

## РЕИНЖИНИРИНГ ПРОФИЛЯ ЛЕГИРОВАНИЯ ДИОДНЫХ СТРУКТУР ДЛЯ РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ ИХ РЕАКЦИИ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

## REENGINEERING OF THE DOPING PROFILE DIODE STRUCTURES FOR THE CALCULATING THEIR REACTION ON THE INFLUENCE OF IONIZING RADIATION

*И. Ю. Забавичев, А. А. Потехин, А. С. Пузанов, С. В. Оболенский*

*I. Yu. Zabavichev, A. A. Potekhin, A. S. Puzanov, S. V. Obolenskiy*

Филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ – НИИС им. Ю. Е. Сedaкова»

Branch of the Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center All-Russian Research – NIIS  
named after Yu.E. Sedakov»

Представленная в работе методика реинжиниринга распространяется на полупроводниковые диоды, изготовленные диффузионным методом. Для заданных функций пространственных распределений донорной и акцепторной примеси с неизвестными параметрами решается оптимизационная задача, критерием оптимизации является минимум среднеквадратичного отклонения между результатами расчета и измерений вольт-фарадных характеристик. Результаты восстановления профиля легирования используются в качестве исходных данных для физико-топологического моделирования реакции диодных структур на воздействие проникающих излучений. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показало адекватность предложенного подхода.

The reengineering technique presented in this work extends to semiconductor diodes made by the diffusion method. For the given functions of the spatial distributions of the donor and acceptor impurities with unknown parameters, the optimization problem is solved, the optimization criterion is the minimum root-mean-square deviation between the calculation results and the measurements of the C-V characteristics. The results of the restoration of the doping profile are used as input data for the physical topological modeling of the response of diode structures to the effect of ionizing radiation. Comparison of simulation results with experimental data has shown the adequacy of the proposed approach.

Задача оценивания реакции и последствий радиационного воздействия на полупроводниковые СВЧ приборы микроэлектроники является актуальной на сегодняшний день в силу их широкого применения в изделиях космической и военной промышленности. Традиционный метод решения этой задачи, такой как метод эквивалентной схемы, является ресурсоемким в плане проведения эксперимента и последующих измерений для калибровки модели прибора. В связи с этим для оценки реакции прибора на радиационное излучение часто применяется метод физико-топологического моделирования [1]. Геометрические размеры, свойства полупроводниковых материалов и профиль легирующей примеси выступают в качестве исходных данных физико-

топологической модели для вычисления характеристик прибора в квазигидродинамическом приближении. Необходимые для расчетов параметры можно восстановить из результатов измерений характеристик прибора. Для диодных структур такими характеристиками являются вольт-фарадные, вольт-амперные характеристиками. Имея модель, достаточно точно описывающую режимы работы прибора, и зная, как изменяются под действием ионизирующего излучения входные параметры математической модели, можно спрогнозировать реакцию полупроводниковой структуры на радиационное воздействие.

Для восстановления профиля легирования примеси в диодных структурах применяется CV метод, заключающийся в численном дифференци-

ровании вольт-фарадной характеристики. Этот подход имеет ряд недостатков, связанных с неустойчивостью численного дифференцирования к погрешностям измерения и несоответствием восстановленного профиля реальному распределению легирующей примеси структуры из-за влияния подвижных носителей заряда. Также оригинальный CV метод применим только к структурам с контактом Шоттки. Выше перечисленные обстоятельства требуют обобщения традиционного метода для случая *p-n* перехода, избавленного от данных недостатков.

Рассмотрим одномерную физико-топологическую модель диффузионного планарного диода. Распределение акцепторной примеси в простейшем случае описывается решением одномерного уравнения диффузии [2]

$$N_a(x) = N_S \exp\left(-\frac{x^2}{4L^2}\right) \quad (1)$$

для условий диффузии из ограниченного источника,

$$N_a(x) = N_S \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2L}\right) \quad (2)$$

для условий постоянной поверхностной концентрации. Здесь  $N_a(x)$  – пространственное распределение акцепторной примеси,  $L$  – характеристическая длина в распределении примесей,  $N_S$  – поверхностная концентрация легирующей примеси.

В данной работе ограничимся рассмотрением диффузии из ограниченного источника. Концентрация донорной примеси  $N_d$  в диодной структуре предполагается постоянной, что соответствует технологии изготовления диодов диффузионным методом.

Таким образом определение пространственных распределений донорной и акцепторной примеси задает также положение *p-n* перехода, которое находится из условия равенства концентрации донорной и акцепторной примеси на границе *p-n* перехода и имеет следующий вид:

$$x_0 = 2L\sqrt{\ln(N_S/N_d)} \quad (3)$$

Для заданных пространственных распределений донорной и акцепторной примеси можно записать условия непрерывности поля и потенциала в области пространственного заряда относительно глубин обедненной региона в *p*- и *n*- областях. Выражения для напряженности и потенциала электрического поля можно найти, решив уравне-

ние Пуассона с граничными условиями, соответствующими приближению полного обеднения. В итоге получится нелинейная система из двух трансцендентных уравнений относительно величин глубин обедненной региона в *p*- и *n*-областях диода:

$$\begin{cases} N_d(x_p + x_n - 2 \cdot x_0) + N_s \sqrt{\pi} L (2 \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x_0}{2L}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x_p}{2L}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x_n}{2L}\right)) = 0; \\ \frac{-N_d}{2}(x_n^2 + x_p^2 + 2 \cdot x_0^2 - 2 \cdot x_0(x_p + x_n)) - N_s \sqrt{\pi} L (\operatorname{erf}\left(\frac{x_p}{2L}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{x_n}{2L}\right)) + \\ 2 \cdot N_s \sqrt{\pi} L (x_0 \operatorname{erf}\left(\frac{x_0}{2L}\right) - \frac{2L}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{x_0^2}{4L^2}} + \frac{L}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{x_p^2}{4L^2}} + \frac{L}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{x_n^2}{4L^2}}) - \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{q} (U + U_k) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

где  $x_p$  – граница ОПЗ в *p*-области,  $x_n$  – граница ОПЗ в *n*-области,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость материала,  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума,  $U$  – внешняя разность потенциалов, прикладываемая к диоду,  $U_k$  – контактная разность потенциалов,  $q$  – абсолютный заряд электрона.

Решив систему уравнений (4), найдем зависимость толщины ОПЗ и емкости диода от внешнего напряжения с помощью следующих выражений:

$$\begin{aligned} d_0 &= x_n - x_p \\ C(U) &= \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d(U)} \end{aligned} \quad (5)$$

где  $S$  – площадь *p-n* перехода.

Восстановление пространственных распределений донорной и акцепторной примеси, основываясь на изложенной математической модели, происходит путем решения оптимизационной задачи, где в качестве неизвестных параметров выступают  $N_d$ ,  $N_s$ ,  $L$ ,  $S$ , а критерием оптимизации является минимум следующего функционала:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \frac{(\bar{C}_i - C_i)^2}{C_i^2}}, \quad (6)$$

где  $C_i$  – значение емкости, относительно которой решается задача оптимизации;  $\bar{C}_i$  – значение емкости, полученное для текущих параметров модели;  $N$  – количество точек вольт-фарадной характеристики. Выражение (6) имеет физический смысл погрешности или среднеквадратичного отклонения модельной вольт-фарадной характеристики от реально измеренной. Блок-схема описанного выше алгоритма расчета представлена на рис. 1.



Рис. 1. Блок-схема алгоритма восстановления структуры полупроводникового диода

Для независимой проверки результатов восстановления конструктивных параметров диодной структуры, необходимо рассчитанные величины использовать в качестве входных параметров физико-топологической модели прибора [3]. Выходными данными этой модели является зависимость силы тока от приложенного внешнего напряжения. Сравнивая результаты моделирования с измеренной характеристикой или характеристикой, представленной в описании на прибор, можно судить об адекватности восстановленной структуры диода. В качестве критерия оценки правильности восстановления конструктивных параметров выступает следующее выражение:

$$\sigma_I = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \frac{(\bar{I}_i - I_i)^2}{I_i^2}} \quad (7)$$

где  $I_i$  – значение силы тока, полученное из технического описания на прибор или измеренное;  $\bar{I}_i$  – значение силы тока, рассчитанное для текущих параметров модели.

Для большинства прикладных задач, в качестве исходных данных используются результаты измерений вольт-фарадных характеристик, полученные с некоторой погрешностью, определяемой инструментальной погрешностью измерительного прибора. Поэтому необходимо исследовать вопрос о зависимости точности восстановления профиля легирования предлагаемым методом от погрешности результатов измерений емкости диода от при-

ложенного внешнего напряжения и определить максимально допустимое значение инструментальной погрешности.

С этой целью были выполнены следующие вычисления. Была рассчитана исходная вольт-фарадная характеристика кремниевого диода для следующих параметров модели:  $N_s = 3 \cdot 10^{-15} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $L = 100 \text{ мкм}$ , к которой затем добавлялась нормально распределенная случайная величина с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением  $\sigma_c$ . Относительно модифицированной таким образом характеристики решалась оптимизационная задача и вычислялась погрешность восстановления профиля легирования по формуле (8):

$$\sigma_N = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{(\overline{N}(x_i) - N(x_i))^2}{N^2(x_i)}}, \quad (8)$$

где  $N(x_i)$  – профиль концентрации, относительно которого рассчитана исходная вольт-фарадная характеристика  $C_i$ ;  $\overline{N}_i$  – профиль легирования, восстановленный из вольт-фарадной характеристики  $\overline{C}_i$ ;  $n$  – количество точек пространственного профиля легирования.

На рис. 2 представлена зависимость среднеквадратического отклонения восстановленного профиля легирования от исходного для различных значений среднеквадратического отклонения моди-

фицированной вольт-фарадной характеристики от реальной.

Результаты моделирования диодной структуры можно использовать для дальнейшей оценки реакции прибора на радиационное воздействие. Для случая облучения полупроводникового материала потоком высокоэнергетичных нейтронов известны характеристические зависимости деградации подвижности носителей заряда для различных значений потока и средних энергий частиц [4]. Используя эту информацию, можно оценить, как будет изменяться вольтамперная характеристика диода под действием проникающего излучения. Чтобы результаты оценки могли считаться достоверными, погрешность физико-топологической модели не должна превышать  $\sim 20\%$ , т. е. укладываться в рамки существующей погрешности дозиметрии.

В качестве объекта исследования был выбран кремниевый высокочастотный диод 1N4148 со следующими характеристиками, исходя из которых оценивались параметры модели: напряжение пробоя  $V_b = 100$  В, сопротивление слаболегированной области диода  $R_o = 1,09$  Ом,  $U_k = 0,7$  В. Также для восстановления геометрических размеров и профиля легирования диода использовалась информация о вольт-амперной и вольт-фарадной характеристиках из технического описания на прибор. В итоге, после применения вышеописанной процедуры получились следующие значения конструктивных параметров диода:  $N_d = 9 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ ;  $N_s = 10^{17}$  см $^{-3}$ ;  $L = 0,6$  мкм;  $S = 7200$  мкм $^2$ . Результаты сравнения рассчитанных характеристик с исходными вольтфарадной и вольтамперной характеристиками представлены на рис. 3, а и 3, б соответственно.

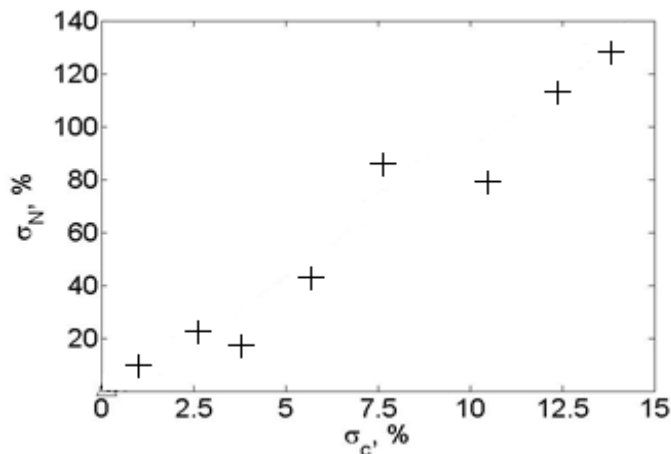


Рис. 2. Зависимость погрешности восстановления профиля легирования от погрешности данных вольт-фарадной характеристики. + – результаты расчетов

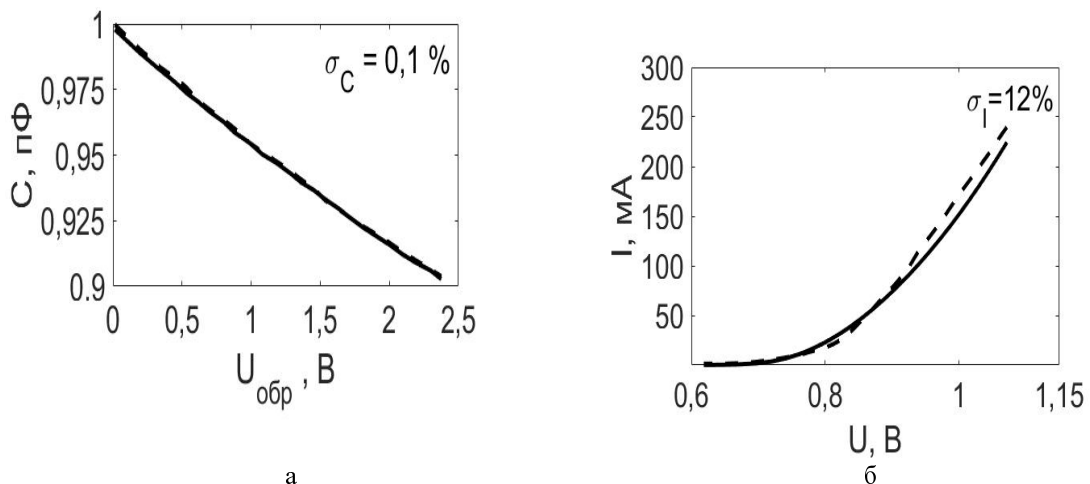


Рис. 3. Сравнение теоретической и исходной вольт-фарадных (а) и вольт-амперных (б) характеристик: — — теоретическая зависимость; - - - - зависимость из технического описания на прибор

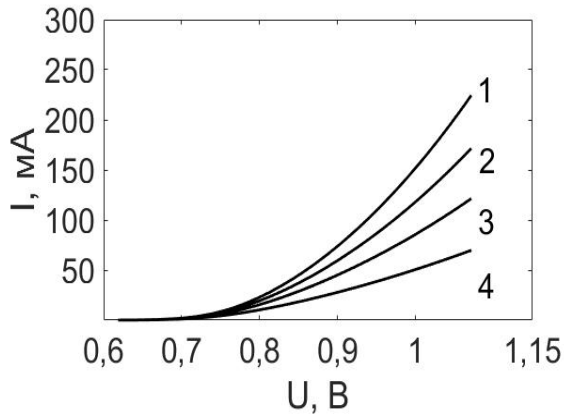


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики диода 1N4148, рассчитанные для разных значений потока нейтронов: 1 – необлученный образец; 2 –  $F = 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ; 3 –  $F = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ; 4 –  $F = 10^{15} \text{ см}^{-2}$

Среднеквадратические отклонения между двумя характеристиками составили 0,1 % для вольт-фарадных характеристик и 12 % для вольт-амперных характеристик, что свидетельствует о хорошем согласовании теоретических расчетов с практическими результатами. Погрешность расчетов не превышает 20 %, поэтому полученная информация может использоваться для дальнейшей оценки реакции прибора на радиационное воздействие.

На рис. 4 представлены результаты расчета вольтамперных характеристик диода с помощью вышеуказанной модели для различных уровней потока нейтронов. На рис. 5 представлена зависимость деградации подвижности носителей заряда в кремнии при облучении материала потоком быстрых нейтронов, которая использовалась при расчетах. Из полученных зависимостей видно, что при увеличении числа частиц на единицу площади, за счет уменьшения подвижности носителей заряда, наблюдается снижение величины силы тока.

В заключении стоит отметить, что предлагаемую методику можно обобщить для расчета характеристик более сложных диодных структур, содержащих гетерограницы и низкоразмерные

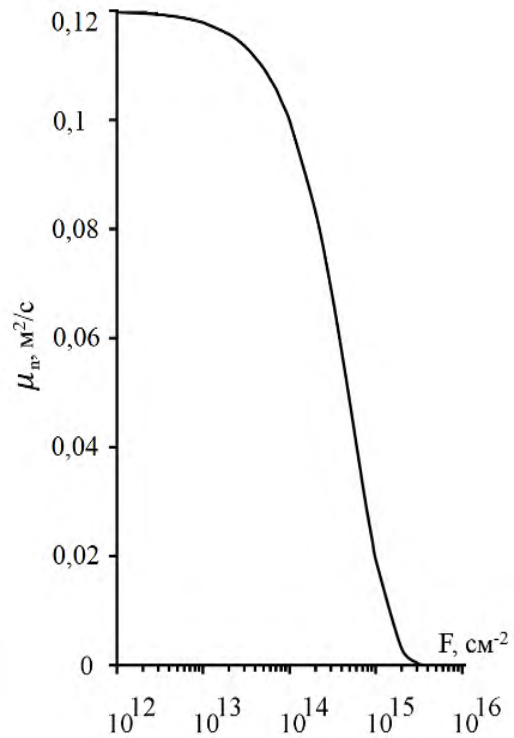


Рис. 5. Зависимость деградации подвижности в кремнии от величины потока нейтронов

квантовые объекты, а также биполярных транзисторов. В этом случае изменится структура профиля легирования рабочей области прибора и увеличится число переменных, по которым необходимо решать оптимизационную задачу, но общий подход останется прежним. Также физико-топологическую модель можно применять к любым видам радиационного воздействия, для которых известно их влияние на параметры полупроводникового материала.

### Список литературы

1. Тарасова Е. А., Оболенская Е. С., Хананова А. В. и др. // Физика и техника полупроводников, 2016, Т. 50, № 12, С.1599.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. С. 456.
3. Киселев В. К., Оболенский С. В., Пузанов А. С. и др. // Журнал радиоэлектроники, 2014, № 2.
4. Ладыгин Е. А. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники. М.: Советское радио, 1980.