

ра с использованием сетки размерностью 32×53 составляло в среднем 100 мин ЭВМ ЕС 1061.

Приведенные результаты применения программного комплекса KFSM показывают, что KFSM обеспечивает адекватность моделирования, обладает свойством универсальности по отношению к конфигурации моделируемых структур при приемлемых затратах машинного времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мулярчик С. Г., Соловьев В. Г. Комплекс программ двумерного моделирования твердотельных микроэлектронных структур // Изв. вузов. Радиоэлектроника.— 1987.— Т. 30, № 6.
2. Seidman T. L., Choo S. C. Iterative scheme for computer simulation of semiconductor devices // Solid-State Electron.— 1972.— V. 15, N 10.— P. 1229.
3. Brown G. W., Lindsay B. W. The numerical solution of Poisson's equation for two-dimensional semiconductor devices // Solid-State Electron.— 1976.— V. 19, N 12.— P. 991.
4. Meijerink J. A., Van der Vorst H. A. An iterative solution method for linear systems of which the coefficient matrix is a symmetric M-matrix // Math. Comput.— 1977.— V. 31, N 137.— P. 148.
5. Stone H. L. Iterative solution of implicit approximations of multidimensional partial differential equations // SIAM J. Numer. Anal.— 1968.— V. 5, N 3.— P. 530.
6. Toyabe T., Ujii K., Okaba T. e. a. Method and application of two-dimensional analysis of I^2L // Trans. Inst. Electron. and Commun.— 1979.— V. 62-C, N 3.— P. 315.
7. Польский Б. С., Похвалина Л. С. Численное моделирование стационарных процессов в биполярных полупроводниковых приборах // Изв. вузов. Радиоэлектроника.— 1982.— Т. 25, № 3.
8. Буренков А. Ф., Комаров Ф. Ф., Кумахов М. А., Темкин М. М. Таблицы параметров пространственного распределения ионно-имплантированных примесей.— Минск: БГУ, 1980.

Поступила в редакцию 12 июня 1987 г.

УДК 621.315

В. И. КОЛЬДЯЕВ, О. Ю. ПЕНЗИН, О. Н. ШАХОВА

(Новосибирск)

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ НЕПОДВИЖНОГО ЗАРЯДА ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ СБИС НА ОСНОВЕ МДП-ТРАНЗИСТОРОВ

Введение. Численное моделирование электронных процессов для анализа и проектирования элементов СБИС широко используется на практике [1—3]. Уменьшение размеров элементов СБИС на основе МДП-структур ведет к усложнению происходящих в них электрофизических процессов, что создает объективные предпосылки для все более широкого использования моделирования. В основе методов моделирования основных характеристик современных кремниевых СБИС лежит численное решение так называемой фундаментальной системы уравнений (ФСУ) с граничными и начальными условиями, отражающими специфику конкретной полупроводниковой структуры [4]. ФСУ включает уравнения непрерывности для потоков электронов и дырок, уравнение Пуассона для потенциала и дополнительные два уравнения, описывающие диффузионную и дрейфовую компоненты потоков. Численное моделирование элементов СБИС на основе ФСУ позволяет решить следующие классы задач:

1) определение функциональных характеристик активных элементов СБИС, на основе которых создается СБИС (например, вольт-амперные характеристики (ВАХ), проходные и выходные характеристики для

МДП-транзисторов с обогащением и обеднением, для биполярных транзисторов, полевых транзисторов с управляющим $p-n$ -переходом и т. д.);

2) определение характеристик активных элементов в режимах, которые нежелательны в создаваемых СБИС (например, ВАХ смыкания областей пространственного заряда — ОПЗ стока и истока МДП-транзистора, ВАХ пробоя стокового $p-n$ -перехода, ВАХ паразитного МДП-транзистора и т. д.);

3) расчет критических параметров и характеристик перехода из активного функционального режима в нежелательный для функционирования СБИС режим элемента (например, напряжение смыкания ОПЗ стока и истока МДП-транзистора и критическая характеристика — напряжение смыкания в зависимости от напряжения смещения исток — подложка; пороговые напряжения активного и паразитного МДП-транзисторов и их зависимости от смещения истока относительно подложки, пробивное напряжение $p-n$ -перехода и т. д.). Следует заметить, что при проектировании СБИС актуальными обычно являются только задачи классов 1 и 3. Характеристики элементов в нежелательных для функционирования СБИС режимах с учетом эффектов, которые не используются в нормально работающей СБИС, как правило, детально исследовать нецелесообразно. Достаточно проанализировать только условия их возникновения, чтобы с учетом конструктивных запасов на разброс параметров элементов избежать нежелательных эффектов. Задачи класса 1 характеризуются тем, что в квазинейтральных областях наблюдаются значительные потоки носителей заряда, а в ОПЗ плотности подвижного заряда носителей соизмеримы с плотностями неподвижных зарядов ионизованных доноров и акцепторов, поэтому для их решения необходимо использование ФСУ. Для задач класса 3 можно упростить ФСУ и использовать эффективные методы решения.

Особенности задач класса 3 заключаются в пренебрежимо малых плотностях подвижного заряда носителей по сравнению с плотностями неподвижного заряда ионизованных доноров и акцепторов до тех пор, пока напряжение на одном из электродов элемента не достигнет критической величины, после чего плотность подвижного заряда резко увеличивается и становится соизмеримой с плотностью неподвижного заряда. Это критическое напряжение является критическим параметром элемента, который необходимо знать при исследовании и проектировании элементной базы любой СБИС.

То обстоятельство, что плотности подвижного заряда пренебрежимо малы, позволяет при решении ФСУ не рассматривать уравнения переноса, и для расчета критических параметров и характеристик переходов можно использовать только нелинейное уравнение Пуассона, а условие возникновения этих переходов записывать из более простых физических соображений, обсужденных ниже. Поскольку в данном подходе не рассматриваются потоки подвижных носителей, модель названа «Моделью неподвижного заряда».

Следует отметить, что метод моделирования в приближении неподвижного заряда, как и в приближении ФСУ, не позволяет корректно прогнозировать токи утечки $p-n$ -переходов и подпороговые токи МДП-транзисторов — две важнейшие характеристики элементов СБИС (особенно КМОП СБИС). Это связано с тем, что токи термогенерации $p-n$ -переходов определяются всем энергетическим спектром локализованных состояний в запрещенной зоне полупроводника в объемной части ОПЗ и энергетическим спектром поверхностных состояний на границе раздела полупроводник — диэлектрик в ОПЗ. Приближение эффективного времени жизни в теории Шокли — Рида — Холла для скорости генерации-рекомбинации в ФСУ рассматривает только эффективный уровень, ответственный за рекомбинацию в квазинейтральных областях полупроводника. Ток подпороговой утечки между истоком и стоком МДП-транзистора существенно определяется энергетическим спектром поверхностных состояний и их плотностью и в приближении ФСУ не

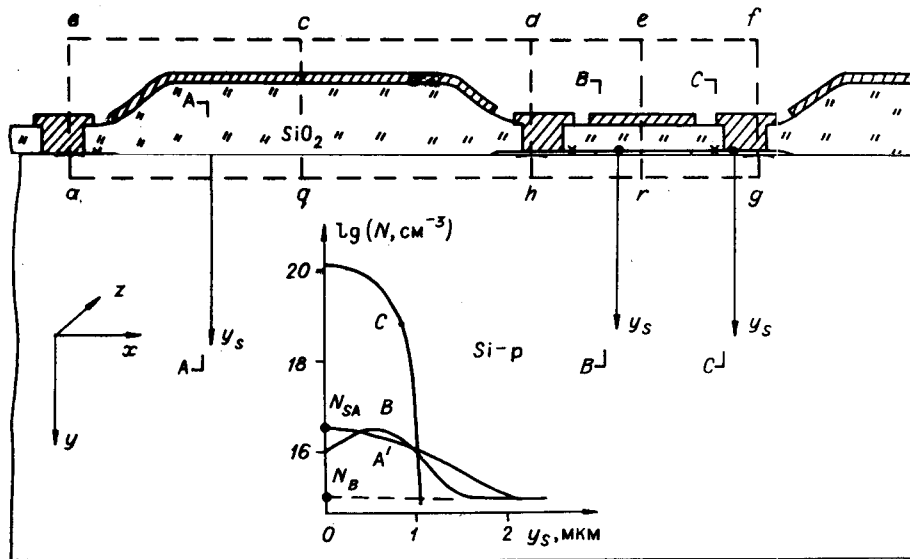


Рис. 1. Общий вид исследуемой МДП-структуры.

На вставке: кривая A — распределение примеси под затвором n -МДПТ по сечению $A-A$; кривая B — под затвором a -МДПТ по сечению $B-B$; кривая C — в областях стока — истока по сечению $C-C$.

может быть рассчитан. Кроме того, эти два типа токов утечки принципиально определяются флуктуациями в распределении дефектов, ответственных за локализованные состояния в запрещенной зоне полупроводника, и зависят от технологии производства СВИС. Поэтому задача о прогнозировании этих токов утечки — самостоятельная проблема.

Целью данной статьи является описание эффективного метода моделирования элементов СВИС в приближении неподвижного заряда и его демонстрация на примере актуальных задач анализа современной элементной базы СВИС, изготовленных по МДП-технологии.

Постановка задачи. На рис. 1 приведено поперечное сечение обобщенной физической структуры, типичной для современной МДП-технологии, которая включает область $d f g h$ активного МДП-транзистора (a -МДПТ) и область $a b d h$ паразитного МДП-транзистора (n -МДПТ), возникающего в связи с необходимостью полевой изоляции двух соседних активных МДП-транзисторов. В общем случае под затвором a -МДПТ может быть сформирован слой подлегирования p -типа (P_a^+), а под затвором n -МДПТ, изготавливаемым методом локального окисления, формируется слой подлегирования p -типа (P_n^+) с целью повышения порогового напряжения. Распределения примесей в глубь подложки от границы раздела $Si-SiO_2$ (рассчитанные в одномерном приближении) для различных сечений структуры приведены на рис. 1 (см. вставку), расчеты проведены по программе из [4].

Структура, изображенная на рис. 1, характеризуется набором критических параметров и характеристик. Для активного МДПТ: пороговое напряжение и напряжение смыкания в зависимости от напряжения смещения исток — подложка и конструктивных параметров таких, как длина и ширина канала, толщина подзатворного диэлектрика, распределение примеси под затвором и т. п. Для паразитного МДПТ: пороговое напряжение и его зависимость от смещения подложки. Для $p-n$ -перехода

стока: напряжение пробоя в области $cdhq$ в зависимости от напряжения на затворе п-МДПТ; напряжение пробоя в области $derh$ в зависимости от напряжения на затворе а-МДПТ.

Метод решения задачи. Разделим задачу моделирования критических параметров и характеристик на две части:

1) определение электростатического потенциала φ в предположении равновесного распределения подвижного заряда;

2) определение критических параметров и характеристик физических структур по известному распределению $\varphi(x, y)$.

В пренебрежении токами тепловой генерации концентрации электронов и дырок в состоянии теплового равновесия определяются выражениями [5]

$$\begin{aligned} n(\varphi) &= n_0 \exp(q\varphi/kT); \\ p(\varphi) &= p_0 \exp(-q\varphi/kT), \end{aligned}$$

где n_0, p_0 — равновесные концентрации электронов и дырок при $\varphi = 0$; k — постоянная Больцмана; T — температура; q — заряд электрона. Тогда уравнение Пуассона для любой из рассматриваемых областей структуры на рис. 1 имеет вид

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = -\frac{q}{\epsilon_n} \left\{ N_D - n_0 \exp\left(\frac{q\varphi}{kT}\right) - N_A + p_0 \exp\left(-\frac{q\varphi}{kT}\right) \right\}, \quad (1)$$

здесь ϵ_n — диэлектрическая проницаемость полупроводника; N_D, N_A — распределение концентрации доноров и акцепторов в подложке. Краевые условия на границах областей: на отрезках ab, cq, dh, er, fg задается условие симметрии $\partial\varphi/\partial x = 0$, на отрезке ag — условие Дирихле $\varphi = -V_{BS}$, где V_{BS} — напряжение смещения подложка — исток а-МДПТ, на линии раздела затвор — SiO_2 для активного МДПТ задается $\varphi = V_{GS}$ (V_{GS} — напряжение затвор — исток а-МДПТ), для паразитного МДПТ $\varphi = V_{BU}$ (V_{BU} — напряжение на шине, которая является затвором для п-МДПТ). Аналогично на линии раздела проводящий контакт — диффузионная n^+ -область для истока задается $\varphi = \varphi_K$ (φ_K — контактная разность потенциалов), для стока $\varphi = V_{DS} + \varphi_K$ (V_{DS} — напряжение сток — исток а-МДПТ).

Численное решение уравнения (1) сводится к задаче решения уравнения Пуассона со свободной границей аналогично тому, как это сделано в [5] для одномерного $p-n$ -перехода. В [6] описан пакет прикладных программ (ППП) ЭФЕС, который позволяет решать двумерное уравнение Пуассона со свободной границей. Таким образом, контролируя справедливость предположения, что заряд подвижных носителей в ОПЗ пренебрежимо мал по сравнению с величиной заряда доноров и акцепторов, можно для определения распределения потенциала $\varphi(x, y)$ воспользоваться ППП ЭФЕС для любой области на рис. 1. Область, в которой решается уравнение (1), определяется формой области изоляции из SiO_2 , области из Si , граничными условиями и функциями $N_D(x, y)$ и $N_A(x, y)$.

При моделировании использовалась форма области изоляции из SiO_2 , полученная по программе КВАРЦ из [4]. Распределение примесей (профили бора и мышьяка) аппроксимировалось двумерными функциями $N_D(x, y)$ и $N_A(x, y)$, полученными из одномерных функций $N(Y_S)$, рассчитанных согласно [4] (вставка на рис. 1). Предполагалась цилиндрическая симметрия распределения примеси относительно точек S_n и S_a (см. рис. 1), отстоящих на $0,3 x_j$ по поверхности от края маски (x_j — глубина залегания $p-n$ -перехода n^+ -слоя или глубина залегания изоляции с заданной концентрацией, например, $7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ для P_n^+ -слоя). Распределение примеси в слое P_a^+ в области $hdjg$ не зависит от x в соответствии с технологией создания этого слоя, а в области $abdh$ его зависимость от x пренебрежимо мало влияет на суммарное распределение примесей в слоях P_n^+ и n^+ .

Для расчета критических параметров и характеристик определим обобщенную функцию $f(\varphi)$, обладающую свойством

$$f(\varphi(V_{EX}))|_{V_{EX}=V_{CR}} = 0, \quad (2)$$

где V_{EX} — внешнее напряжение (любое из V_{DS} , V_{GS} , V_{BS} , V_{BU}); φ — распределение потенциала, рассчитанное по (1) для заданного V_{EX} ; V_{CR} — критическая величина напряжения V_{EX} (критический параметр исследуемой структуры).

Расчет порогового напряжения (V_T) как п-МДПТ, так и а-МДПТ в общем случае требует знания трехмерного распределения потенциала $\varphi(x, y, z)$, где z — ось координат, направленная перпендикулярно плоскости рис. 1. Задачу определения V_T можно рассмотреть в трех различных предельных случаях:

1. $W \gg y_d$, где W — ширина затвора МДП-транзистора; y_d — толщина слоя ОПЗ при типичном V_{DS} , V_{BS} . В этом случае зависимость потенциала φ от z незначительна [7] и пороговое напряжение можно приближенно определить по формуле

$$f(\varphi(V_{GATE}))|_{V_{GATE}=V_T} = \min_{x,y} \{ \varphi(x, y)|_{\text{на Si-SiO}_2} \} - 2\varphi_F = 0, \quad (3)$$

где V_{GATE} — напряжение на затворе (либо V_{BU} , либо V_{GS}); φ_F — уровень Ферми.

2. $L \gg y_d$, где L — длина канала МДПТ. В этом случае можно пренебречь зависимостью φ от x и рассчитывать $\varphi(z, y)$ в плоскости, перпендикулярной рис. 1 и проходящей через прямые линии cq либо er , из (1), заменив x на z . Тогда пороговое напряжение находится из уравнения

$$f(\varphi(V_{GATE}))|_{V_{GATE}=V_T} = \max_{z,y} \{ \varphi(z, y)|_{\text{на Si-SiO}_2} \} - 2\varphi_F = 0. \quad (4)$$

3. $L \gg y_d$, $W \gg y_d$. В этом случае задача становится одномерной и аналитическое решение при равномерном распределении примеси описано в [5].

Напряжение смыкания V_{SM} определим как напряжение V_{DS} , при котором потенциал стока при смыкании границ ОПЗ стока и истока понижает исходный барьер истока φ_b^0 на величину kT/q . Пусть φ_b — минимальная высота потенциального барьера в окрестности истокового $p-n$ -перехода в точке (x_0, y_0) для переноса носителей (электронов) от истока к стоку. Точка $x = x_0$, $y = y_0$ является седловой точкой для функции $\varphi(x, y)$ [7]. Тогда

$$\begin{aligned} \varphi_b(V_{DS}) &= \varphi_K - V_{BS} - \varphi(x_0, y_0); \\ f(\varphi(V_{DS}))|_{V_{DS}=V_{SM}} &= \varphi_b^0 - \varphi_b(V_{DS}) - \frac{kT}{q} = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Пробой стокового $p-n$ -перехода происходит за счет лавинного умножения образованных при тепловой генерации электронов и дырок в ОПЗ этого перехода. Согласно [5] в момент лавинного пробоя интеграл ионизации J (вдоль силовой линии l) для электронов (J_n) или дырок (J_p) достигает 1. Отсюда имеем

$$f(\varphi(V_{DS}))|_{V_{DS}=V_{BD}} = \max_{i=1, \dots, M} \{ J_i[\varphi(x, y)] - 1 \} = 0, \quad (6)$$

где i — номера силовых линий l_i , вдоль которых вычисляются интегралы ионизации J_{in} и J_{ip} для электронов и дырок; M — число рассчитанных силовых линий;

$$J[\varphi(x, y)] = \max\{J_{ip}(l_i), J_{in}(l_i)\}.$$

Для решения (2) применялась стандартная процедура нахождения нулей функций одной переменной, основанная на сочетании методов золотого сечения, градиентного и параболической аппроксимации. При

этом зависимость $\varphi(V_{ex})$ определялась решением (1) с использованием ППП ЭФЕС.

Важнейшей критической характеристикой смыкания является зависимость тока смыкания от величины напряжения на стоке. Оказывается, что для малых токов смыкания (таких, что плотность подвижного заряда этого тока много меньше плотности ионизованных доноров или акцепторов) также можно применять метод неподвижного заряда. При этом необходимо оценивать физический смысл полученных результатов из анализа распределения потенциала и плотности заряда в окрестности седловой точки. Система уравнений (1)–(6) позволяет найти критические характеристики без расчета токов. Поэтому необходимо дополнить (1)–(6) уравнениями, рассчитывающими критические характеристики, определяющие токи. В [8] предложено выражение для тока смыкания через известное распределение потенциала $\varphi(x, y)$:

$$I_{DS}(V_{DS}) = qD_n W \frac{Z_V}{L_V} \frac{n_i^2}{N_B} \exp\left(-\frac{q\varphi_B}{kT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{qV_{DS}}{kT}\right)\right], \quad (7)$$

где D_n — коэффициент диффузии электронов; n_i — собственная концентрация носителей; N_B — концентрация акцепторной примеси в подложке в седловой точке; Z_V и L_V — эффективные ширина и длина «канала», по которому происходит перенос электронов при смыкании; W — ширина затвора транзистора; φ_B — величина истокового потенциального барьера, определяемая из (5). Для расчета тока смыкания по формуле (7) величину φ_B необходимо определять с точностью до kT/q , так как ошибки в величине истокового барьера в несколько kT/q приводят к ошибкам вычисления тока смыкания I_{DS} на порядки, что связано с экспоненциальной зависимостью I_{DS} от φ_B . Для определения величин Z_V , L_V , $\varphi(x_0, y_0)$ в окрестности седловой точки (x_0, y_0) строилась поверхность второго порядка (гиперболический параболоид), которая аппроксимирует значения $\varphi(x, y)$ в узлах сетки. Для решения переопределенной системы линейных уравнений относительно коэффициентов этой аппроксимации применен метод сингулярного разложения матрицы системы уравнений. По полученной аналитической аппроксимации отыскиваются координаты x_0, y_0 и потенциал в седловой точке. Относительно седловой точки определяются координаты точек, потенциал в которых отличается от $\varphi(x_0, y_0)$ на $+(kT/q)$ в направлении линии тока и на $-(kT/q)$ в перпендикулярном направлении к линии тока. Разности значений соответствующих координат равны Z_V и L_V .

Примеры анализа структур. Для оценки точности решения уравнения (1) по ППП ЭФЕС проведено решение модельных задач, имеющих аналитические решения, которое показало согласие численного и аналитического решений с высокой точностью.

Известно, что пороговое напряжение а-МДПТ зависит от длины канала $V_T = V_T(L)$ [5]. Эта зависимость становится существенной, когда доля заряда ОПЗ подложки под затвором, экранируемая зарядами истоковой и стоковой областей, становится соизмеримой с долей заряда ОПЗ подложки, экранируемой зарядом на затворе. Решение (1)–(3) для области $dfgh$ позволяет найти зависимости $V_T(L)$, которые для конкретных параметров приведены на рис. 2, а. Распределение концентрации бора в слое P_a^+ для простоты в данных расчетах аппроксимировалось равномерным с концентрацией N_B (см. вставку на рис. 1), но метод позволяет учесть реальный профиль распределения примеси. Результаты расчета подтверждают предположение о том, что пороговое напряжение уменьшается с уменьшением L . По мере уменьшения ширины затвора а-МДПТ его пороговое напряжение возрастает [7]. Это связано с тем, что доли заряда в боковых ОПЗ под затвором (под слоями SiO_2 , полученными локальным окислением, — области S_1) и в ОПЗ под планарной частью затвора (область S_2 , см. вставку на рис. 2, б) становятся соизмеримыми и начинают существенно влиять на величину V_T . Для оты-

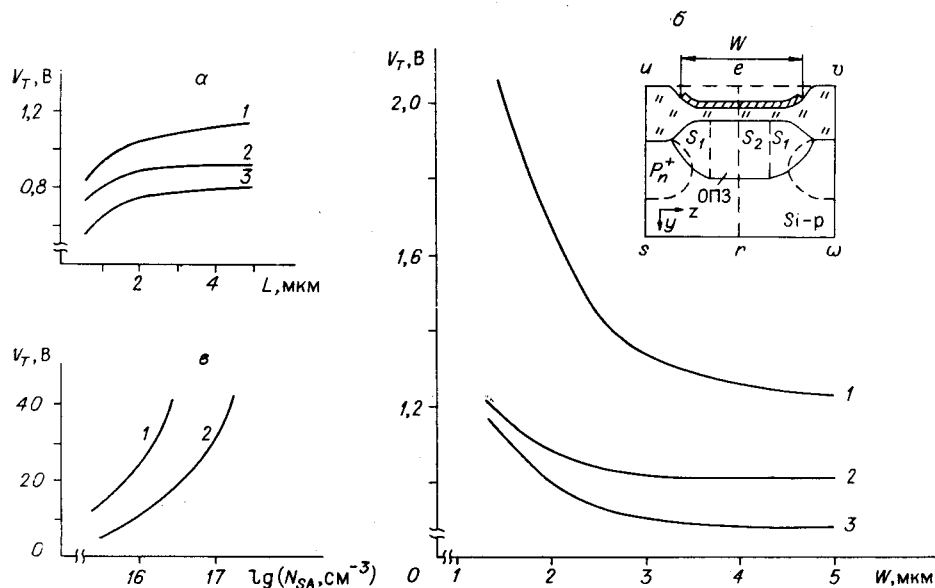


Рис. 2. Пороговое напряжение V_T активного и паразитного транзисторов: а — зависимость V_T а-МДПТ от длины канала L : кривая 1 — зависимость $V_T(L)$ при толщине окисла а-МДПТ $t_{OX} = 120$ нм, концентрации примеси в подложке $N_B = 7 \cdot 10^{14}$ см $^{-3}$; кривая 2 — $t_{OX} = 32$ нм, $N_B = 3 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$; кривая 3 — $t_{OX} = 32$ нм, $N_B = 7 \cdot 10^{14}$ см $^{-3}$; б — зависимость V_T а-МДПТ от ширины затвора W для t_{OX} и N_B , как на рис. 2, а; в — зависимость V_T п-МДПТ от концентрации примеси на поверхности N_{SA} п-МДПТ (см. рис. 1) для толщины окисла $t_{LOX} = 1,4$ мкм (кривая 1), $t_{LOX} = 0,7$ мкм (2)

скания зависимости $V_T(W)$ следует решить задачу (1), (2), (4) для области $si\omega\omega$, проходящей через линию er в направлении оси z (вставка на рис. 2, б) с краевыми условиями: $(\partial\phi/\partial z)|_{su, \nu\omega} = 0$ и $(\partial\phi/\partial n) = 0$ на открытых от металлизации границах вдоль uv . На рис. 2, б приведены результаты моделирования для конкретной структуры, у которой области локального окисления кремния и профили бора (P_n^+) под ним задавались, как показано на рис. 1. Благодаря заданию равномерного профиля бора в слое расчет легко проверить по асимптотике $V_T(L, W)$ при $L, W \rightarrow \infty$ [5]. Проверка показала, что результаты согласуются с высокой точностью.

Важной критической характеристикой структуры при разработке СБИС является зависимость порогового напряжения V_T п-МДПТ от концентрации бора N_{SA} (см. вставку на рис. 1) на поверхности в слое P_n^+ . Эта зависимость показана на рис. 2, в для двух различных толщин окисла п-МДПТ. Пороговое напряжение паразитного транзистора для более стабильной работы СБИС необходимо повышать, но увеличение V_T п-МДПТ за счет увеличения N_{SA} имеет ограничения, связанные с уменьшением напряжения пробоя стокового $p-n$ -перехода при увеличении N_{SA} . Поэтому возникает практическая задача оптимизации конкретных структур по пороговому напряжению и напряжению пробоя, расчет которого приведен ниже.

Увеличение напряжения на стоке а-МДПТ (или п-МДПТ) приводит к перемещению границы ОПЗ к истоковой ОПЗ. При смыкании V_{DS} достигает определенного напряжения, равного V_{SM} , и начинается понижение барьера для электронов истока потенциалом стока, и они инжектируются в сток. Смыкание может быть поверхностным или объемным. На рис. 3 приведены результаты расчета по (1), (2), (5) зависимости V_{SM} от L для а-МДПТ (область $d f g h$, см. рис. 1), где реализуется случай поверхностного смыкания. Концентрация бора P_a^+ достаточно велика в глубине подложки, так что ОПЗ в районе максимума концентрации

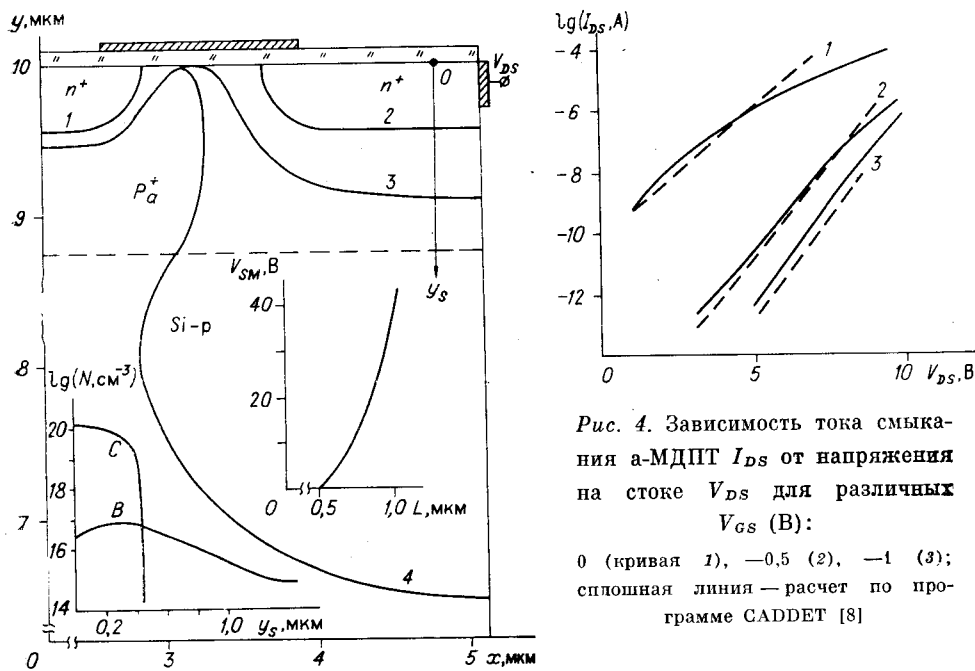


Рис. 3. Расчет напряжения смыкания ОПЗ стока и истока а-МДПТ: кривые 1 и 2 — соответственно металлургические границы истока и стока; кривая 3 — граница ОПЗ при $V_{DS} = 5$ В; кривая 4 — граница ОПЗ при $V_{DS} = 17,6$ В. На нижней вставке: кривая B — распределение акцепторной примеси под затвором а-МДПТ; кривая C — распределение донорной примеси в области стока — истока. На верхней вставке: зависимость напряжения смыкания V_{SM} от длины канала L

Рис. 4. Зависимость тока смыкания а-МДПТ I_{DS} от напряжения на стоке V_{DS} для различных V_{GS} (В): 0 (кривая 1), $-0,5$ (2), -1 (3); сплошная линия — расчет по программе CADDET [8]

двигается в сторону истока медленнее, чем у поверхности, по мере роста V_{DS} .

Расчет тока смыкания в а-МДПТ проводился по (1), (2), (7) с применением описанной выше методики отыскания координат седловой точки (x_0, y_0) , потенциала в седловой точке $\phi(x_0, y_0)$ и величин Z_V, L_V . Оценка точности моделирования проводилась сравнением результатов расчета по (1), (2), (7) с результатами расчета тока по программе двумерного моделирования характеристик МДП-транзистора в режиме смыкания в зависимости от напряжения на затворе в [8] (программа CADDET). Профили примеси и другие параметры МДП-транзистора также взяты из [8]. Из рис. 4 видно, что результаты расчетов хорошо согласуются между собой. Это свидетельствует о корректности нахождения модели, однако алгоритм, предложенный в работе, более эффективен для решения подобных задач по сравнению с алгоритмом из [8].

Влияние напряжения на затворе V_{BV} на толщину ОПЗ $p-n$ -перехода и электрические поля в этом ОПЗ приводит к зависимости пробивного напряжения $p-n$ -перехода V_{BD} от V_{BV} . На рис. 5 даны результаты расчета V_{BD} в зависимости от V_{BV} при различных уровнях легирования подложки в слое P_n^+ . На рис. 6 приведены данные одного из вариантов расчета, поясняющие методики расчета. После решения задачи (1) для области $cdhq$ (см. рис. 1) исследуется функция $\phi(x, y)$ с целью поиска силовых линий электрического поля в ОПЗ $p-n$ -перехода. Вдоль этих линий (см. кривые 1–10 на рис. 6) вычисляются интегралы ионизации согласно [5]. На вставке (см. рис. 6) приведены зависимости максимальных полей вдоль каждой из исследованных силовых линий и интегралов ионизации по этим силовым линиям. Видно, что величины интегралов ионизации J резко уменьшаются по мере удаления от области максимальных полей, расположенной вблизи поверхности. Поэтому расчет всех интегралов ионизации в области между границами 1 и 2 нецелесообразен. Предполагается, что напряжение V_{BD} равно напряжению

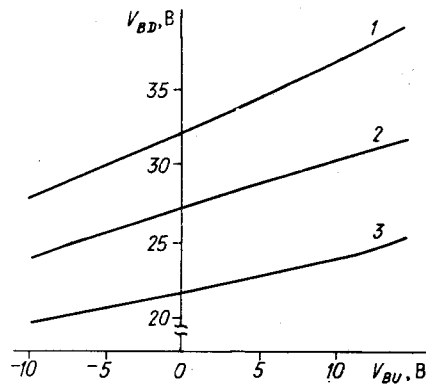


Рис. 5. Зависимость пробивного напряжения V_{BD} $p-n$ -перехода стока p -МДПТ от напряжения на затворе p -МДПТ V_{BU} для различной концентрации примеси N_{SA} p -МДПТ (см. рис. 1):

$N_{SA} = 1,05 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (кривая 1),
 $N_{SA} = 2,09 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (2), $N_{SA} = 4,18 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (3); толщина $t_{LOX} = 1,4 \text{ мкм}$; $t_{OX} = 320 \text{ нм}$

пробоя, когда J вдоль одной из силовых линий, проходящих в полупроводниковой области, достигнет 1. Известно [5], что напряжение пробоя почти линейно зависит от потенциала на электроде, расположенном на области локально окисленного кремния, для $p-n$ -перехода стока МДПТ-транзистора, что является косвенным подтверждением правильности полученных результатов.

Часто под затвором p -МДПТ на слое окисла, полученного методами локального окисления, располагается слой пиролитического SiO_2 . Эти слои учитывались при расчете конкретных структур по описанной методике с использованием профилей распределения примесей, рассчитанных в двумерном приближении по программе ФАКТ2, аналогичной разработанной в [4] для одномерного случая.

Программы, реализующие модель (1)–(7), написаны на языке программирования Фортран–IV. Вход этих программ объединен с выходом программы моделирования технологии ФАКТ2, что дает возможность на этапе проектирования технологического маршрута изготовления СВИС контролировать критические параметры и характеристики структуры. Среднее время расчета одной критической характеристики на ЭВМ ЕС1061 30 мин.

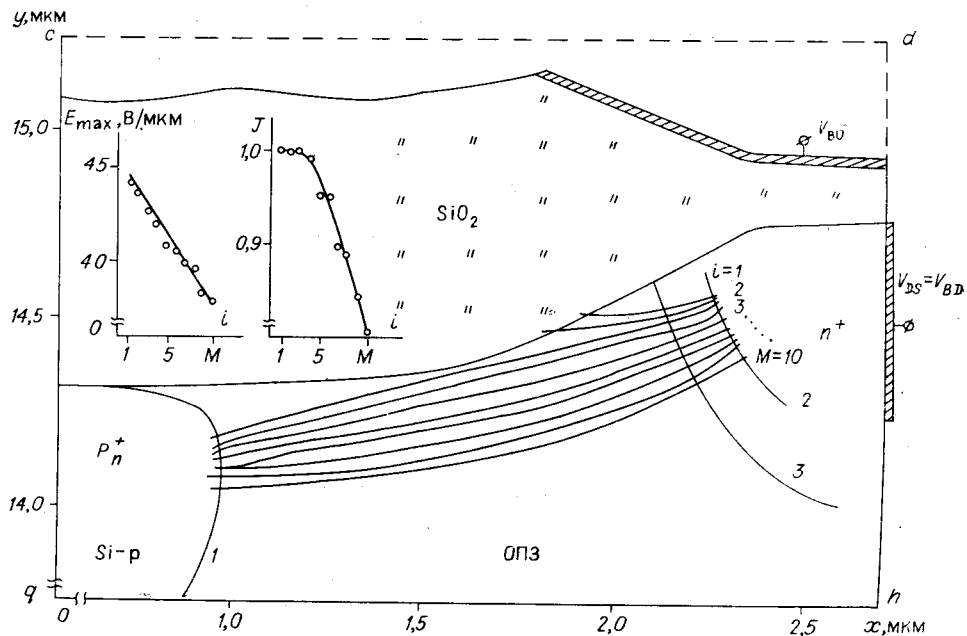


Рис. 6. Расчет пробивного напряжения стокового $p-n$ -перехода: кривые 1, 2 — границы ОПЗ $p-n$ -перехода стока, кривая 3 — металлургическая граница $p-n$ -перехода стока; $i = 1 \dots M = 10$ — силовые линии; на вставке: зависимость максимального электрического поля E_{max} и интеграла ионизации J от номера силовой линии i

Заключение. Обосновано применение метода неподвижного заряда для моделирования критических параметров и характеристик элементов СБИС.

Предложена обобщенная постановка краевой задачи для моделирования критических параметров и характеристик элементов СБИС на основе МДП-транзисторов.

На ряде конкретных примеров анализа элементов СБИС показана эффективность метода неподвижного заряда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Польский Б. С. Численное моделирование полупроводниковых приборов.— Рига: Зинатне, 1986.
2. Кольдяев В. И., Свиташев К. К. Математическое моделирование процессов переноса электронов в диэлектриках МДП-структур в сильных полях // Микроэлектроника.— 1986.— Т. 15, № 3.
3. Мулярчик С. Г., Соловьев В. Г. Способ построения начального приближения при численном анализе МДП-приборов // Изв. вузов. Радиоэлектроника.— 1982.— Т. XX, № 6.
4. Кольдяев В. И., Мороз В. А., Назаров С. А. Исследование асимптотических свойств краевой задачи о легировании и окислении кремния // Автометрия.— 1986.— № 6.
5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов.— М.: Мир, 1984.
6. Горбенко Н. И., Катешов В. А., Майоров Ю. К. ППП ЭФЭС (автоматизация решения краевых задач для уравнения Пуассона на ЕС ЭВМ).— Новосибирск, 1985.— (Препринт АН СССР, Сиб. отд-ние, ВЦ; 552).
7. Klose H., Seidl A. Combined process modeling and subthreshold device simulation // Solid-State Electron.— 1986.— V. 29, N 3.— P. 371.
8. Greenfield J. A., Dutton R. W. Nonplanar VLSI device analysis using the solution of Poisson's equation // IEEE Trans. Electron Devic.— 1980.— V. ED-27, N 8.

Поступила в редакцию 12 июня 1987 г.

УДК 621.382.23.011.222.001.24

Г. З. ГАРБЕР
(Москва)

МЕТОД РАСЧЕТА СВЧ-ПАРАМЕТРОВ ЛАВИННО-ПРОЛЕТНЫХ ДИОДОВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Введение. Из генераторных полупроводниковых приборов миллиметрового диапазона наиболее мощными являются лавинно-пролетные диоды (ЛПД). Для проектирования генераторов и усилителей на ЛПД необходимо знать зависимости СВЧ-параметров диода (полного сопротивления, мощности генерации и КПД) от режима работы. Экспериментальные методы определения СВЧ-параметров трудоемки и неточны, поэтому особое значение имеет численное моделирование ЛПД, позволяющее достаточно точно рассчитывать эти параметры.

До начала 80-х годов численное моделирование ЛПД основывалось на диффузионно-дрейфовой модели (ДДМ)

Профиль легирования арсенид-галлиевого ЛПД миллиметрового диапазона:

$x = 0$ — координата технологического $p-n$ -перехода

