

УДК 621.382.33

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРЕМНИЕВОГО ВАРИКАПА НА ОСНОВЕ СВЕРХРЕЗКОГО P-N ПЕРЕХОДА

Гусев В.А., Капликов С.Ю., Мишко Е.В.

Севастопольский национальный технический университет, кафедра электронной техники

Студгородок г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: delt@sevgtu.stel.sebastopol.ua

Для создания системы автоматизированного проектирования варикапов на основе сверхрезких p-n переходов был проведён анализ методов моделирования структур приборов, разработана математическая модель прибора и программное обеспечение. Эксплуатация программы показала хорошее соответствие теоретическим данным для структур варикапов с коэффициентом перекрытия емкостей от 3 до 18 и максимальным напряжением до 40 В.

Современное состояние теории и методов проектирования варикапов на основе сверхрезких p-n переходов характеризуется использованием аналитических методов для степенного закона распределения примесей в базе варикапа и гауссовского закона без учёта компенсации ионов примеси в плоскости p-n перехода и толщины области пространственного заряда (ОПЗ) в сильнолегированной области p-n перехода. При этом основное внимание уделяется выяснению связи между концентрационным профилем и вольтфарадной характеристикой. В то же время при разработке варикапов необходимо рассматривать такие параметры приборов, как добротность, предельное обратное напряжение, температурные коэффициенты ёмкости и добротности которые, в свою очередь, вносят дополнительные ограничения на концентрационный профиль структуры варикапа. Кроме того, на этапе проектирования должны учитываться требования серийного производства воспроизводимости и идентичности ряда характеристик варикапа, определяющих процент выхода годных и себестоимость приборов.

Исходя из этого, необходима разработка методов проектирования варикапов, ориентированных на применение ЭВМ, учитывающих реальное распределение концентрации примесей в структуре варикапа и флуктуацию технологических режимов в условиях производства.

При проектировании структуры варикапа существует проблема неоднозначности решений для получения заданной совокупности электрических характеристик прибора. Эта неоднозначность обусловлена как самими значениями электрических параметров (при нежёстких требованиях, различные виды комбинаций структурных характеристик могут обеспечить требования ТЗ), так и типом конструкции технологическими методами создания структуры. Поэтому перед проектированием структуры необходимо провести анализ электрических

характеристик и выявить наиболее критические, трудность воспроизведения которых при имеющихся допусках на точность поддержания технологических режимов должна учитываться при выборе значений того или иного конструктивного параметра в найденном интервале его допустимых значений. Следующим этапом является оценка способа изготовления полученной из проектирования структуры, т.е. необходимо выбрать такие технологические приёмы, которые, с одной стороны, обеспечат требуемый уровень надёжности, с другой – достаточную экономическую эффективность. Например, при использовании ионной имплантации для формирования заданного закона распределения примеси в базе варикапа доза должна быть соизмерима с требуемой активной дозой, определяющей вольт-фарадную характеристику (ВФХ) прибора. В заключение необходимо провести проверку спроектированной структуры с помощью прямого расчёта электрических характеристик по выбранным значениям физико-конструктивных параметров.

В соответствии с поставленной целью в работе проведён анализ и разработано программное обеспечение для моделирования кремниевых сверхрезких варикапов, выполненных по эпитаксиальной технологии с использованием ионной имплантации доноров в активную базу прибора. Результирующее распределение концентрации примесей в структуре имеет вид:

$$N(x) = N_0 \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{L_2 A}\right) - N_b - C_s \cdot \exp\left(\frac{-x^2}{L_1^2}\right) + \frac{N_p}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{WEPI - x}{L_p}\right),$$

где N_0 , N_b и другие параметры определены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты моделирования

Конструктивно-технологические параметры варикапа KB122		
Площадь перехода, см ²	S	0.41e-3
Площадь кристалла, см ²	SKR	0.25e-2
Радиус активной площади перехода, см	RAD	0.11e-1
Глубина залегания перехода, см	XJ	0.12e-3
Толщина эпилёнки, см	WEPI	0.62e-3
Размытие за счёт тех. процесса ($2N_B$), см	DLWEP1	0.26e-3
Размытие за счёт тех. процесса ($1,1N_B$), см	DLWEP2	0.31e-3
Характерная длина автолегирования, см	WA	0.50e-4
Концентрация примеси в эпилёнке, см ⁻³	NB	0.46e16
Удельное сопротивление эпилёнки, Ом·см	ROB	1.15
Концентрация примеси в подложке, см ⁻³	NP	0.25e20
Удельное сопротивление подложки, Ом·см	ROP	0.30e-2
Поверхностная концентрация акцепторов, см ⁻³	NO	0.20e21
Поверхностная концентрация доноров, см ⁻³	CS1	0.32e19
Длина диффузии акцепторов, см	L1	0.76e-4

Длина диффузии доноров, см	L2A	0.55e-4
Диф-я длина размытия границы подл.-эпислой, см ² /с	LP	0.10e-3
Начальный коэф-т диф-и для примеси в подложке, см ² /с	DOPL	60
Энергия активации примеси в подложке, эВ	EAPL	4.2
Энергия активации бора, эВ	EAB	3.46
Начальный коэффициент диффузии бора, см ² /с	DOB	2.55
Начальный коэффициент диффузии фосфора, см ² /с	DOP	3.85
Энергия активации фосфора, эВ	EAP	3.66
Температура загонки, °C	TEMPZ	1100
Температура разгонки, °C	TEMP	1150
Температура окисления, °C	TEMOK	1050
Время загонки, мин	T2	41.05
Время разгонки, мин	T1P	47.27
Время окисления, мин	TOKS	180
Доза легирования донорами, Кл	QB	0.35e-5

Исходными данными являются эксплуатационные параметры варикапа, включая ВФХ, которая задаётся в опорных точках по напряжению U_1, U_2, U_3, U_4 . Алгоритм программы приведён на рисунке 1.

На первом этапе проводится расчет параметров концентрационного профиля (концентрацию примеси в эпилёнке, концентрацию примеси в подложке, поверхностную концентрацию донорной примеси, концентрацию доноров в плоскости p - n перехода, глубину залегания p - n перехода, длину диффузии акцепторной донорной примесей и длину диффузии размытия границы подложки – эпилёнка), а также параметров техпроцесса (времена загонки и разгонки, коэффициенты диффузии примеси, дозу легирования и т.д.).

Параметры N_p и N_B находятся из уравнения, связывающего концентрацию и удельное сопротивление

$$N = \frac{1}{q\mu_n(N)\rho}$$

Длины диффузии L и L_C находятся из стандартных соотношений[1]

$$L = 2\sqrt{D_B(T_3 \cdot t_3)},$$

$$L_C = 2\sqrt{D_P(T_P \cdot t_P) + D_B(T_3 \cdot t_3)},$$

где $D_P(T_P)$ и $D_B(T_3)$ – коэффициенты диффузии фосфора и бора в кремнии соответственно. Из выражения для дозы легирования, связанным с пара-

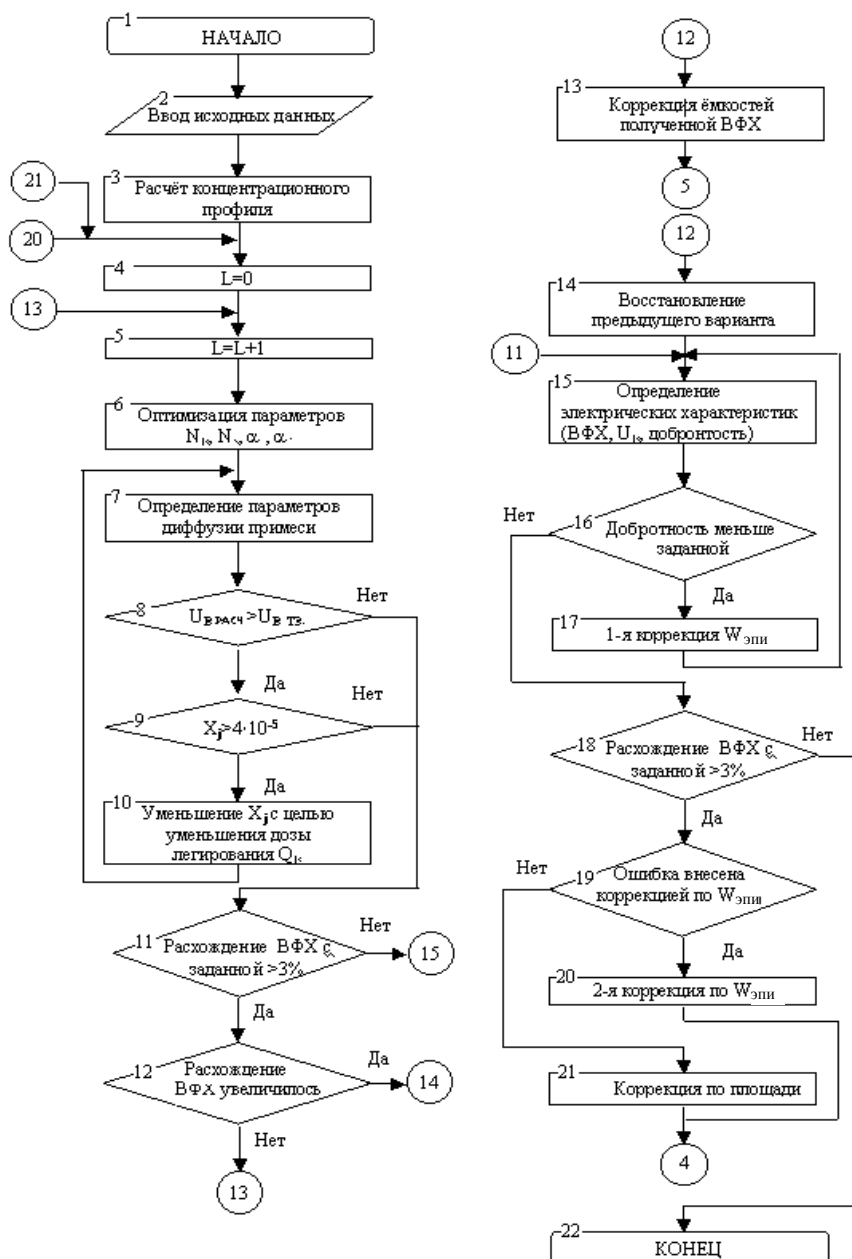


Рисунок 1 – Алгоритм программы

метрами распределения донорной примеси, и используя полученное значение L_C , находим поверхностную концентрацию донорной примеси C_S .

Для вычисления длины диффузии размытия границы подложки – эпителёнка необходимо учитывать все температурные операции, а также наличие слоя автолегирования. Глубина залегания p - n перехода определяется из концентрационного профиля, при условии, что концентрация в плоскости металлургического перехода равна нулю.

Для повышения точности моделирования необходимо экспериментально уточнить значения коэффициентов диффузии основных примесей в условиях близких к реальному технологическому процессу и различных реализаций концентрационного профиля.

Затем производится расчёт напряжения пробоя в сторону уменьшения значения глубины залегания p - n перехода по критерию соизмеримости значений полной дозы Q_B и активной части дозы Q_A для того, чтобы снизить влияние флуктуаций параметров техпроцесса на разброс ВФХ. Одновременно производится повторный расчёт параметров технологического процесса. Критерием остановки такого итерационного процесса служит заданное в ТЗ значение напряжения пробоя и ограничение на глубину залегания p - n перехода $x_j \geq 4 \cdot 10^{-5}$ см, которое накладывается надёжностью контактов.

После этого происходит построение вольтфарадной характеристики для полученной структуры варикапа. В основе алгоритма расчёта ВФХ лежит процедура решения системы двух нелинейных уравнений, описывающих расположение границ p - n перехода. При этом не делается никаких упрощающих предположений о характере распределения примеси, что позволяет точно оценить конструкцию прибора. Первое уравнение представляет собой уравнений баланса заряда в области p - n перехода. Второе уравнение – уравнение Пуассона в интегральном виде, связывающее величину потенциального барьера с границами ОПЗ. Найденные значения границ ОПЗ позволяют рассчитать ёмкость p - n перехода. Полученные значения емкостей в опорных точках сравниваются с требуемыми и определяется ошибка. Если ошибка превышает 3% (погрешность измерения), то значения емкостей и значения δ в опорных точках корректируется и процесс моделирования возвращается к этапу оптимизации конструктивных параметров (таблица 2).

На последнем этапе производится прямой расчёт электрических характеристик прибора по полученным уточнённым конструктивно-технологическим параметрам.

Таблица 2 – Электрические характеристики варикапа KB122

Параметр	Обозн.	расчёт	ТЗ
Ёмкость (1 В), Ф	C	0.158e-10	0.159e-10
Ёмкость (3 В), Ф	C	0.107e-10	0.109e-10
Ёмкость (15 В), Ф	C	0.318e-11	0.32e-11
Ёмкость (25 В), Ф	C	0.22e-11	0.22e-11
Ёмкость (28 В), Ф	C	-	0.207e-11
Коэффициент перекрытия	KC	5.210	-
Добротность	QC	660.6	600
Частота, Гц	F	0.5e8	0.5e8
Пробивное напряжение, В	UC	48.18	40
Сопротивление варикапа, Ом	R	0.534	-

Разработанная модель варикапа на основе сверхрезкого *p-n* перехода и программное обеспечение были использованы при проектировании варикапов в КБ «Приор», г. Херсон. Результаты экспериментальных исследований показали хорошее соответствие теоретическим данным для структур варикапов с коэффициентом перекрытия емкостей от 3 до 18 и максимальным напряжением до 40 В, которые в основном обеспечивают потребности аналоговой схемотехники

Библиографический список

1. Зи С. Технология СБИС / С. Зи. — М.: Мир, 1986. — 368 с.
2. Мак-Кракен Д. Численные методы и программирование на фортране / Д. Мак-Кракен, У. Дорн. — М.: Мир, 1977. — 584 с.

Поступила в редакцию 4.05.2001 г.