

электронов, заметно уменьшается — для транзисторов с $d_j = 5$ нм почти в четыре раза, а с $d_j = 100$ нм почти в десять раз в сравнении с транзистором с $d_j = 10$ нм.

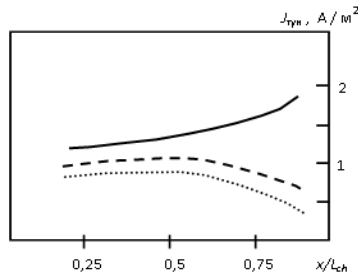


Рисунок 1 – Изменения вдоль проводящего канала элемента флеш-памяти величины плотности паразитного туннельного тока на плавающий затвор

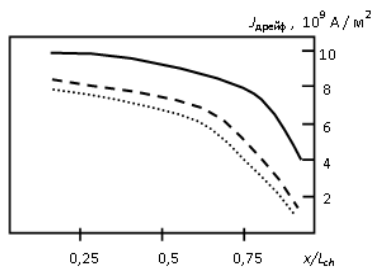


Рисунок 2 – Изменения вдоль проводящего канала элемента флеш-памяти величины плотности дрейфового тока, текущего от истока к стоку в канале транзистора у поверхности раздела Si/SiO₂

Понять такое качественное изменение характера этой зависимости позволяет рисунок 2. Как можно видеть, вблизи стока происходит заметное уменьшение плотности текущего в канале у поверхности раздела Si/SiO₂ дрейфового тока. При этом у транзисторов с глубокими истоком и стоком такое уменьшение выражено куда сильнее (в 7–8 раз), нежели с мелкими (чуть более чем в 2 раза). И хотя энергия электронов у стока повышается, у транзисторов с глубокими стоками она не может компенсировать существенное уменьшение плотности дрейфового стока у туннельного оксида, что и приводит к уменьшению величины паразитного туннельного тока.

Как показывает рисунок 3, такое уменьшение плотности дрейфового тока у поверхности обусловлено более сильным растеканием линий тока

в глубь подложки для транзисторов с глубоким истоком и стоком и повышением плотности дрейфового тока в сечениях канала, удаленных от поверхности Si/SiO₂.

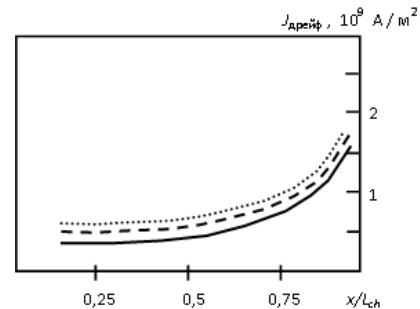


Рисунок 3 – Изменения вдоль проводящего канала элемента флеш-памяти величины плотности дрейфового тока в сечении канала в глубь подложки в 50 нм от поверхности раздела Si/SiO₂

Закключение. Таким образом, с помощью кинетического моделирования электронного переноса методом Монте-Карло были рассчитаны зависимости вдоль канала величины плотности паразитного туннельного тока. Показано, что в транзисторах с глубокими истоками и стоками наблюдается заметное уменьшение величины этой плотности, что свидетельствует о подавлении в них паразитного туннелирования за счет растекания линий тока в глубь подложки.

Литература

11. De Salvo, B. Silicon Non-Volatile Memories: Paths of Innovation / B. De Salvo. – London: Wiley-ISTE, 2009. – 256 p.
2. Жевняк, О. Г. Моделирование пространственных характеристик электронного переноса в элементах флеш-памяти / О. Г. Жевняк, Я. О. Жевняк // Международный научно-исследовательский журнал. – 2020. – Вып. 10, Ч. 1. – С. 6–9.
3. Борздов, В. М. Моделирование методом Монте-Карло приборных структур интегральной электроники / В. М. Борздов, О. Г. Жевняк, Ф. Ф. Комаров, В. О. Галенчик. – Мн.: БГУ, 2007. – 175 с.
4. Жевняк, О. Г. Моделирование влияния глубины залегания стока на паразитные туннельные токи в элементах флеш-памяти / О. Г. Жевняк, В. М. Борздов, А. В. Борздов // Евразийский Союз Ученых. Серия: Технические и физико-математические науки. – 2021. – Т. 1, № 12. – С. 58–61.

УДК 681

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СТАЦИОНАРНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ С ПОМОЩЬЮ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ, РЕАЛИЗОВАННОГО НА ЯЗЫКЕ PYTHON

Забогонский К. А., Шадурская Л. И., Воробей Р. И., Гусев О. К.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В работе представлено моделирование процессов стационарной рекомбинации с использованием специализированного программного обеспечения, реализованного на языке Python. Разработанный программный комплекс позволяет учитывать влияние дефектов и примесей в полупроводниках и получать зависимости функций заполнения и времени жизни носителей от концентрации избыточных зарядов.

Ключевые слова: полупроводники, рекомбинация, моделирование, Python, программное обеспечение.

MODELING OF STATIONARY RECOMBINATION PROCESSES USING SPECIALIZED SOFTWARE IMPLEMENTED IN PYTHON

Zabogonsky K.A., Shadurskaya L.I.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The paper presents modeling of stationary recombination processes using specialized software implemented in Python. The developed software allows considering the influence of defects and impurities in semiconductors and provides dependencies of filling functions and carrier lifetime on excess charge concentration.

Keywords: semiconductors, recombination, modeling, Python, software.

Адрес для переписки: Забогонский К. А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь e-mail: kزابogonski@gmail.com

Развитие современной микроэлектроники неразрывно связано с улучшением характеристик полупроводниковых приборов. Одним из ключевых факторов, влияющих на эффективность работы таких устройств, является рекомбинация неравновесных носителей заряда (ННЗ). Время жизни электронов (τ_n) и дырок (τ_p) определяется сложным комплексом процессов, зависящих от температуры, уровня инжекции, а также от параметров дефектов и примесей, присутствующих в полупроводниках. Корректный расчет τ_n и τ_p представляет сложную задачу при наличии нескольких типов дефектов и примесей, взаимодействующих между собой.

Численные методы позволяют учитывать взаимодействие различных центров в условиях произвольного уровня инжекции [1]. Расчет требует решения системы нелинейных уравнений, в которых переменными являются неравновесные стационарные функции заполнения дефектов f_i , а сами уровни описывают баланс между процессами захвата и эмиссии. Обычно такие системы решаются с помощью итерационных численных методов, например, метода Ньютона или его модификаций, реализованных в библиотеке `scipy.optimize`. Специализированное программное обеспечение позволяет автоматизировать процесс вычислений, снизить вероятность ошибок и ускорить получение результатов. В качестве инструмента для реализации был выбран язык Python, обладающий широким набором библиотек для научных расчетов, удобством синтаксиса и высокой популярностью в инженерных задачах. На рисунке 1 приведена блок-схема алгоритма решения системы нелинейных уравнений, описывающих рекомбинационные процессы в полупроводниках с несколькими видами примесей и дефектами в широком диапазоне уровней инжекции.

Вторая часть программного комплекса была направлена на расширение модели с учетом трех рекомбинационных уравнений. Для этого система уравнений была дополнена функцией f_3 , вычисляющей перезарядку третьего уровня в зависимости от уровня инжекции. Решение выполнялось численно при помощи метода `fsolve` из пакета `scipy.optimize`. Для удобства анализа исходных данных и результатов вычислений использовались табличные формы с применением библиотеки `PrettyTable`.

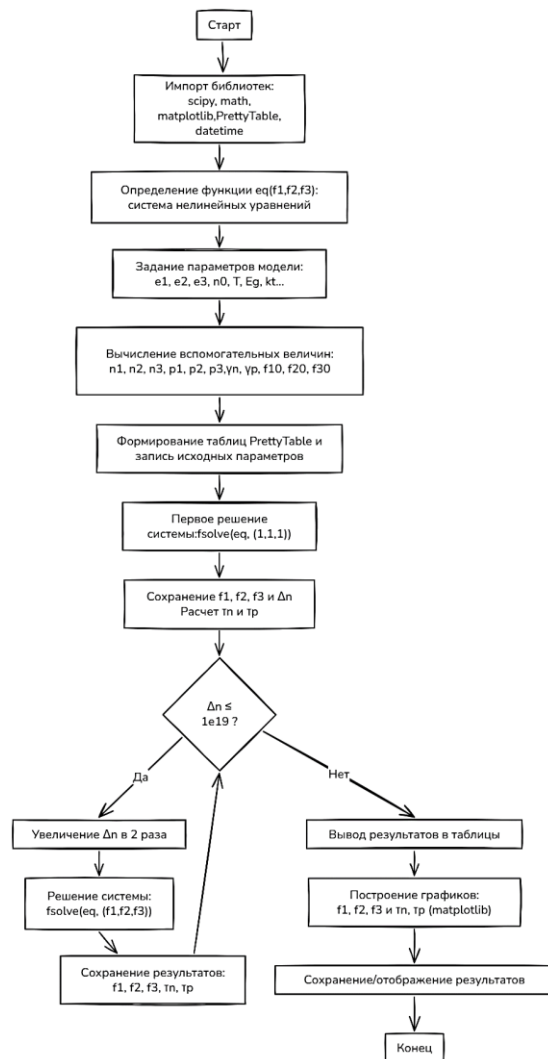


Рисунок 1

В результате проведенного моделирования получены зависимости неравновесных стационарных функций распределения f_1 , f_2 , f_3 , а также времени жизни электронов и дырок τ_n и τ_p от концентрации избыточных носителей заряда в случае трех типов глубоких уровней в запрещенной зоне полупроводника (рисунки 1 и 2).

$$\Delta n = 1 \cdot 10^8, T = 100\text{K}, E_g = 0.745 \text{ эВ},$$

$$e_1 = 0.20 \text{ эВ}, e_2 = 0.15 \text{ эВ}, N = 7 \cdot 10^{14},$$

$$n_0 = 3 \cdot 10^{13}, \gamma_{n1} = 2.0 \cdot 10^{-12},$$

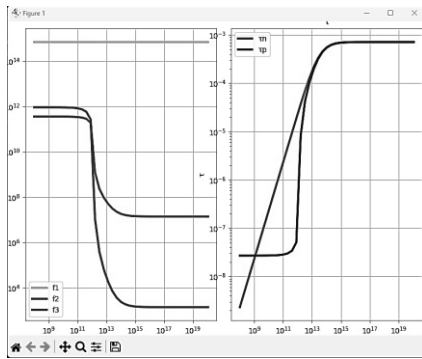


Рисунок 2

$$\gamma n_2 = 1.0 \cdot 10^{-10}, \gamma p_1 = 1.0 \cdot 10^{-4},$$

$$\gamma p_2 = 1.0 \cdot 10^{-6}, k$$

УДК 681

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ С ГЛУБОКИМИ ЦЕНТРАМИ

Забогонский К. А., Шадурская Л. И., Свистун А. И., Самарина А. В.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В работе рассматривается разработка программного обеспечения для расчета времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниках с глубокими центрами. Использован язык Python и специализированные библиотеки для численного решения уравнений и визуализации результатов. Программное обеспечение автоматизирует вычисления и позволяет эффективно интерпретировать данные.

Ключевые слова: полупроводники, время жизни, Python, моделирование, программное обеспечение.

SOFTWARE DEVELOPMENT FOR CALCULATING THE LIFETIME OF NON-EQUILIBRIUM CHARGE CARRIERS IN SEMICONDUCTORS WITH DEEP CENTERS

Zabogonsky K. A., Shadurskaya L. I.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The paper presents the development of software for calculating the lifetime of non-equilibrium charge carriers in semiconductors with deep centers. Python and specialized libraries for numerical solutions and visualization were used. The software automates calculations and provides effective data interpretation.

Keywords: semiconductors, lifetime, Python, modeling, software.

Адрес для переписки: Забогонский К. А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: k zabogonski@gmail.com

В работе рассматривается разработка программного обеспечения для расчета времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниках с глубокими центрами. Для реализации использован язык программирования Python и специализированные библиотеки для численного решения уравнений и визуализации результатов. Приводится структура программы, примеры кода и графическая интерпретация полученных данных.

Современные технологии в области приборостроения и микроэлектроники требуют высокой точности при расчетах характеристик полупроводниковых материалов. Одним из ключевых параметров является время жизни неосновных носителей заряда, от которого зависят электрические свойства материала и эффективность работы приборов [1].

$$T = 8.617 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}$$

Предложенная программа и моделирование рекомбинационных процессов с ее использованием позволяет сформировать целостную картину процессов в полупроводниковом материале с произвольным количеством дефектов разной природы в широком диапазоне уровней инжекции.

Литература

1. Забогонский, К. А. Итерационный метод расчета времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниках / К. А. Забогонский, И. А. Париза, Л. И. Шадурская // Новые направления развития приборостроения: материалы 17-й Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых и студентов, Минск, 17–19 апр. 2024 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: О. К. Гусев (пред.) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2024. – С. 32–33.

Разработка специализированного программного обеспечения позволяет автоматизировать процесс вычислений, снизить вероятность ошибок и ускорить получение результатов. В качестве инструмента для реализации был выбран язык Python, обладающий широким набором библиотек для научных расчетов, удобством синтаксиса и высокой популярностью в инженерных задачах.

При моделировании учитывались уравнения, описывающие рекомбинационные процесс стационарной рекомбинации в полупроводниках содержащие примеси и дефекты с глубокими уровнями. Основной задачей было решение системы нелинейных уравнений относительно функций f_i ($i = 1, 2 \dots$), описывающих инжекционную перезарядку дефектов.

Для решения применялся численный метод с использованием функции `fsolve` из библиотеки