

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРЕМНИЕВОГО ФОТОДИОДА С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Н. Л. Лагунович

Филиал научно-технический центр «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», ул. Корженевского, 12, 220108 Минск, Беларусь
e-mail: n_dudarby@tut.by

В настоящее время компьютерное моделирование полупроводниковых структур является одним из основных методов исследования и предварительной оценки электрофизических параметров и характеристик приборов электронной техники, так как их исследование экспериментальным путём является более сложным длительным и дорогим способом. Целью данной работы были разработка одномерной численной модели гомогенной фоточувствительной $p-n$ -структуры, изготовленной на основе кремния, и выполнение с применением данной модели расчётов распределений по глубине структуры потенциала, концентраций подвижных носителей заряда, поля, токов и зависимостей токов от интенсивности излучения, падающего на кремниевый фотодиод, в фотодиодном и фотогальваническом режимах. В процессе исследований установлено, что зависимость плотности тока, протекающего через исследуемый фотодиод, от интенсивности излучения, падающего на его структуру, носит линейный характер.

Ключевые слова: фотодиод; приборное моделирование; интенсивность излучения; плотность тока; скорость генерации; безызлучательная рекомбинация.

THE RESEARCH OF ELECTROPHYSICAL BEHAVIOR OF SILICON PHOTODIODE WITH HELP OF SIMULATION

N. L. Lagunovich

Affiliate Research & Design Center "Belmicrosystems" of Open Joint-Stock Company "INTEGRAL" – "INTEGRAL" holding managing company, Korzhenevskii Str., 12, 220108 Minsk, Belarus

Corresponding author: N. L. Lagunovich (n_dudarby@tut.by)

At present the computer simulation of semiconductor structures is one of basic procedures of devices electrophysical parameters and characteristics investigation and preliminary estimate because their testing by experimental method is the more complex, continuous and costly mode. The aim of this work were the designing one-dimensional numerical model of homogeneous photosensitive Si-based $p-n$ -structure and carrying out calculations of distributions of potential, mobile charge carrier concentrations, field, currents along the structure depth and of currents dependences from radiation intensity falling onto silicon photodiode in photodiode and photovoltaic modes with help of given model. It was determined that the current flowing through the observable photodiode density dependence from intensity of radiation falling on its structure is linear.

Key words: photodiode; device simulation; radiation intensity; current density; generation rate; radiationless recombination.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день использование математического моделирования [1, 2] при разработке новых и усовершенствовании уже полученных изделий электронной техники является важным, а порой и необходимым этапом в процессе их проектирования, т. к. позволяет сэкономить время разработки, сократить количество затрачиваемых материалов и трудовых ресурсов. Фоточувствительные приборы находят разнообразнейшее применение в различных сферах промышленного производства. Их используют в технике контроля и регулирования различных физических величин, в системах автоматического управления. Датчики с применением фотоприборов применяются для создания устройств систем безопасности. Фоточувствительные приборы – важнейшие элементы любого оптико-электронного устройства, системы [3, 4], так как они связывают оптическую и радиоэлектронную части в аппаратуре. Следовательно, их характеристики должны отвечать наилучшему согласованию в цикле приема оптического излучения и обработки электрических сигналов.

В данной работе основное внимание уделено гомогенным фоточувствительным p - n -структурам, изготовленным на основе кремния, изучению их электрофизических свойств и характеристик с помощью приборного моделирования [4]. Целью данной работы были разработка одномерной численной модели такой структуры и выполнение с применением данной модели расчётов распределений потенциала, концентраций подвижных носителей заряда, поля, токов по глубине структуры и зависимостей токов от интенсивности излучения, падающего на фотодиод, в фотодиодном и фотогальваническом режимах. Разработанная автором в среде *Delphi* программа *MOD-1D* [5], позволила выполнить расчеты и графическое построение вышеперечисленных распределений и зависимостей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящее время материалами для изготовления фотодиодов служат в основном Ge, Si, InSb, GaAs, GaP, а также тройные соединения, например GaAsP, GaAlAs, GaInP, HgCdTe [2]. Так как в условиях производства ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» приборы изготавливаются в основном на кремниевых пластинах, в данной работе речь идёт о моделировании фотодиода, получаемого на основе Si. Кроме того, кремниевые фотодиоды имеют существенные преимущества по сравнению, например, с германиевыми по стабильности их параметров при изменении температуры, влажности, давления окружающей среды. Например, темновой ток фотодиодов, получаемых на основе Si, почти постоянен в широком диапазоне температур окружающей среды, а аналогичный параметр фотодиодов на основе Ge может меняться в 3 – 5 раз при изменении температуры от 20 до 50 °C. Кремниевые фотодиоды могут работать с большими обратными напряжениями (до 100 В), что недопустимо для германиевых приборов. Эти и другие свойства кремниевых фотодиодов обусловили выбор материала, на основе которого они изготавливаются, в рамках данной работы.

Моделирование исследуемой структуры осуществлялось с использованием программы для одномерного приборного моделирования MOD-1D [5] (программа внедрена и зарегистрирована 21.03.2014 г. под № 125 в Филиале НТИ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»), разработанной автором, и в которой была использована разработанная автором модель ис-

следуемой структуры. Основу такой модели составила фундаментальная система уравнений полупроводника (ФСУ) в диффузионно-дрейфовом приближении и в предположении справедливости статистики Больцмана. Решение ФСУ выполнялось методом Гуммеля [6], на каждой итерации численной реализации которого выражения, входящие в состав ФСУ в дискретной форме, решались методом Гаусса [7, 8]. Алгоритмы реализации указанных способов решения ФСУ совместно с выражениями, описывающими процессы рекомбинации в структуре и модели подвижности для электронов и дырок, заложены в основе программы MOD-1D [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Известно, что фотодиоды, изготовленные на основе кремния, работают в интервале длин волн 0,5...1,1 мкм [3]. Расчет исследуемой кремниевой фотодиодной структуры, как указано выше, был выполнен с помощью универсальной программы MOD-1D [5], в основе которой была заложена разработанная автором модель фотодиода, представляющая собой ФСУ в диффузионно-дрейфовом приближении, в которой уравнение Пуассона для одномерного случая выглядит следующим образом:

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = -\frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0} (p - n + N_d - N_a), \quad (1)$$

где φ – электростатический потенциал; x – значение координаты вдоль направления X ; p , n – концентрации электронов и дырок, соответственно; q – заряд электрона; ε – относительная диэлектрическая проницаемость; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; N_d – концентрация доноров; N_a – концентрация акцепторов; а уравнения непрерывности для электронов и дырок записываются в следующем виде:

$$\frac{\partial J_n}{\partial x} - qR + qG_n - q \frac{\partial n}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

и

$$\frac{\partial J_p}{\partial x} + qR - qG_p + q \frac{\partial p}{\partial t} = 0, \quad (3)$$

где J_n и J_p – электронная и дырочная составляющие тока; t – время; R и G – скорости рекомбинации и генерации носителей заряда, соответственно.

Скорости генерации электронов и дырок рассчитывались по формуле [3]:

$$G_n = G_p = \alpha(1-r)I_0 \cdot e^{-\alpha x}, \quad (4)$$

где α – коэффициент поглощения излучения; r – коэффициент отражения излучения; I_0 – интенсивность излучения, падающего на фотоприемник.

Предполагалось, что механизм безызлучательной рекомбинации как в объеме, так и на поверхности полупроводника описывается уравнением Шокли-Рида-Холла [7], для которого имеет место равенство:

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

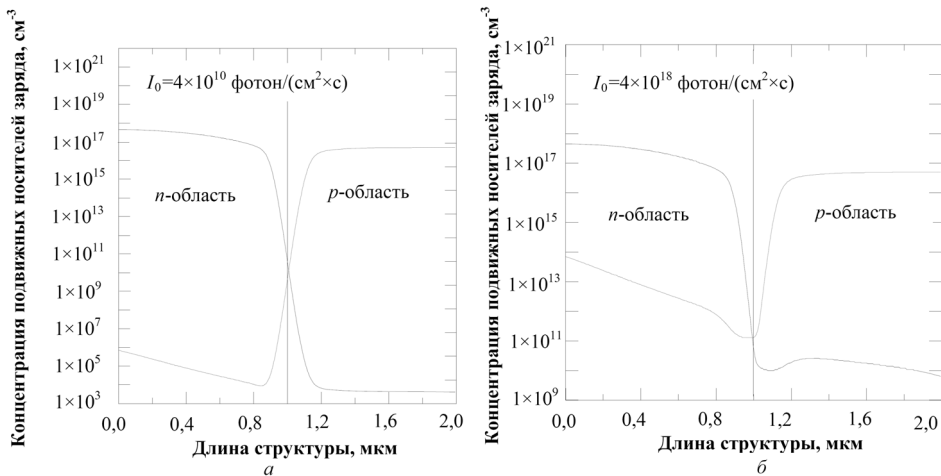
где τ_n , τ_p – эффективные времена жизни электронов и дырок, соответственно; n_i – собственная концентрация подвижных носителей заряда в полупроводнике.

Распределение легирующей примеси в рассматриваемом случае имело вид, характерный для профилей гауссовского типа, получаемого в результате термической диффузии легирующей примеси [7]:

$$N_{x1} = N_d(x) - N_a(x) = c_d \exp(-(x / L_0)) - c_a, \quad (6)$$

где $N_d(x)$, $N_a(x)$, – распределение концентраций доноров и акцепторов, соответственно; c_d – максимальное значение концентрации доноров; c_a – значение концентрации акцепторов; L_0 – параметр, задаваемый условием $N(x_{p-n}) = 0$, где x_{p-n} – глубина залегания p – n -перехода.

Расчёты были выполнены для различных значений c_d и c_a , x_{p-n} и общей длины исследуемой структуры фотодиода. На рис. 1 в качестве примера приведены распределения концентраций подвижных носителей заряда по структуре при нулевом напряжении смещения для двух различных значений интенсивности излучения. Длина моделируемой части прибора была взята равной 2 мкм, глубина залегания p – n -перехода $x_{p-n}=1$ мкм, концентрация $c_d=5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, концентрация $c_a=5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, коэффициент поглощения излучения $\alpha=4 \times 10^4$, коэффициент отражения излучения $r=0,3$. Расчёты выполнялись для случая, когда излучение поглощается в n -области. Из рисунка 1 видно, что концентрация неосновных носителей заряда (в рассматриваемом случае дырок) спадает по мере удаления от поверхности p – n -перехода, на которой происходит генерация неравновесных электронов и дырок. Часть сгенерированных в n -области неравновесных дырок в результате диффузии достигает границы p – n -перехода и под воздействием потенциального барьера переходит в область с p -проводимостью. Из рис. 1, б хорошо видно, что в области объемного заряда наблюдается резкий спад концентраций подвижных носителей заряда, связанный с наличием внутреннего поля на границе p – n -перехода.



***a* – поток света $I_0 = 4 \times 10^{10}$ фотон/(см²×с);
б – поток света $I_0 = 4 \times 10^{18}$ фотон/(см²×с)**

Рисунок 1. Зависимости концентраций подвижных носителей заряда кремниевой фотодиодной структуры от координаты при падающем потоке света $I_0 = 4 \times 10^{10}$ фотон/(см²×с) (*a*) и $I_0 = 4 \times 10^{18}$ фотон/(см²×с) (*б*), полученные с применением MOD-1D

На рис. 2 представлены результаты расчета зависимости плотности тока, протекающего через рассматриваемый фотодиод, от интенсивности падающего на него излучения при напряжении прямого включения $U = 0,5$ В (фотодиодный режим), при напряжении $U = 0$ В и при напряжении $U = -1$ В (фотогальванический режим).

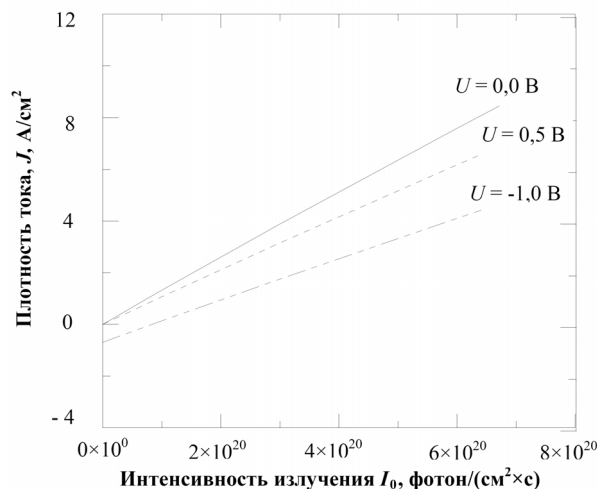


Рисунок 2. Зависимость плотности тока, протекающего через фотодиодную кремниевую p – n -структуру, от интенсивности излучения при различных напряжениях смещения на фотодиоде

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнение приборного моделирования структуры кремниевого фотодиода, выполняющего функции приёмника излучения как самостоятельно, так и в составе оптико-электронных систем, позволило исследовать ряд его электрофизических свойств и характеристик, построить зависимости плотности тока, протекающего через структуру прибора, от интенсивности излучения, падающего на его поверхность, в фотодиодном и фотогальваническом режимах. В процессе исследований установлено, что концентрация неосновных носителей заряда (в рассмотренном случае дырок) спадает по мере удаления от поверхности p – n -перехода, на которой происходит генерация неравновесных электронов и дырок, а в области объемного заряда наблюдается резкий спад концентраций подвижных носителей заряда, связанный с наличием поля на границе p – n -перехода. Исследования также показали, что зависимости плотности тока, протекающего через структуру прибора, от интенсивности излучения, падающего на фотодиод, носят линейный характер.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов / П. Антонетти [и др.] – М. : Радио и связь, 1988. — 496 с.
2. Лагунович, Н.Л. Исследование электрофизических свойств p – n ⁺-перехода с помощью моделирования в декартовой и цилиндрической системах координат / Н.Л. Лагунович // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем: сб. тр. X Всероссийск. науч.-технич. конф., Москва, Россия, март–ноябрь, 2021 г.: в 4 вып. – Москва, 2021. – Вып. 1. – С. 33–38

3. Пароль, Н.В. Фоточувствительные приборы и их применение / Н.В. Пароль, С.А. Кайдалов. — М. : Радио и связь, 1991. — 112 с.
4. Тарасов, В.В. Введение в проектирование оптико-электронных приборов: системный подход / В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушенко. — М. : Университетская книга, 2016. — 485 с.
5. Компьютерная программа MOD-1D: св. о рег. комп. прогр. 742 Респ. Беларусь / Н.Л. Лагунович; заявитель ОАО “ИНТЕГРАЛ”-управляющая компания холдинга “ИНТЕГРАЛ” — № t 20140041; зап. в Реестре зарегистрированных в Нац. центре интеллектуал. собственности комп. программ 10.03.15.
6. Gummel, H.K. A self consistent iterative scheme for one-dimentional steady state transistor calculations / H.K. Gummel // IEEE Trans. Electron. Dev. — 1964. — Vol. ED-11, № 10. — P. 455 – 465.
7. Польский, Б.С. Численное моделирование полупроводниковых приборов / Б.С. Польский. — Рига : Зинатне, 1986. — 168 с.
8. Самарский, А.А. Методы решения сеточных уравнений /А.А. Самарский, Е.С. Николаев. — М. : Наука, 1978. — 326 с

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ РОСТА SiC ПРИ БЫСТРОЙ ВАКУУМНО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ КРЕМНИЯ

М. В. Лобанок¹, М. А. Моховиков², П. И. Гайдук¹

¹⁾ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь*

²⁾ *Белорусский государственный университет, Институт прикладных физических проблем
им. А. Н. Севченко, ул. Курчатова 7, 220045 Минск, Беларусь
e-mail: lobanokMV@bsu.by*

В работе представлены результаты исследования структуры, фазового состава и кинетики роста эпитаксиальных слоев карбида кремния на кремниевых подложках при их быстрой вакуумно-термической обработке. Методами просвечивающей электронной микроскопии установлено формирование слоев кубического политаипа SiC (3C-SiC) на кремнии при карбидизации в диапазоне температур 1000–1300 °С. Обнаружено, что формирование слоев SiC проходит в два этапа, характеризующихся различными энергиями активации, а именно, в более низкотемпературном диапазоне от 1000 до 1150 °С энергия активации процесса роста SiC составляет $E_a = 0.67$ эВ, тогда как в диапазоне температур от 1150 до 1300 °С, энергия активации значительно выше ($E_a = 6.3$ эВ), что указывает на смену лимитирующего физического процесса.

Ключевые слова: гетероструктуры SiC/Si; активация энергии; вакуумная карбидизация; быстрая термическая обработка; тонкие пленки.

TEMPERATURE DEPENDENCE OF SiC GROWTH BY RAPID VACUUM THERMAL PROCESSING

M. V. Lobanok¹, M. A. Makhavikou², P. I. Gaiduk¹

¹⁾ *Department of Physical electronics and nanotechnology, Belarusian State University, Belarus*

²⁾ *Sevchenko Institute of Applied Physics Problems, Belarusian State University, Belarus
Corresponding author: M. V. Lobanok (lobanokMV@bsu.by)*