

06.2

©1994

## МОДЕЛЬ СВЕРХРЕЗКОГО ВАРИКАПА, УЧИТЫВАЮЩАЯ РАСШИРЕНИЕ ОБЛАСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА В $p$ - И $n$ -ОБЛАСТЯХ ПОЛУПРОВОДНИКА

*А.В.Дебелый, Б.В.Лисовой, Ю.А.Миронченко*

### Допущения и исходные уравнения

Работа варикапа основана на зависимости барьерной емкости обратносмещенного  $p-n$  перехода от управляющего напряжения. Сверхрезкий варикап в сравнении с резким имеет больший диапазон изменения емкости в одинаковом интервале изменения напряжения, что достигается введением обратного градиента концентрации примеси в базу варикапа (рис. 1).

В процессе изготовления сверхрезкого варикапа наиболее важные физические параметры структуры — распределение концентрации примеси в обратном градиенте и эпитаксиальной пленке прибора формируется на начальных стадиях технологического процесса и не могут быть откорректированы на последующих этапах. В связи с этим необходимо разработать теорию, достаточно хорошо описывающую связь технологических режимов формирования структуры и электрических параметров сверхрезкого варикапа.

При построении модели варикапа принято использовать следующие допущения.

1. Считается, что концентрация примеси, например, в  $p$ -области полупроводника значительно больше, чем концентрация примеси в  $n$ -области. Это позволяет моделировать расширение области пространственного заряда только в области с меньшей концентрацией примеси.

2. Считается, что область пространственного заряда имеет резкие границы и величина объемного заряда  $\rho(x)$  не зависит от концентрации подвижных носителей.

Первые два допущения используются для расчета вольт-фарадной характеристики резкого  $p-n$  перехода [1,2]. Однако использование только этих допущений приводит для сверхрезкого варикапа к расхождению теории и практики при малых обратных напряжениях  $\sim (1-5)$  В.

Для расчета вольт-фарадной характеристики сверхрезкого варикапа будем использовать интегральный аналог

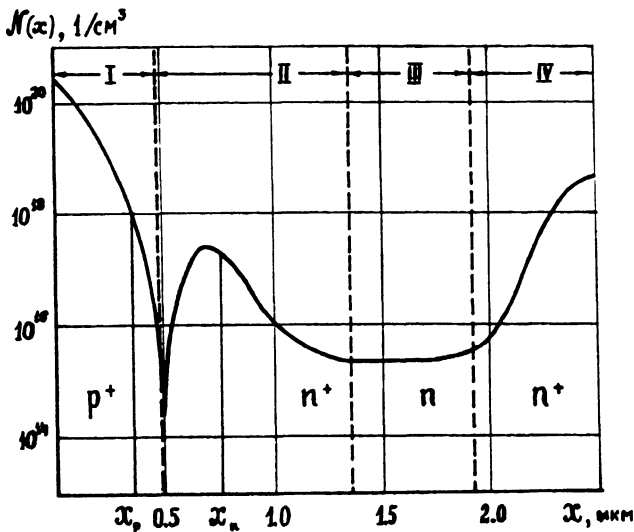


Рис. 1. Распределение примеси в структуре сверхрезкого варикапа. I —  $p^+$ -область полупроводника, II — область обратного градиента концентрации примеси, III — исходная эпитаксиальная пленка, IV — подложка;  $x_p$  — координата области пространственного заряда в  $p^+$ -области,  $x_n$  — координата области пространственного заряда в  $n^+$ -области.

уравнения Пуассона [3]:

$$V + U = \frac{q_e}{\epsilon_0 \epsilon} \int_{x_p}^{x_n} x \cdot N(x) \cdot dx \quad (1)$$

и условие электронейтральности области пространственного заряда:

$$\int_{x_p}^{x_n} q_e \cdot N(x) dx = 0. \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2) использованы следующие обозначения (см. рис. 1):  $x_n$  и  $x_p$  — координаты границ области пространственного заряда,  $N(x)$  — распределение концентрации примеси в структуре варикапа,  $q_e$  — элементарный заряд,  $\epsilon_0, \epsilon$  — электрическая постоянная и диэлектрическая проницаемость среды,  $V$  и  $U$  — контактная разность потенциалов и напряжение на варикапе.

Емкость  $p$ - $n$  перехода связана с шириной области пространственного заряда обычной формулой плоского конден-

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{x_n - x_p}, \quad (3)$$

где  $S$  — площадь  $p$ - $n$  перехода.

Распределение концентрации примеси в структуре варикапа  $N(x)$  определяется конкретным технологическим процессом формирования  $p$ - $n$  перехода. В настоящей работе использована эпитаксиально-планарная технология изготовления сверхрезкого варикапа с применением ионного легирования для формирования обратного градиента концентрации примеси. В этом случае для функции  $N(x)$  предложено следующее выражение:

$$N(x) = \frac{N}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta R \cdot \sqrt{1 + \frac{2D_d T_d}{\Delta R^2}}} \exp \left\{ -\frac{(R-x)^2}{2\Delta R^2 + 4D_d T_d} \right\} + N_0 + \frac{N_n}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{t-x}{2\sqrt{D_n T_n}} \right\} - N_a \operatorname{erfc} \left\{ \frac{x}{2\sqrt{D_a T_a}} \right\}. \quad (4)$$

В выражении (4) использованы следующие обозначения:  $N_0$  — концентрация примеси в исходной эпитаксиальной пленке,  $N_n$  — концентрация примеси в подложке,  $t$  — толщина эпитаксиальной пленки,  $D_n, T_n$  — коэффициент и время диффузии примеси из подложки,  $N_a$  — концентрация акцепторов,  $D_a, T_a$  — коэффициент и время диффузии акцепторов,  $N$  — доза легирования доноров,  $D_d, T_d$  — коэффициент и время диффузии доноров,  $R, \Delta R$  — проективный пробег и стандартное отклонение ионов донорной примеси.

Совместное решение уравнений (1)–(4), проведенное численными методами на ЭВМ, позволяет получить теоретическую зависимость  $C = f(U)$  для заданного технологического процесса. Справедливость предложенного подхода к моделированию сверхрезкого варикапа проверялась путем сравнения результатов моделирования технологического процесса изготовления прибора, выходными параметрами которого была вольт-фарадная характеристика варикапа, и практических данных, полученных в процессе разработки и изготовления сверхрезких варикапов для телевидения.

### Результаты проведенных исследований и их анализ

Варикальные структуры формировались на Si эпитаксиальной пленке  $n$ -типа (легирующий элемент — фосфор) с удельным сопротивлением 1.0 Ом · см и толщиной 5 мкм, выращенной на Si подложке  $n^+$ -типа (легирующий элемент —

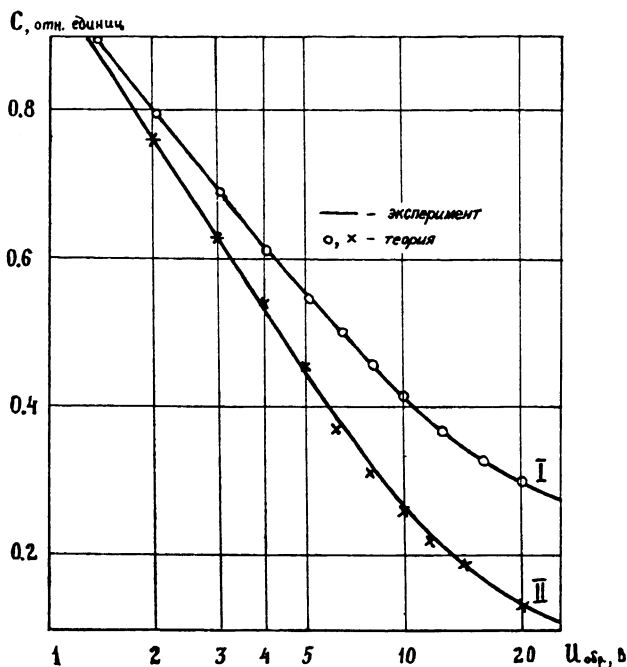


Рис. 2. Теоретические и экспериментальные вольт-фарадные характеристики для резкого и сверхрезкого варикапов.  
 I — резкий варикап; II — сверхрезкий варикап.

мышьяк) удельным сопротивлением  $0.003 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  и толщиной  $350 \text{ мкм}$ . Обратный градиент концентрации донорной примеси формировался путем имплантации ионов фосфора дозой  $2 \text{ мккл}/\text{см}^2$  и энергией  $40 \text{ KeV}$  с последующей разгонкой при температуре  $1150^\circ\text{C}$  и времени  $45 \text{ мин}$ .  $p^+$ -область формировалась путем диффузии бора из твердого источника при температуре  $1025^\circ\text{C}$  и времени  $25 \text{ мин}$ . На рис. 2 представлена вольт-фарадная характеристика сверхрезкого варикапа, промоделированная с учетом расширения области пространственного заряда в  $p$ - и  $n$ -области полупроводника и характеристика, полученная в результате изготовления партии варикапов по указанным технологическим режимам. В области рабочих напряжений от  $1$  до  $5 \text{ В}$  отмечено хорошее совпадение теоретической и экспериментальной вольт-фарадной характеристики. Максимальная абсолютная погрешность значения емкости составляет  $3\%$ . В области рабочих напряжений от  $6$  до  $16 \text{ В}$  наблюдается завал теоретической характеристики по сравнению с экспериментальной. Максимальная абсолютная погрешность емкости в этой области доходит до  $25\%$ . Такая величина погрешно-

сти может быть объяснена тем, что на данном участке рабочих напряжений область пространственного заряда находится на переходе обратного градиента концентрации примеси в исходную эпитаксиальную пленку, и используется для моделирования распределения примеси в этой области не полностью соответствует реальности. Этот участок концентрационного профиля моделируется первым слагаемым выражения (4), которое является решением уравнения диффузии для бесконечной среды в случае, когда начальное распределение имело гауссову форму. Однако, как известно из [4], последнее предположение не совсем корректно для описания распределения примеси в результате ионной имплантации. На рис. 2 также представлены результаты моделирования и эксперимента в предельном случае перехода сверхрезкого варикапа в резкий (на структурах не формировался обратный градиент концентрации донорной примеси). Необходимо отметить хорошее совпадение теоретических и экспериментальных результатов. В области напряжений от 6 до 16 В уже не наблюдается заметного различия в значениях емкости, что подтверждает предположение об ошибке этой области для сверхрезкого варикапа и корректность предложенной модели.

## Выводы

Предложенная теоретическая модель сверхрезкого варикапа, учитывающая расширение области пространственного заряда в  $p$ - и  $n$ -областях полупроводника, позволяет с достаточной точностью связать технологические режимы формирования структуры варикапа с его электрическими параметрами.

## Список литературы

- [1] Галаев А.А., Коровин С.К. // Электронная техника. Сер. 2. 1973. В. 8. С. 11-26.
- [2] Леонов В.В., Карацуба А.П. // Электронная техника Сер. 2. 1979. В. 4. С. 26-39.
- [3] Берман Л.С. Введение в физику варикапов. Л.: Наука, 1968. 179 с.
- [4] Антонетти П., Антониадис Д. и др. МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1988. 496 с.

Херсонский индустриальный  
институт

Поступило в Редакцию  
7 мая 1993 г.