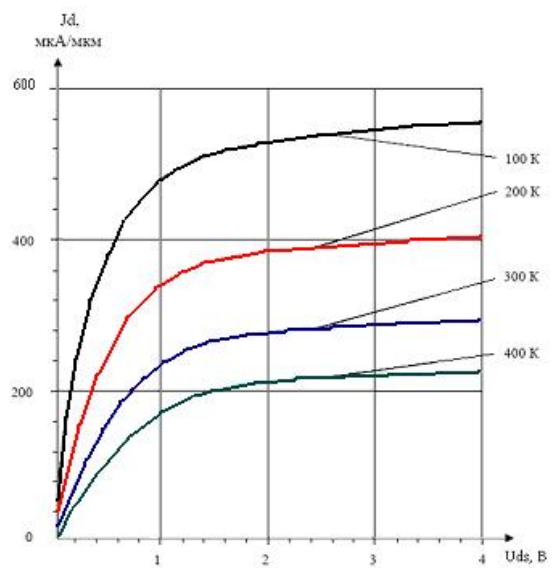


Рис. 2.10. Семейство выходных характеристик n-канального транзистора с шириной затвора 0,5 мкм

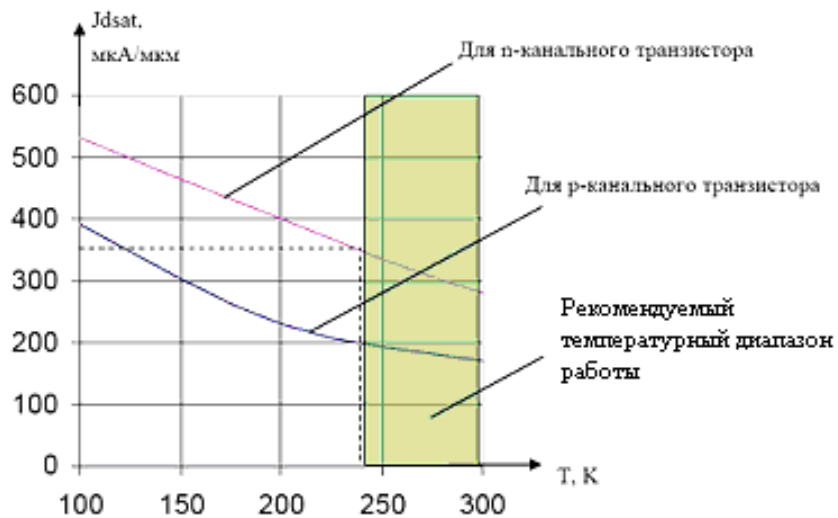


Рис. 2.11. Зависимости токов насыщения от температуры для r-канального и n-канального транзисторов с шириной затвора 0,5 мкм.

Аналогичным образом было построено семейство выходных характеристик транзисторов при напряжении на затворе 3,3 В. Ток насыщения определялся как ток, при

котором напряжение на стоке равно 3,3 В. Семейства выходных характеристик р-канального и п-канального транзисторов построены на рисунках 2.9 и 2.10. Из рисунков 2.9 и 2.10 видно, что ток стока имеет высокую чувствительность к колебаниям температуры. Это связано с изменением как пороговых свойств транзистора, так и с изменением подвижности носителей в канале. При низких температурах подвижность носителей значительно выше, чем и объясняется высокие значения тока насыщения при $T=100$ К.

Приведенный ток насыщения в соответствии с техническими требованиями не должен превышать 350 мкА/мкм. Для проверки температурного диапазона на выходной характеристике требуется построить зависимости токов насыщения для р-канального и п-канального транзистора. На рис. 2.11 приведены эти характеристики, которые показывают, что нижнюю границу температурного диапазона работы рекомендуется поднять до 240 К (-33 °С).

2.2. Эффект саморазогрева в КНИ-структурах с шириной затвора 0,35 мкм

При протекании больших токов через КНИ-структуру из-за плохой теплопроводности скрытого КНИ-оксида температура активной области транзистора повышается, что меняет электрические характеристики транзистора. Первый результат моделирования в TCAD показало, что перегрев может достигать 70 - 80 °С при $U_{gs} = U_{ds}=3.5$ В.

На рисунке 2.12 цветом показано распределение температуры в транзисторе, а на рис. 2.13 – распределение температуры в вертикальном разрезе Б.

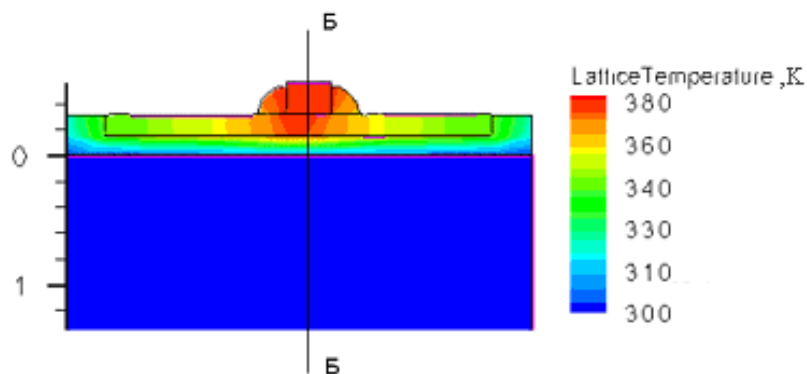


Рис. 2.12. Диаграмма распределения температуры в транзисторе

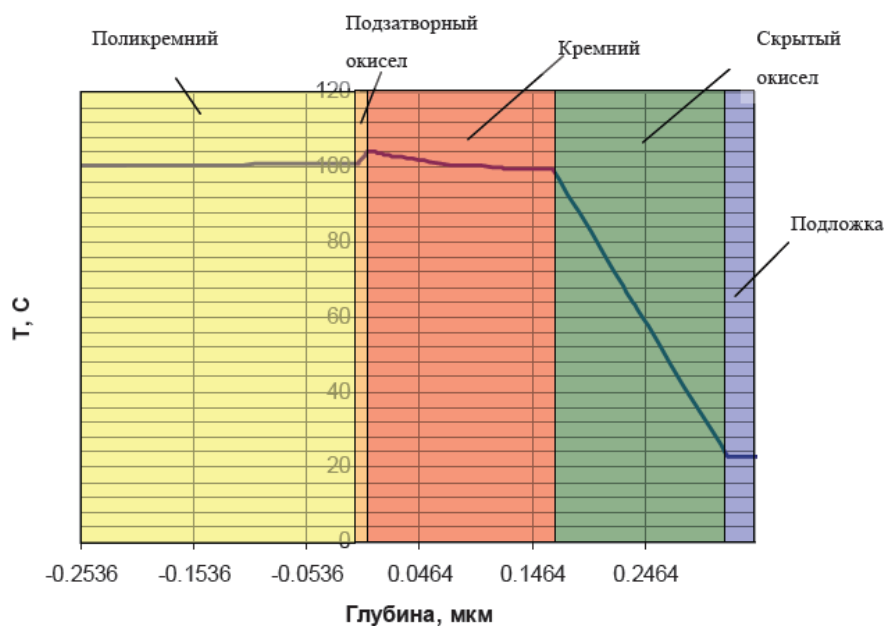


Рис. 2.13. Распределение температуры в сечении Б

Как видно из рис. 2.13, наибольшее тепловыделение происходит в активной области транзистора (На нее приходится максимальное значение температуры – 104 °С). Слой окисла обладает малой удельной теплопроводностью, что отражается на крутизне графика распределения температуры в толще окисла.

К саморазогреву наиболее чувствителен n-канальный транзистор. Это связано с двумя причинами. Во-первых, через n-канальный транзистор протекают большие токи, чем через p-канальный в 1,5 – 2 раза. Во-вторых, подвижность электронов (являющихся основными носителями в n-канальном транзисторе) более чувствительна к изменениям температуры, чем подвижность дырок.

На рисунке 2.14 приведено семейство выходных характеристик n-канального транзистора, построенных в TCAD с учетом эффекта саморазогрева (пунктирные линии) и без учета эффекта саморазогрева (сплошные линии).

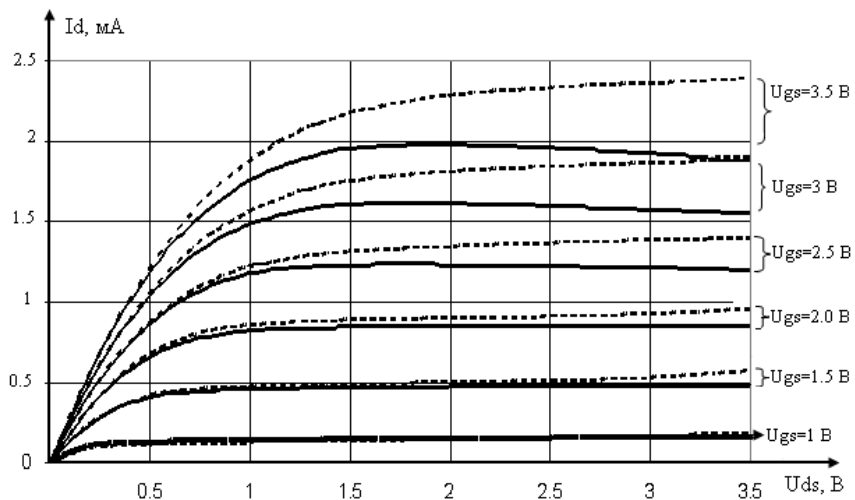


Рис. 2.14. Выходные характеристики n-канального КНИ МОП-транзистора. Сплошные линии – рассчитаны с учетом эффекта саморазогрева, пунктирные – без учета саморазогрева

В соответствии с рис. 2.14 при больших токах, протекающих через транзистор, ток при разогреве области канала начинает уменьшаться из-за уменьшения подвижности носителей в канале.

Падение температуры, которое приходится на толщу окисла, можно приблизительно оценить по формуле (Принимая теплопроводность окисла равной $\mu=0,014$ Вт/(см*К) – по умолчанию заложена в САПР TCAD, толщина окисла – $l=0,15$ мкм, площадь транзистора – $S=3.5 \times 3$ мкм²):

$$\Delta T = \frac{1}{\mu} \frac{l}{S} I_d U_{ds} = \frac{0,15 \cdot 10^{-4} \cdot 0,002 \cdot 3,3}{0,014 \cdot 3,5 \cdot 10^{-4} \cdot 3 \cdot 10^{-4}} = 67^{\circ}C, \quad \text{что хорошо соотносится с}$$

перепадом температур в окисле (см. рис. 2.13), полученным в результате моделирования – $100-23=77^{\circ}C$.

2.3. Определение порядка величины связанного положительного заряда в захороненном окисле КНИ-структуры

Экспериментально установлено, что заряд, накопленный в окисле, может сформировать паразитный МДП-транзистор и сыграть в нем роль затвора. Варьируя величину связанного заряда, определим его величину, при которой открывается паразитный транзистор.

Будем считать, что связанный заряд, полученный в результате радиационного облучения КНИ МОП-структуры, распределен в скрытом окисле равномерно в некоторой прямоугольной области. (рис. 2.15.)

На рис 2.15 показаны 1 - Поликремниевый затвор; 2 - Карман КНИ-транзистора; 3 - Область скрытого окисла; 4 - Область накопленного заряда в скрытом окисле; 5 – Подложка; 6 – области стока и истока; 7 – Область основного канала; 8 – область паразитного канала.

Наиболее важными электрическими характеристиками, по которым можно оценить влияние накопленного положительного заряда на протекание токов через КНИ МОП-транзистор, являются пороговые характеристики. Их построение и будет проиллюстрировано ниже.

Методика расчета такова: при различных значениях заряда в окисле проводится расчет пороговых характеристик. Постараемся максимально приблизить процесс моделирования к реальным условиям. Это значит, что процесс моделирования нужно проводить во временной области, так как облучение радиационной структуры происходит не мгновенно, а в течение некоторого временного интервала. С этой целью разобьем весь процесс моделирования на следующие временные подинтервалы, что, как показывает практика, позволяет улучшить сходимость Ньютоновских итераций и сократить время моделирования без потери точности:

1. $t = 0 \dots 1$ сек. – В этом временном интервале изменяется напряжение сток-исток U_{ds} от 0 до 0,1 В. Данный временной интервал является вспомогательным и необходим для формирования выбранного уровня напряжения на стоке, для которого осуществляется расчет пороговой характеристики;

2. $t = 1 \dots 2$ сек – Внутри этого временного интервала напряжение затвор-исток U_{gs} изменяется от 0 до 3,3 В. Фиксируя значение тока стока при каждом значении напряжения на затворе, осуществляем построение пороговой характеристики структуры до радиационного облучения;

3. $t = 2 \dots 3$ сек – На этом временном интервале напряжение U_{gs} изменяется от 3,3 до 0 В. Данный временной интервал является вспомогательным и необходим для возвращения КНИ-транзистора в исходное состояние перед началом процесса облучения;

4. $t = 3 \dots 4$ сек – На этом временном интервале связанный заряд в диэлектрике q изменяется от 0 до $q_{зад}$, где $q_{зад}$ - выбранная пользователем величина заряда в процессе моделирования. Этот временной интервал имитирует накопление положительного заряда в скрытом окисле при радиационном облучении структуры. На этом интервале изменение тока стока КНИ-транзистора дает представление о том, как изменяются характеристики транзистора при появлении положительного заряда в скрытом окисле;

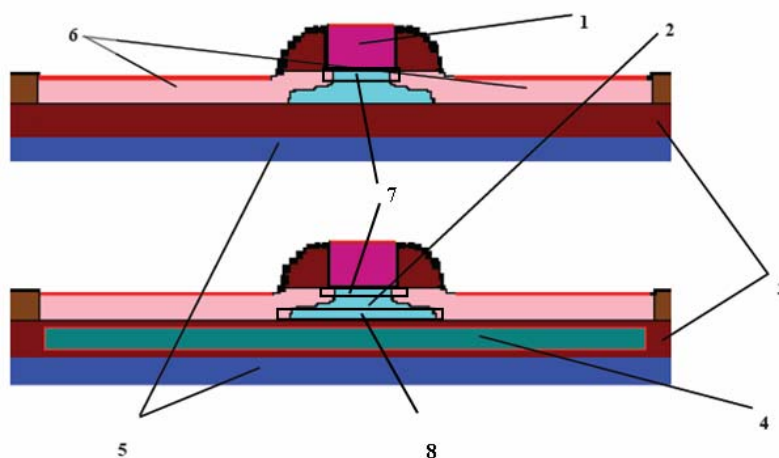


Рис. 2.15. К процессу формирования области положительного заряда в скрытом окисле КНИ МОП-транзистора. В верхней части рисунка – исходная структура до облучения, в нижней части – с областью накопленного заряда (после облучения)

5. $t = 4 \dots 5$ сек – Внутри этого временного интервала напряжение U_{gs} изменяется от 0 до 3,3 В. Этот временной интервал позволяет определить пороговую характеристику КНИ-транзистора с накопленным зарядом в скрытом окисле.

В течении всего времени моделирования напряжение на подложке остается постоянным и равным 0 В.

Величина накопленного положительного заряда $q_{зад}$ при расчете варьировалась в пределах от 10^{-16} до 10^{-11} Кл.

Результаты моделирования во временной области представлены в виде таблицы 2.1.

Поскольку при моделировании в системе TCAD изменение порогового напряжения U_{gs} , происходило во времени по линейному закону, то форма кривой на интервалах 1..2 и 4..5 представляет собой пороговую характеристику КНИ-транзистора до и после облучения соответственно. В этом случае сравнивая графики функции на этих интервалах, можно судить о влиянии радиационного излучения на пороговые характеристики КНИ-транзистора.

Чтобы выявить механизм воздействия накопленного положительного заряда на ток, протекающий через КНИ-транзистор, рассчитаем с помощью системы TCAD для случая $q_{зад} = 10^{-13}$ Кл распределение плотности отрицательного заряда в области кармана облученной КНИ-структуры (рис. 2.16).

Таблица 2.1. Влияние накопленного заряда в окисле на характеристики транзистора

$q_{зад}, Кл$	Временное изменение тока стока КНИ-транзистора	Примечания
10^{-14}		Накопленный заряд 10^{-14} Кл не изменяет электрические характеристики n-канального КНИ МОП-транзистора
10^{-13}		При этом значении накопленного заряда ток стока существенно изменяется. Его величина при $U_{ds}=0,1 В$ и $U_{gs}=3,3 В$ составляет $14 \times 10^{-5} А$, что в 3 раза больше аналогичной величины до облучения

На рисунке 2.16 выделены цветом: 1 – область канала транзистора, 2 – область стока, 3 – область истока. Наибольший интерес представляет собой область 4, в которой, как

показывают результаты моделирования, возникает область повышенной концентрации электронов, что позволяет говорить о появлении в транзисторе второго – паразитного – канала. В этом случае суммарный ток стока складывается из двух составляющих: тока, основного канала транзистора и тока паразитного канала.

Результаты проведенного моделирования показали, что уже при величине накопленного заряда в окисле порядка 2×10^{-14} Кл в типовой КНИ МОП-структуре формируется паразитный канал.

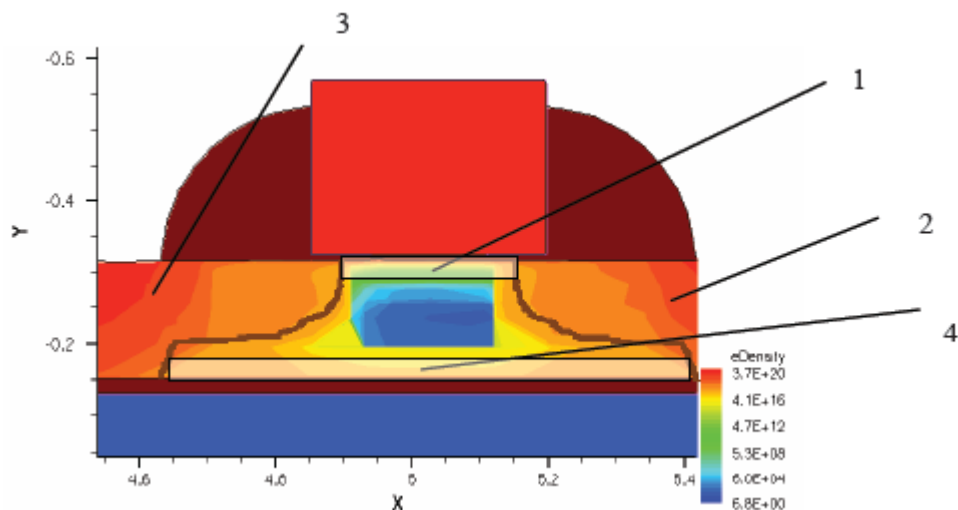


Рис. 2.16. Распределение плотности отрицательного заряда в КНИ МОП-транзисторе после радиационного облучения при $U_{gs} = 0,1$ В

Таким образом, ток стока облученного КНИ-транзистора складывается из токов двух каналов – основного и паразитного. Паразитный канал формируется в результате накопления в скрытом окисле положительного заряда под воздействием ионизирующего радиационного излучения. Полученные в ходе моделирования результаты показали, что паразитный канал КНИ-транзистора открывается при величине накопленного заряда в окисле порядка 2×10^{-14} Кл. Поскольку в эксперименте значение тока стока после радиационного облучения дозой 200 кРад при напряжении на стоке в $3,3$ В менялось в $1,5 - 2$ раза, можно предположить, что величина накопленного заряда в скрытом окисле КНИ-структуры находится в пределах $10^{-14} \dots 10^{-13}$ Кл. Эти данные использовались при проверке корректности моделей радиационной стойкости, заложенных в TCAD.

2.4. Исследование поведения транзистора в двух режимах облучения

Экспериментально было обнаружено, что последствия от воздействия радиационного излучения определяются не только накопленной дозой, но и режимом, в котором находился транзистор во время облучения.

Транзисторы облучались в двух режимах: $U_{ds}=0$ $U_{gs}=3$ В и $U_{ds}=3$ В, $U_{gs}=0$. При этом оказалось, что в первом режиме наблюдается более выраженное изменение пороговых характеристик. Второй режим работы оказался более щадящим.

Для объяснения этого явления в системе TCAD было промоделировано двумерное распределение связанного электрического заряда в скрытом КНИ-окисле.

На рис. 2.17 представлено распределение положительного заряда в окисле после облучения дозой 500 кРад в двух режимах $U_{ds}=0$ $U_{gs}=3$ В и $U_{ds}=3$ В, $U_{gs}=0$

На рисунке 2.18 приведено распределение захваченного заряда вдоль границы окисла (сечение А-А), а на рисунках 2.19 и 2.20 – перпендикулярные ему сечения от области максимальной концентрации заряда в сторону стока и истока для режима $U_{ds}=3$ $U_{gs}=0$ В

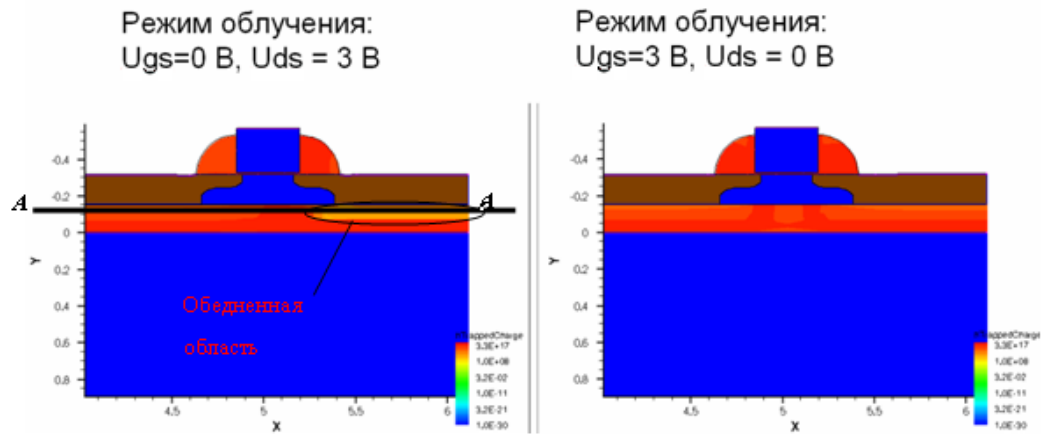


Рис. 2.17. Двумерное распределение положительного накопленного заряда в скрытом окисле.

Как видно из рисунков 2.17 – 2.19, в первом случае под областью стока концентрация заряда резко убывает.

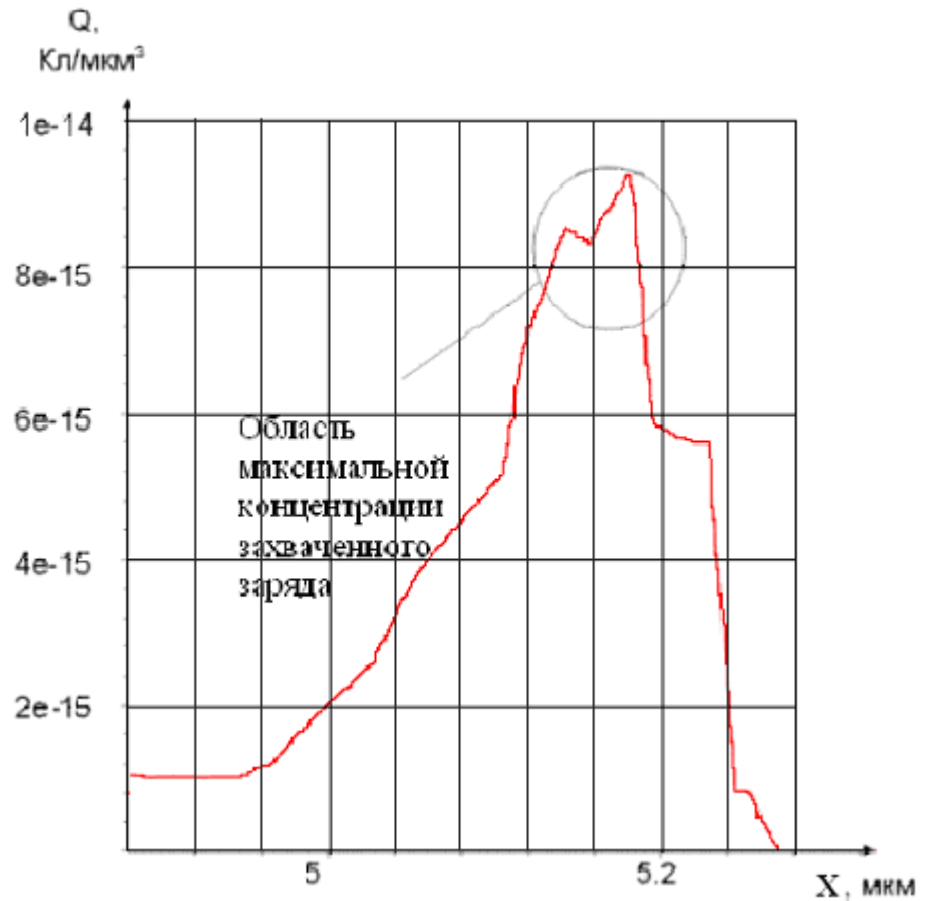


Рис. 2.18. Распределение захваченного положительного заряда вдоль границы окисла (сечение А-А, область канала)

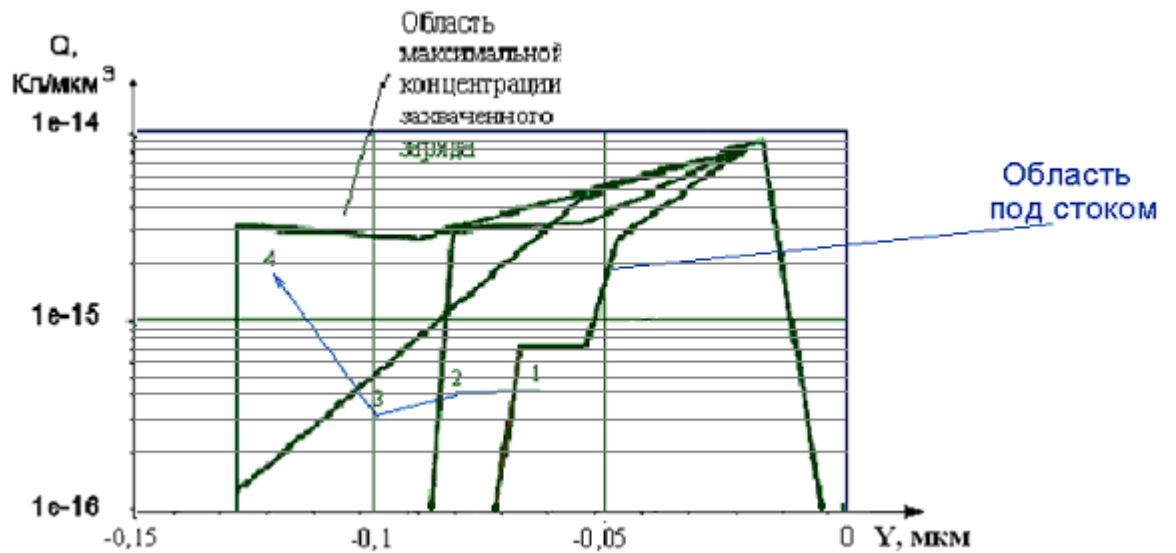


Рис. 2.19. Распределение связанного положительного заряда в вертикальных сечениях от области максимальной концентрации захваченного заряда до обедненной области под стоком ($U_{ds}=3$ В, $U_{gs}=0$ В)

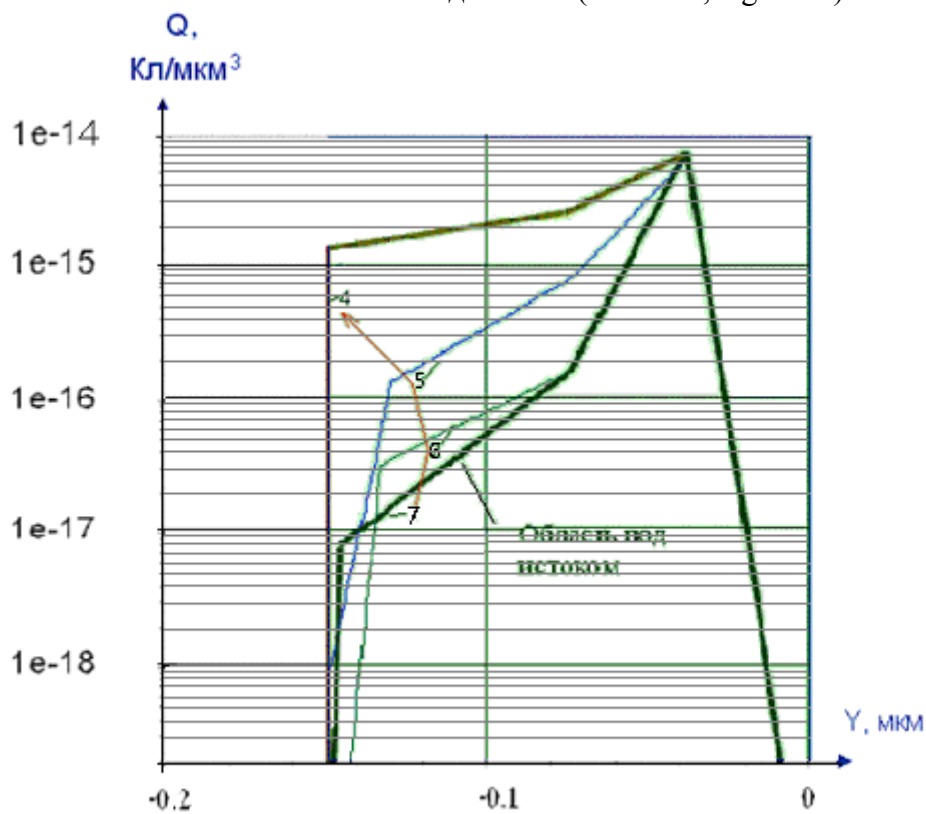


Рис. 2.20. Распределение связанного положительного заряда в вертикальных сечениях от области его максимальной концентрации до области под истоком ($U_{ds}=3$ В, $U_{gs}=0$ В)

Это связано с тем, что между стоком и истоком во время облучения существует положительное напряжение. Положительно заряженные дырки в электрическом поле начинают двигаться от стока, скапливаясь в области под каналом транзистора.

На рисунке 2.21 схематично изображено распределение заряда в скрытом окисле n-канального КНИ МДП-транзистора в режиме $U_{ds}=3$ В, $U_{gs}=0$ В.

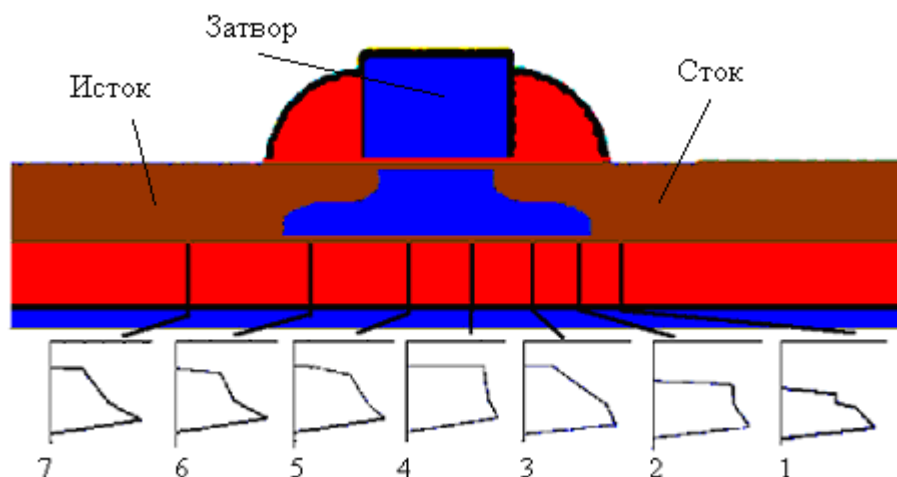


Рис. 2.21. Распределение связанного положительного заряда n-канального КНИ МДП-транзистора по толщине скрытого окисла в различных вертикальных сечениях при $U_{ds}=3\text{ В}$, $U_{gs}=0\text{ В}$

Во втором случае наблюдается симметричное распределение примеси. Напряжение сток-исток равно нулю, и движение дырок происходит менее активно, что приводит к меньшей концентрации дырок под каналом и меньшей концентрации захваченного заряда.

Выводы

Моделирование показало, что температура и радиационное излучение оказывают влияние на параметры МДП-транзистора.

При изменении температуры меняются положение равновесных уровней Ферми и подвижность носителей в канале, что приводит к существенному изменению электрических характеристик МДП-транзистора – изменению порогового напряжения, тока насыщения.

Дана оценка воздействию дестабилизирующих факторов на электрические характеристики и выработаны рекомендации к условиям эксплуатации для транзисторов с шириной затвора 0,5 и 0,35 мкм.

Показано, что в КНИ-транзисторе при протекании больших токов ярко выражен эффект саморазогрева. Перепад температур между активной частью транзистора и подложкой может достигать 40 °С. Увеличение температуры влечет за собой уменьшение подвижности носителей в канале, что приводит к уменьшению тока, протекающего через канал транзистора.

Расчет радиационной стойкости показал, что сопротивление области резистора растет с ростом дозы ионизирующего излучения. При дозе 500 кРад сопротивление p^+ -области выросло на 17 %. Это объясняется обеднением носителями заряда области резистора

Как показывают результаты расчета, сопротивление кармана транзистора убывает также при подаче на затвор n-канального транзистора положительного смещения. При напряжении на затворе 3,3 В сопротивление кармана уменьшается примерно в 2 раза.

Следует отметить и еще один важный результат работы – на электрические характеристики транзистора также влияет режим, в котором происходит его радиационное облучение. При высоком напряжении на стоке транзистора происходит перемещение дырок, образовавшихся в скрытом окисле в процессе ионизации, в область окисла под каналом транзистора и интенсивному их захвату ловушками, что создает в нижней части транзистора условия для формирования второго – паразитного – канала. При малых напряжениях сток-исток столь сильного перемещения дырок в окисле не наблюдается и эффект паразитного канала выражен гораздо слабее.

3. Разработка методики моделирования КМДП-структур в САПР TCAD

Моделирование физических процессов, протекающих в полупроводниковых интегральных микросхемах, состоит из нескольких этапов. Среди них можно выделить следующие:

Качественное описание физических процессов;

Построение математической модели процессов (Составление системы дифференциальных уравнений в частных производных);

Дискретизация уравнений. Переход от системы дифференциальных уравнений в частных производных к системе нелинейных алгебраических уравнений, неизвестными в которых являются интересующие нас параметры. Такой переход выполняется с помощью метода конечных элементов или метода конечных разностей;

Решение полученной системы нелинейных алгебраических уравнений модифицированным методом Ньютона

Такая схема используется в и в системе конструктивно-технологического моделирования TCAD.

Одна из основных проблем, с которой сталкивается оператор, - проблема сходимости решения нелинейной системы. В самых простых случаях, когда нужно получить выходную или пороговую характеристику при нормальных условиях процесс моделирования завершается, как правило, без ошибок, и нарушения сходимости не наблюдается. Иначе обстоит дело при расчете на температурные воздействия, при применении более сложных физических моделей, а также при расчете радиационной стойкости. В этом случае сходимость метода Ньютона может нарушиться, и программа завершит работу с ошибкой.

Таким образом можно потерять массу времени не имея никакой гарантии, что будет достигнут положительный результат. Особенно это часто бывает при трехмерном моделировании структур, где количество узлов сетки конечных элементов в сотни раз больше, чем при двумерном моделировании и временные затраты в сотни раз увеличиваются. Кроме этого для получения трехмерного профиля также нужна методика, которая упростит его генерацию и последующее моделирование.

Ниже будут представлены основные приемы, которые позволяют решить вышеуказанные проблемы и избежать больших временных потерь.

3.1. Квазистационарное моделирование. Модель вычислений в TCAD

Все вычисления в TCAD можно разделить на две группы: вычисления квазистационарного типа и вычисления во временной области.

Вычисления квазистационарного типа представляют собой построение зависимости токов от напряжений в некоторой последовательности точек без учета переходных процессов, которыми сопровождается любое изменение тока и напряжения. Существует лишь абстрактная временная ось, представленная отрезком от 0 до 1, при этом нулю соответствует началу процесса моделирования, а 1 – его завершению. Этот тип вычислений наиболее прост для анализа и наиболее часто сопровождается нарушением сходимости.

Вычисления во временной области – наиболее полно описывают изменение параметров с учетом длительности всех временных интервалов, на которых меняются величины напряжений и токов. Этот вид вычислений наиболее подходит для расчета системы в динамике. В частности, именно этот тип вычислений применяется при моделировании радиационной стойкости, поскольку накопление дозы излучения – длительный физический процесс.

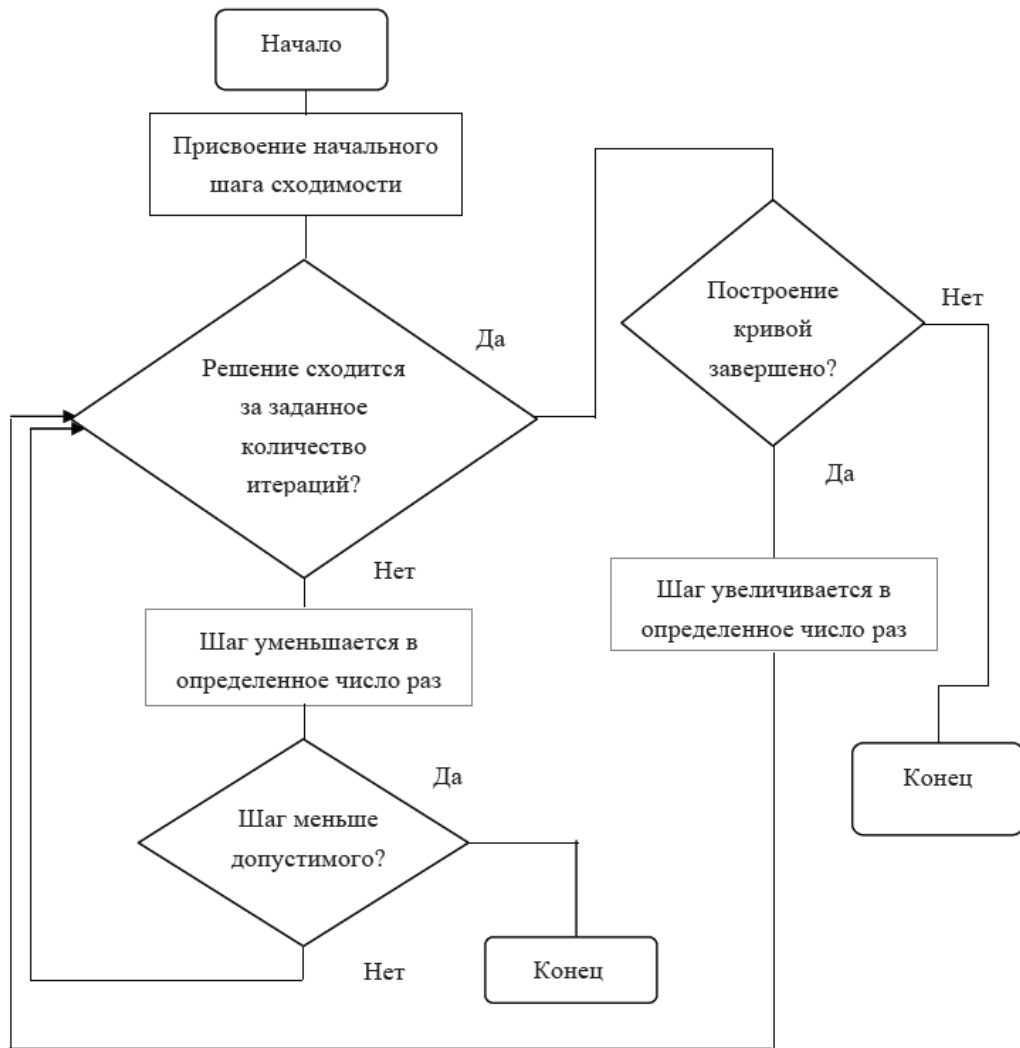


Рис. 3.1. Алгоритм применения метода Ньютона, заложенного в систему TCAD

При квазистационарных расчетах и расчетах во временной области выполняется решение системы нелинейных уравнений $\vec{g}(z) = 0$ методом Ньютона:

$$z_{j+1} = z_j + t \cdot (z_0 - z_j)$$

Здесь z_{j+1} , z_j – вектор-решение системы на $j+1$ -й и j -й итерациях соответственно, z_0 – решение уравнения касательной к поверхности $\vec{g}(z)$ в точке z_j .

Ньютоновские итерации в TCAD выполняются до тех пор, пока количество итераций не превысит некоторое число либо не будет выполнено условие:

$$\frac{1}{\varepsilon_R \text{Norm}} \sum_{i, EQ} \frac{|z(EQ, i, j) - z(EQ, i, j-1)|}{|z(EQ, i, j)| + z_{ref}(EQ)} < 1$$

Здесь ε_R – допустимая величина относительной ошибки расчета, Norm – произведение количества узлов сетки конечных уравнений на число решаемых дифференциальных уравнений EQ, $Z(EQ, i, j)$ – вектор-решение системы уравнений EQ в i -м узле после j -й итерации, величина $z_{ref}(EQ)$ задается пользователем и исключает возможность деления на близкое к нулю число.

Если за заданное число итераций указанное условие не выполняется, система уменьшает шаг сходимости и проводит повторную попытку к решению системы уравнений. Упрощенный алгоритм вычислений представлен на рис. 3.1.

При довольно сложных расчетах (особенно при расчете структуры на воздействия дестабилизирующих факторов или при 3D-моделировании) сходимость метода Ньютона может нарушаться. Это приводит либо к неприемлемо малым шагам сходимости (при которых полный расчет транзистора может исчисляться в лучшем случае месяцами), либо к вынужденной остановке приложения, которая происходит, когда шаг сходимости становится менее допустимого.

Для улучшения сходимости метода Ньютона при приемлемых шагах сходимости (а приемлемым можно считать шаг сходимости, равный $t=10^{-4}$) была написана программа на языке Си, в упрощенном виде имитирующая вычисления TCAD.

Анализ результатов «моделирования» вычислений в TCAD показал, что основная причина нарушения сходимости – неточные начальные приближения, которые определяются системой как результаты расчета в предыдущих точках кривой. Пользователь задает все параметры вычислений (количество итераций, начальный шаг сходимости т.д.) только вначале процесса моделирования и не может повлиять на процесс моделирования.

Система становится значительно более гибкой и управляемой пользователем, если весь процесс моделирования разбить на подпроцессы. Дело в том, что в начале каждого из подпроцесса пользователь может задать свои параметры расчета, а также может дать команду к решению только одного уравнения системы, что может привести систему к более точному начальному приближению.

Разбиение на подпроцессы поясним на примере.

Предположим, требуется построить зависимость тока стока полевого транзистора от напряжения затвор-исток в диапазоне от 0 до 3,3 В. В этом случае интервал изменения напряжения можно разбить на три подинтервала: от 0 до 1,1 В, от 1,1 до 2,2 В, от 2,2 до 3,3 В. Такое разбиение позволяет в процессе моделирования увеличить скорость сходимости, так как в начале каждого из подинтервалов происходит ее инициализация.

Количество подинтервалов может быть и большим. В этом случае точки разбиения выбираются экспериментально, но в местах нарушения сходимости их следует располагать чаще.

Кроме того, учитывая особенности квазистационарных вычислений, можно привести еще одно соображение, доказывающее улучшение сходимости. При разбиении каждый из подинтервалов изменения напряжения меньше всего интервала моделирования. Учитывая, что граничным значениям напряжения на каждом интервале ставятся в соответствие значения 0 и 1 внутреннего параметра TCAD t , приращение которого характеризует скорость сходимости, можно сказать, что при разбиении тому же приращению параметра t будет соответствовать меньшее приращение внешних условий (внешнего напряжения). Учитывая непрерывность физических процессов, можно сказать, что решение уравнения при данном напряжении будет ближе к решению уравнения при следующем значении внешнего напряжения, т.е. больше вероятность попадания начального приближения (которым является решение в данной точке) в окрестность наилучшей сходимости (где функция строго монотонна и имеет постоянную выпуклость) для последующего значения входного напряжения.

Указанные рекомендации были применены в системе TCAD для ряда процессов, которые ранее не удавалось завершить из-за их плохой сходимости. После применения рекомендаций по моделированию с применением разбиения на подинтервалы, моделирование в TCAD заняло всего несколько десятков минут, несмотря на то, что требования по точности вычислений предъявлялись более жесткие, чем прежде.

3.2. Определение точности вычислений. Выбор начального приближения

Пользователю часто приходится выбирать между точностью вычислений и производительностью системы. В предыдущем пункте на точность расчетов влияла в первую очередь переменная *Digits*, которая задается пользователем. По умолчанию эта переменная

равна $Digits=5$. Многочисленные расчеты в TCAD показали, что и этой точности бывает недостаточно.

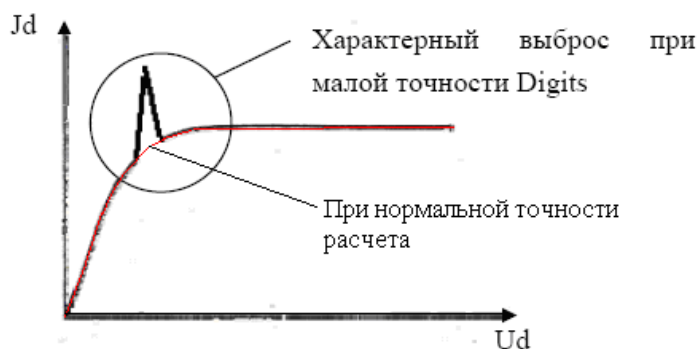


Рис. 3.2. Зависимость тока стока от напряжения сток-исток при малой точности $Digits$

Выбор точности приходится выполнять экспериментально, начиная с рекомендуемой по умолчанию. Если заданная точность для данного процесса моделирования мала, то зависимость тока от напряжения будет с характерными выбросами и изломами, как это показано на рис. 3.2. Повышение точности следует проводить до тех пор, пока не исчезнут все изломы с расчетных зависимостей тока от напряжения.

При изначально завышенной точности вычислений процесс расчета будет протекать значительно дольше, так как требования к сходимости будут более жесткие. С другой стороны, более высокая точность приводит к более точным начальным приближениям и, как следствие, улучшению процесса сходимости Ньютоновских итераций.

Выбор способа определения начального приближения – немаловажный фактор, влияющий на сходимость в TCAD. Система проектирования предлагает пользователю два способа определения начального приближения:

- Вычисление приближения как экстраполяция результатов, полученных в предыдущих двух рассчитанных точках рассчитанной кривой. Этот способ дает в ряде случаев (особенно для расчета монотонных кривых) более точное начальное приближение. Поэтому по умолчанию рекомендуется использовать этот способ.

- За начальное приближение принимается решение, полученное в предыдущей точке. Этот способ расчета подходит на тех участках вычисляемых кривых, где экстраполяция предыдущих решений дает неудачное начальное приближение. При последовательном разбиении на интервалы (которое будет рассмотрено ниже) замена способа определения начального приближения зачастую улучшает сходимость Ньютоновских итераций.

3.3. Скрипт для сохранения результатов расчета

До сих пор речь шла о разбиении процесса моделирования на подпроцессы экспериментальным путем.

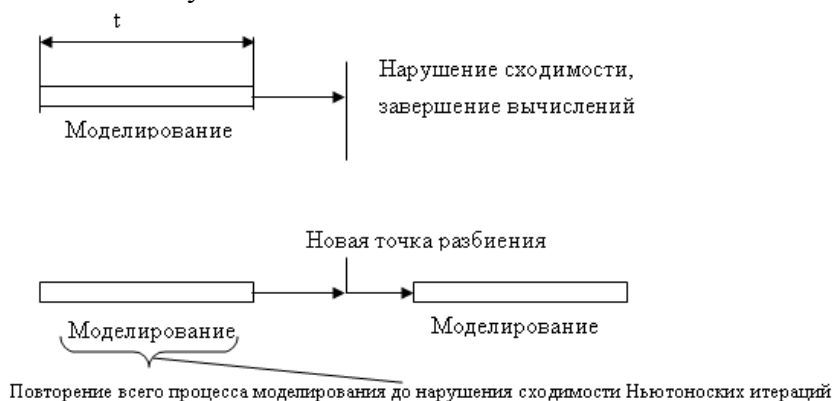


Рис. 3.3. Иллюстрация процесса разбиения интервала моделирования на подинтервалы. Временные потери при выборе точек разбиения методом проб и ошибок

То есть изначально моделируется весь интервал. В случае нарушения сходимости в некоторой точке пользователь прерывает процесс моделирования, добавляет эту точку как

точку разбиения и заново запускает весь расчетный процесс (поскольку при прерывании процесса не произошло сохранения начального приближения). Схематично расчет представлен на схеме рис. 3.3. Такой метод расчета можно принять в случае двумерного моделирования, если пользователь уверен, что больше разбивать процесс моделирования на подпроцессы не придется (А в двумерном варианте это часто бывает).

Однако этот подход приводит нас к потерянному времени. Если последовательно искать точки разбиения, то количество потерянного времени возрастет, так как все предыдущие отрезки моделирования придется повторять на каждой новой точке разбиения. Общее количество потерянного времени может быть выражено соотношением:

$$t = \sum_{i=1}^n [t_i \cdot (n - i + 1)],$$

где n – общее количество интервалов разбиения, при котором был бы достигнут результат моделирования, t_i – время, затраченное на моделирование i -го интервала.

Как видно из формулы при возрастании числа интервалов разбиения возрастает количество потерянного времени. А если проводится моделирование 3D-структуры, где время каждого интервала t_i в сотни раз увеличивается по сравнению с двумерным, то потерянное время может исчисляться несколькими часами и даже сутками.

Если можно было бы сохранять решение в последней точке для возобновления вычислений, то достаточно было бы переименовать файл, в который записывается решение, и можно было бы без каких-либо потерь данных и времени продолжить расчет структуры.

Поскольку нас интересует подробная информация только о последней точке вычислений (значения напряжений и токов в других точках записываются в другой файл), то достаточно просто хранить решение в последней удачно рассчитанной точке. В этом случае если нарушилась сходимость, то пользователь может принудительно прервать процесс вычислений, скорректировать параметры итераций (рекомендации даны в следующем пункте) и запустить процесс вычислений заново.

Реализуется подобный способ путем добавления в скрипт дополнительных инструкций, предусмотренных разработчиками САПРа для *однократного* сохранения параметров, но также позволяющим сохранять параметры при каждом удачном выполнении цикла:

```
Transient (InitialTime=0 FinalTime=1)
  { Coupled {Poisson Electron Hole} *Решаем в данной точке систему уравнений:
  Пуассона,
  *непрерывности для электронов и непрерывности для дырок
  Save(FilePrefix="Savefilename") *Внутри тела цикла сохраняем
  (перезаписываем)
  * в файл с именем Savefilename результаты расчета в последней точке
  кривой
  }
```

Тогда при нарушении сходимости в точке t_0 , можно будет скорректировав скрипт следующим образом без каких-либо потерь информации продолжить вычисления

```
Load (FilePrefix="Savefilename") *загрузка начального приближения
Transient (InitialTime=t0 FinalTime=1)
  { Coupled {Poisson Electron Hole}
  Save(FilePrefix="Savefilename1")
}
```

Здесь нужно обратить внимание на то, что пришлось немного изменить имя файла сохранения. Это следует делать, так как система TCAD перед началом выполнения цикла уточняет решение и перезаписывает его в файл сохранения. Это означает, что если

уточнение пройдет неудачно, то файл загрузки (который является одновременно и файлом сохранения) испортится, и данные будут потеряны.

Означает ли это то, что в каждой последующей точке разбиения придется сохранять данные в файл с новым именем? Вовсе нет. Просто-напросто в следующей точке можно воспользоваться файлом Savefilename вновь для сохранения, а файлом Savefilename1 – для загрузки. Или пользоваться другими именами файлов, удаляя ненужные уже файлы для экономии места на жестком диске.

Выводы

Разработана новая методика моделирования в TCAD, которая позволила улучшить сходимость Ньютоновских итераций и значительно сократить время расчетов при трехмерном моделировании МДП-транзисторов.

Предложен способ разбиения на подинтервалы, позволяющий ускорить процесс моделирования сходимости без снижения точности.

Предложен и обоснован алгоритм вычислений, при котором результат в последней рассчитанной точке кривой сохраняется в файл и может быть использован для продолжения процесса моделирования в случае нарушения сходимости, что существенно экономит временные затраты.

Заключение

Переход на технологию КНИ с минимальными проектными нормами 0,35 мкм позволило создавать схемы с более высокой плотностью размещаемых элементов. Однако наиболее точный расчет структур с субмикронными размерами возможен только при помощи современных систем конструктивно-технологического моделирования TCAD, позволяющих связывать характеристики структуры с технологией их изготовления.

Рассчитанные характеристики транзистора и сравнение результатов моделирования с результатами эксперимента показали, что система TCAD позволяет достаточно точно (погрешность не более 15%) моделировать электрические характеристики транзисторов как при нормальных условиях эксплуатации, так и при температурных воздействиях. Получен рекомендуемый диапазон работы. Рекомендуемый температурный диапазон работы КНИ-транзистора – от минус 30 °С до +80 °С

С использованием TCAD было получено семейство выходных характеристик КНИ-транзисторов с учетом эффекта саморазогрева. Поскольку теплопроводность захороненного окисла изначально была неизвестной, а литературные источники указывают на широкий диапазон колебаний этой величины, ее подбор был произведен на основе расхождения между расчетными и экспериментальными данными. Такой подбор позволил с учетом саморазогрева снизить расхождение между экспериментом и расчетом до 5%.

Один из важнейших результатов работы стали распределения связанного заряда в скрытом окисле КНИ-структуры, позволяющие объяснить зависимость электрических параметров МДП-транзистора от режима, в котором происходило его радиационное облучение. При высоком напряжении на стоке транзистора происходит перемещение дырок, образовавшихся в скрытом окисле в процессе ионизации, в область окисла под каналом транзистора и интенсивному их захвату ловушками, что создает в нижней части транзистора условия для формирования второго – паразитного - канала. При малых напряжениях сток-исток столь сильного перемещения дырок в окисле не наблюдается и эффект паразитного канала выражен гораздо слабее.

Наиболее важным результатом настоящей работы стала новая методика моделирования физических процессов в КНИ-структуре, позволяющая существенно снизить временные затраты по расчету сложных моделей. Сущность этой методики – разбиение процесса моделирования на подпроцессы, на каждом из которых шаг сходимости, точность расчета могут оставаться постоянными. Методика моделирования применена в расчетах транзисторов в TCAD и позволила сократить время расчета при более высокой точности в 4 раза.

Разработанная методика применялась как при исследовании радиационной стойкости, так и для расчета трехмерных КНИ-структур и дала в последнем случае почти десятикратный выигрыш во времени расчета (время расчета характеристик сократилось от нескольких суток до 5 – 6 часов). Построенное распределение потенциала вдоль ширины канала показывает, что перепад потенциала на всей области измерения не столь существен – в пределах 0,1 В (а открывание паразитного транзистора при напряжении на кармане порядка 0,7 В), что показывает эффективность применения сильнолегированных областей в качестве контактов к карману КНИ МДП-транзистора А-типа.

Список использованных источников

1. МОП СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов/Под ред. П. Антонетти, Д. Антониадиса, Р. Даттона, У. Оулдхема: Пер. с англ.– М.: Радио и связь, 1988.– 496 с.:ил.
2. Ферри Д., Эйкерс Л., Гринич Э. Электроника ультрабольших интегральных схем: Пер. с англ.– М.: Мир, 1991.– 327 с.: ил.
3. Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 630 с., ил.
4. Зебрев Г.И. Физические основы кремниевой наноэлектроники: Учебное пособие. – М.: МИФИ, 2008. – 288 с.
5. J. В. Куо, К.-W. Су. CMOS VLSI ENGINEERING Silicon-on-Insulator (SOI), 1998, Kluwer academic publishers, 287 - 290 pp.
6. Рындин Е.А. Методы решения задач математической физики: Учебное пособие. - Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003. - 119 с

СВЕДЕНИЯ

о студенте и его научном руководителе

Студент:

1. Фамилия – Глушко
2. Имя (полностью) – Андрей
3. Отчество (полностью) – Александрович
4. Курс – 6 курс
5. Адрес фактического места проживания – 105484, г. Москва, Сиреневый бульвар, дом 67, корп 2, кв. 21
6. Телефон (домашний, сотовый) – 8-(495)-464-55-22, 8-903-121-41-25
7. Адрес электронной почты – andrei19386@mail.ru

Научный руководитель:

1. Фамилия – Макаrchук
2. Имя (полностью) – Владимир
3. Отчество (полностью) – Васильевич
4. Место работы (полностью) – МГТУ им. Н.Э.Баумана, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., дом 5
5. Должность – доцент
6. Ученая степень – кандидат технических наук
7. Ученое звание – доцент
8. Адрес фактического места проживания – 105484, г. Москва, Сиреневый бульвар, дом 52, кв. 51
9. Телефон (рабочий, домашний, сотовый) – 8-(499)-263-65-53, 8-(495)-461-76-47, 8-916-188-90-16
10. Адрес электронной почты – vvmakarchuk@gmail.com

Научный руководитель : _____ (Макарчук В.В.)

Студент : _____ (Глушко А.А.)

О Т З Ы В

научного руководителя

Название работы: Разработка методики моделирования субмикронных МДП-транзисторов в системе TCAD.

Автор: Глушко А.А.

Научный руководитель: Макарчук В.В.

В представленной на конкурс научной работе ее автором - Глушко А.А.- решена актуальная на сегодняшний день задача разработки новой методики моделирования функциональных параметров МДП-структур, связанная с внедрением в процесс проектирования СБИС новой САПР конструктивно-технологического моделирования – системы TCAD.

Актуальность работы обусловлена тем, что в современных условиях при проектировании СБИС метод натурального эксперимента оказывается неприемлемым из-за значительных материальных и временных затрат. При этом численные методы расчета функциональных параметров МДП-структур, заложенные в САПР TCAD, не всегда обеспечивают сходимость, т.е. получение желаемого результата. Особенно это касается сложных расчетов, связанных с исследованием радиационной стойкости МДП-структур, изготовленных по КНИ-технологии.

Работа состоит из трех частей.

Первая часть посвящена изложению теоретических основ работы короткоканального МДП-транзистора, а также описанию физических эффектов, характерных для структур, изготовленных по КНИ-технологии.

Во второй части автором изложены результаты расчетов с помощью системы TCAD функциональных параметров МДП-транзисторов, изготовленных по КНИ-технологии в условиях температурных и радиационных воздействий.

Третья часть работы посвящена изложению той новой методики моделирования в САПР TCAD, которая была создана автором в процессе выполнения многочисленных расчетов с ее использованием.

Наиболее существенным результатом работы автора с точки зрения применения САПР TCAD, является разработка им алгоритма, обеспечивающего устойчивую сходимость процесса моделирования параметров МДП-структур с использованием модифицированного метода Ньютона, который ускоряет и сам процесс моделирования и создает возможность надежного хранения его промежуточных результатов, что особенно важно при расчетах трехмерных структур.

С использованием разработанной им новой методики автором представленной на конкурс работы с помощью САПР TCAD была выполнена целая серия расчетов, связанных с моделированием радиационной стойкости МДП-транзисторов. Наиболее важным результатом этих расчетов стало раскрытие механизма образования и накопления связанного заряда в скрытом окисле КНИ-структуры, позволившее объяснить изменения электрических параметров КНИ МДП-транзисторов от режима, в котором происходило их радиационное облучение.

Считаю необходимым отметить целеустремленность и настойчивость автора при решении возникавших в процессе выполнения настоящей работы проблем, его трудолюбие и упорство в достижении поставленной цели, а также способность к самостоятельной постановке и решению достаточно сложных инженерных и научных проблем.

Необходимо отметить, что результаты представленной работы внедрены в производство и используются в НИИСИ РАН при разработке нового поколения радиационно-стойких СБИС.

Считаю, что представленная на конкурс работа Глушко А.А. имеет определенное научное и, безусловно, большое практическое значение, а ее автор – достоин присвоения степени магистра техники и технологии.

(подпись руководителя)

« ____ » _____ 2009г.

А Н Н О Т А Ц И Я

научной работы

«Разработка методики моделирования субмикронных МДП-транзисторов в системе TCAD»

МГТУ им. Н.Э. Баумана

2009г.

Работа посвящена особенностям моделирования субмикронных МДП-транзисторов в системе TCAD. В процессе ее выполнения было проведено моделирование воздействия температуры и радиации на структуры, изготовленные по КНИ-технологии. Выработаны рекомендации по оптимизации процесса моделирования в САПР TCAD.

Разработанная методика моделирования субмикронных МДП-транзисторов используется в НИИСИ РАН для совершенствования технологии производства СБИС на МДП-транзисторах с субмикронными размерами областей с целью повышения их радиационной стойкости, а также для расчета влияния дестабилизирующих факторов на характеристики структур. Кроме того, предложенная методика используется для исследования физических процессов, протекающих в КМДП-структурах с субмикронными размерами областей.

Объем работы - 37 стр..

Количество приложений - 0

Количество иллюстраций - 30 ед.

Количество таблиц - 1

Количество источников литературы - 6 ед.

Х А Р А К Т Е Р И С Т И К А

научной работы

Классификация научной работы – научная.

Вид научной работы – внеучебная.

Ключевые слова: Транзистор, моделирование, радиационное облучение, температурные воздействия.

Цель научной работы: Исследовать влияние температуры и радиационного излучения на электрические характеристики МДП-структур. Разработка методики процесса моделирования, позволяющей сократить время, необходимое для расчета электрических характеристик КМДП-структур.

Методы проведенных исследований: Для расчета параметров технологического процесса и анализа электрических характеристик КМДП-

структур применен метод моделирования с использованием САПР TCAD. Оценка величины заряда в скрытом окисле КНИ-структуры проводилась моделированием с помощью САПР TCAD с использованием дихотомического деления.

Основные результаты научного исследования (научные, практические):

1. Разработана методика моделирования физических процессов, протекающих в КНИ-транзисторной МДП-структуре, позволяющая существенно сократить время расчета сложных моделей. Основным принцип этой методики – разбиение самого процесса моделирования на подпроцессы, в каждом из которых шаг сходимости и точность расчетов остаются постоянными. Применение разработанной методики при расчетах функциональных параметров КНИ-транзисторов позволило сократить время расчета в 4 раза и добиться более высокой точности моделирования.
2. Откалибрована модель технологической операции термического окисления кремния. После определения параметров модели расхождение между экспериментально измеренными значениями толщины подзатворного диэлектрика и значениями, полученными в результате моделирования, составило не более 10% для всех режимов термической обработки пластин.
3. Откалибрована модель технологической операции ионной имплантации. Определены параметры распределения Пирсона «с хвостом», позволяющие на глубинах до 0,5 мкм между теоретическими и экспериментальными данными расхождение не превышающее погрешности получения самих экспериментальных данных.
4. Рассчитаны характеристики *n*-канальных и *p*-канальных МДП-транзисторов при условиях воздействия температуры и радиационного облучения. Построено распределение связанного заряда в скрытом окисле, раскрывающее механизм образования паразитного канала в КНИ-структуре. Уже при значениях накопленного связанного заряда ($\sim 10^{-14}$ Кл) в *n*-канальном КНИ-транзисторе образуется паразитный канал, переводящий его из закрытого состояния в открытое независимо от напряжения на затворе.
5. Полученные в результате моделирования зависимости электрических характеристик МДП-транзисторов при изменении температуры окружающей среды и дозы радиационного облучения позволили определить оптимальный рабочий диапазон температур (-30...+80°C) эксплуатации СБИС, содержащих подобные структуры.

Научный руководитель : _____ (Макарчук В.В.)

Студент : _____ (Глушко А.А.)



«Нанотехнологические системы»
закрытое акционерное общество

В оргкомитет конкурса
научно-исследовательских работ студентов вузов
в области нанотехнологий и наноматериалов
по разделу «Наноинженерия»

Работа _____ ФИО _____ на тему _____
посвящена актуальному

Основное внимание в работе

В работе получены следующие новые результаты

Работа с соблюдением требований ГОСТ, цитирование литературы корректное. Результаты
работы могут быть использованы в

Представленная работа _____ название _____ выполнена на высоком
научно-техническом уровне, а ее автор _____ достоин быть
отмечен дипломом (медалью) открытого конкурса научно-исследовательских работ студентов
вузов в области нанотехнологий и наноматериалов по разделу «Наноинженерия».

Генеральный директор

А.А.Денисов

М.П.