

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКЦИЙ P-N ПЕРЕХОДА НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

© 2014 Г.А. Боднарчук

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Моделируются процессы, протекающие в p-n переходе под действием ступенчатого смещающего напряжения и импульсного освещения.

Преобразователь перемещения в код, уравнение непрерывности, фотоприёмник, моделирование.

Введение

В настоящее время p-n-переход является базовой структурой для создания полупроводниковых изделий электронной техники (ИЭТ). Его работа осуществляется в стационарном и нестационарном (импульсном) режимах. Наиболее интересным для практического применения является импульсный режим работы. При этом, в качестве импульсного воздействия на p-n-переход может рассматриваться излучение или изменяющееся со временем напряжение смещения. Интерес представляет токовая реакция p-n-перехода. Численное моделирование позволяет понять механизмы явлений, а также может использоваться для разработки конструкции ИЭТ, например, фотоприёмников полупроводниковых преобразователей перемещения в код.

Постановка задачи

Процессы, протекающие в p-n-переходе, описываются системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial n}{\partial t} = G - R + \nabla \cdot (D_n \nabla n - \mu_n n \nabla \varphi), \\ \frac{\partial p}{\partial t} = G - R + \nabla \cdot (D_p \nabla p + \mu_p p \nabla \varphi), \\ \Delta \varphi = -\frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} (p - n + N), \end{cases} \quad (1)$$

где G , R - темпы генерации и рекомбинации, соответственно; e - заряд электрона; ε - диэлектрическая проницаемость среды; ε_0 - абсолютная диэлектрическая проницаемость.

В данной постановке задачи, в качестве независимых переменных выступают: x, y, z -

пространственные координаты; t - время ($t \in [0; +\infty]$).

Зависимыми переменными являются: $n(x, y, z, t)$ - концентрация электронов; $p(x, y, z, t)$ - концентрация дырок; $\varphi(x, y, z, t)$ - электростатический потенциал ($E = -\nabla \varphi$).

В качестве параметров выступают: параметры вещества: μ_n, μ_p - подвижности электронов и дырок, соответственно; D_n, D_p - их коэффициенты диффузии; параметры процессов рекомбинации, концентрация легирующей примеси ($N = N_d - N_a$, где N_d - концентрация доноров, N_a - концентрация акцепторов), n_i - собственная концентрация носителей заряда.

Параметры эксперимента: $U(t)$ - напряжение смещения на p-n-переходе; $G(x, y, z, t)$ - интенсивность генерации неравновесных носителей.

В качестве измеряемой величины используется

$$I(t) = \int j(x, y, z, t) ds, \quad (2)$$

где $I(t)$ - зависимость от времени тока через p-n-переход.

Интеграл плотности тока берётся по плоскости контакта.

Для решения (1) определим начальные и граничные условия.

Начальное распределение концентрации электронов, дырок и электростатического потенциала будем находить решением (1)

для стационарного случая

$$\begin{cases} \nabla(D_n \nabla n - \mu_n n \nabla \varphi) = R, \\ \nabla(D_p \nabla p + \mu_p p \nabla \varphi) = R, \\ \Delta \varphi = -\frac{e}{\epsilon \epsilon_0} (p - n + N). \end{cases} \quad (3)$$

Граничные условия для поверхностей электрических контактов (электродов) запишутся в виде

$$\begin{cases} \varphi = V(t) + \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{\frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2}}{n_i} \right], \\ n = \frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2}, \\ p = -\frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2}. \end{cases} \quad (4)$$

Граничными условиями для остальных поверхностей будут отсутствие потоков дырок, электронов и производной электростатического потенциала по нормали к этим поверхностям.

Для моделирования процессов рекомбинации использована рекомбинация Шокли-Рида-Холла. Для неё

$$R(n, p) = \frac{np - n_i^2}{\tau_n (p + n_i) + \tau_p (n + n_i)}, \quad (5)$$

где τ_n, τ_p - время жизни электронов и дырок, соответственно.

Результаты моделирования

Для моделирования *p-n*-перехода использовался *pin* диод. Поскольку диод симметричен, расчёт проводился для половины диода. Структура правой половины приведена на рис.1. На рис.2 приведён профиль легирования вдоль оси симметрии.

В качестве параметров использовались следующие величины: $T = 300\text{K}$ - температура; $\epsilon = 11,5$ - диэлектрическая проницаемость кремния; $n_i = 1,46 \cdot 10^{10} \frac{1}{\text{см}^3}$ - собственная концентрация носителей; $\mu_n = 800 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{сек}}$ - подвиж-

ность электронов; $\mu_p = 200 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{сек}}$ - дырочная подвижность; $D_n = \frac{kT}{q} \cdot \mu_n$, $D_p = \frac{kT}{q} \cdot \mu_p$ - коэффициенты диффузии; $\tau_n = \tau_p = 1 \cdot 10^{-7}$ сек - время жизни носителей.

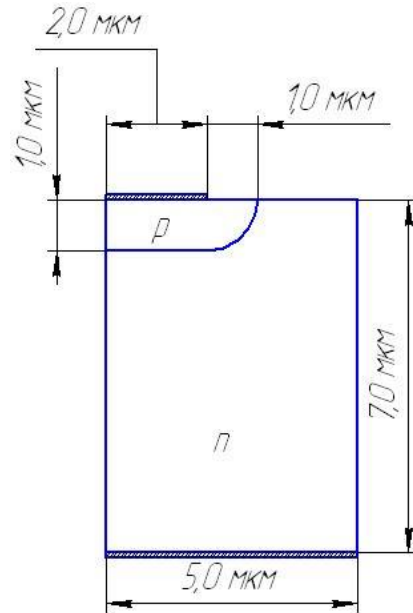


Рис.1. Pin – диод в разрезе

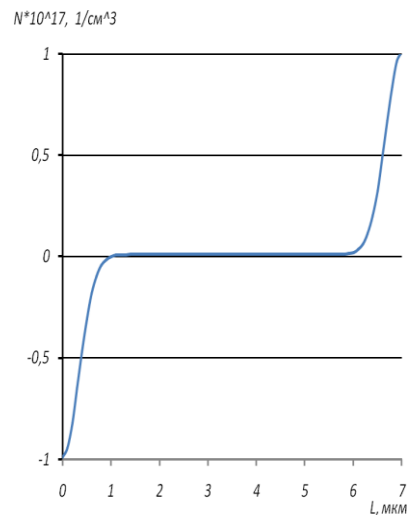


Рис.2. Профиль легирования вдоль оси симметрии

Первоначально, на основе (3)–(5) проведён расчёт прямой ветви ВАХ диода, а также влияние на неё излучения. Результаты расчётов представлены на рис.3 и 4, соответ-

ственно и совпадают с результатами ВАХ [1].

Для показанных на рис.4, мощности излучения распределены следующим образом: $P_{G0} = 0, P_{G0} < P_{G1} < P_{G2}$. Общий характер кривых соответствует теоретическим положениям [2].

Расчёты реакций диода на динамические воздействия проводились для двух видов воздействий.

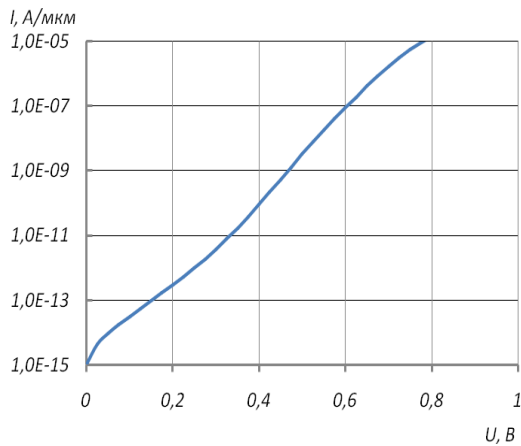


Рис.3. ВАХ диода

1. Моделирование реакции на изменение прямого смещающего напряжения.

В качестве динамического воздействия использовались: подача ступенчатого напряжения амплитудой 1В и длительностью фронта 10 нс и подача импульсного напряжения амплитудой 1В с длительностью фронта и спада по 10 нс. Результаты расчётов приведены на рис.5 и 6, соответственно.

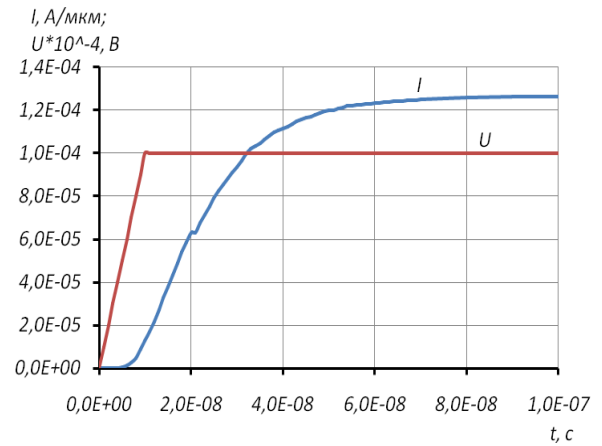


Рис.5. Реакция диода на подачу ступенчатого напряжения

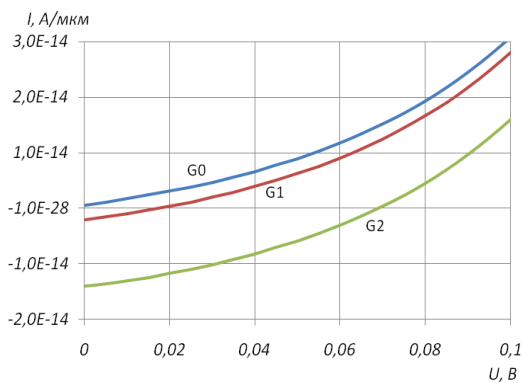


Рис.4. Влияние излучения на ВАХ диода

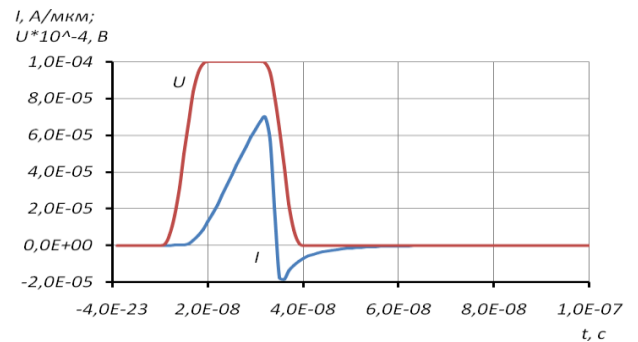


Рис.6. Реакция диода на подачу импульсного напряжения

2. Моделирование реакции на импульсное излучение.

В качестве динамического воздействия использовался импульс освещения длительностью 25 нс и длительностями фронта и спада по 10 нс. Результаты расчётов приведены на рис.7.

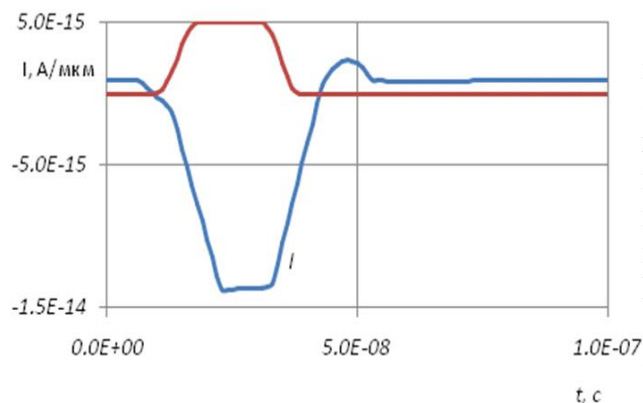


Рис.7. Реакция диода на импульс излучения

Выводы

Математическая модель процессов, протекающих в $p-n$ переходе, состоящая из системы уравнений (1) с начальными и граничными условиями (3), (4) позволяет получить количественное описание процессов при импульсном воздействии и может быть использована при разработке ИЭТ на основе $p-n$ переходов, в частности, фотоприёмников полупроводниковых преобразователей перемещения в код.

В качестве ограничения применения модели можно указать, что в данной модели $p-n$ переход может рассматриваться только как источник напряжения.

Библиографический список

1. FEMLAB User's Guide. Version 3.1. COPYRIGHT 1994–2004 by COMSOL AB.
2. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. М.: Радио и связь, 1990. 264с.

Информация об авторах

Боднарчук Геннадий Александрович, ассистент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет).

E-mail: Gennadiy.Bodnarchuk@gmail.com.
Область научных интересов: автоматизированные системы управления, элементы и устройства систем управления.

SIMULATION OF RESPONSES P-N JUNCTION TO DYNAMIC INFLUENCES

© 2014 G.A. Bodnarchuk

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The processes proceeding in $p-n$ junction under the influence of step offsetting voltage and impulse lighting are simulated.

Convertor of moving to the code, continuity equation, photo detector, simulation.

References

1. FEMLAB User's Guide. Version 3.1. COPYRIGHT 1994–2004 by COMSOL AB.
2. Vikulin I.M., Stafeev V.I. Physics of semiconductor devices. M.: Radio and communica-

About the author

Bodnarchuk Gennadiy Alexandrovich, assistant, E-mail: Gennadiy.Bodnarchuk@gmail.com.
Area of research: automated control systems, elements and devices of control systems.