

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПЛАСТИНЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА РАБОТУ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

ЧЕРНЫШОВ Н.Н., СЛИПЧЕНКО Н.И.,
ПАНЧЕНКО А.Ю., ЛЮ ЧАН, ЩЕРБАК Е.Л.

Проводится 3D-расчет компонент электрического поля в кремниевой пластине, помещенной в магнитное поле при пропускании тока. Результаты расчета распространяются в область применения теории кинетических явлений в полупроводниках. Методика расчета является первым этапом создания численной модели фотоэлектрических преобразователей в магнитном поле и необходима при оптимизации конструкций фотоэлектрических преобразователей для повышения КПД.

Введение

В настоящее время актуальной задачей является разработка чистых технологий энергообеспечения и создания альтернативных источников энергии. Одним из наиболее эффективных путей в этом направлении является создание фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) солнечной энергии [1]. Однако одних только традиционных способов оптимизации конструктивно-технологических решений уже недостаточно для решения практических задач [2]. Поэтому актуальным является поиск альтернативных путей повышения КПД ФЭП. Один из таких путей – использование магнитного поля.

Анализ экспериментальных результатов, представленных в современной литературе, например [3], указывает на эффективность применения магнитного поля для повышения КПД ФЭП. Это обуславливает целесообразность развития теоретических основ и численных моделей, обеспечивающих развитие данного направления.

Целью настоящей работы является создание математической модели, основанной на теории кинетических явлений в полупроводниках [4,5] и адаптированной для вычисления фотоэлектромагнитных явлений. Для практической реализации модели использован метод конечных элементов (МКЭ) [6].

1. Теоретические основы расчетной модели

Теория кинетических явлений в полупроводниках основана на результатах экспериментальных исследований [4]. Она описывает явления переноса, которые определяют многие свойства полупроводников и физические процессы в них. Общая причина этих явлений заключается в том, что электроны проводимости переносят физические величины: массу, электрический заряд, энергию, спин. Это приводит к ряду

электрических и тепловых эффектов, которые используются для создания полупроводниковых приборов различного назначения.

При построении численной модели здесь использованы основные соотношения кинетической теории полупроводников. Внешнее электрическое поле обуславливает движение электронов со средней скоростью дрейфа $\langle \vec{v} \rangle \equiv \vec{v}_d$. С ее помощью вводится понятие дрейфовой подвижности μ как коэффициент в $\vec{v}_d = \mu \vec{E}$ и выражается плотность тока через концентрацию n и заряд носителей e : $\vec{j} = en\vec{v}_d = en\mu \vec{E}$. Тогда удельная электропроводность γ , связывающая $\vec{j} = \sigma \vec{E}$, определяется как $\sigma = en\mu$.

Явления переноса заряда в полупроводниках определяются совокупностью коэффициентов $\gamma_{\alpha\beta}$, которые связывают компоненты поля \vec{E} и вектора \vec{j} и являются компонентами тензора 2-го ранга — тензора электропроводности:

$$\begin{cases} j_x = \sigma_{xx} E_x + \sigma_{xy} E_y + \sigma_{xz} E_z; \\ j_y = \sigma_{yx} E_x + \sigma_{yy} E_y + \sigma_{yz} E_z; \\ j_z = \sigma_{zx} E_x + \sigma_{zy} E_y + \sigma_{zz} E_z. \end{cases} \quad (1)$$

Приведенные выше соотношения кинетической теории позволяют выразить ЭДС Холла, которая в направлении, перпендикулярном к дрейфовому току, пропорциональна магнитной индукции B :

$$\vec{E}_\perp = K[\vec{B}, \vec{j}], \quad (2)$$

где K – коэффициент пропорциональности.

Внешнее магнитное поле вносит искусственную анизотропию, поэтому полную плотность тока в освещаемом полупроводнике запишем в тензорном виде. Она определяется полем \vec{E} и градиентом концентраций дырок и электронов

$$j_\alpha = \sigma_{\alpha,\beta} E_\beta + eD_{\alpha,\beta}^n \frac{\partial n}{\partial x_\beta} - eD_{\alpha,\beta}^p \frac{\partial p}{\partial x_\beta}, \quad \alpha, \beta = 1, 2, 3, \quad (3)$$

где D – коэффициенты диффузии.

Фотоэлектромагнитный эффект (ФЭМ) имеет то же происхождение, что и эффект Холла. Однако в случае эффекта Холла направления токов, создаваемых электронами и дырками, одинаковы, а направления потоков — противоположны. Поэтому магнитное поле отклоняет оба эти потока в одну и ту же сторону, и ЭДС Холла определяется разностью токов [3]. Результирующие угол Холла и постоянная Холла при смешанной проводимости могут даже обращаться в нуль. В случае ФЭМ эффекта направления потоков дырок и электронов одинаковы. Магнитное поле отклоняет их в разные стороны, и ФЭМ ЭДС определяется суммой обоих токов. Фотоэлектромагнитный эффект позволяет получить ЭДС, намного превосходящую обычную фото-ЭДС. Это явление позволяет увеличить эффективность ФЭП.

В имеющейся в настоящее время программных пакетах отсутствует возможность непосредственно описать процесс генерации носителей под действием света. Поэтому при построении модели этот процесс необходимо заменить иным. В данном случае он заменен действием внешнего источника тока, величина которого выбрана с учетом коэффициентов диффузии и возможных величин градиентов носителей (3).

2. Особенности численной модели

Исследуемая система состоит из двух постоянных высококоэрцитивных магнитов (ПМ), между которыми помещена прямоугольная кремниевая пластина. К противоположным торцам пластины подключен внешний источник электрического тока величиной 1 А.

При формировании исходных условий учитывалась проводимость полупроводника, суммарное магнитное поле в нем, с учетом размеров магнитов и полупроводниковой пластины. Внешний размер области подбирался таким, чтобы при допустимом времени расчетов можно было пренебречь погрешностью вычисления магнитного поля между магнитами.

Точность расчетов МКЭ определяется плотностью разбиения пространства на элементарные области, поэтому предварительно определялись параметры сетки (Mesh) из условия допустимой асимптотической погрешности расчета магнитного поля в центре исследуемой области. На рис.1 представлено исходное разбиение, предлагаемое программой.

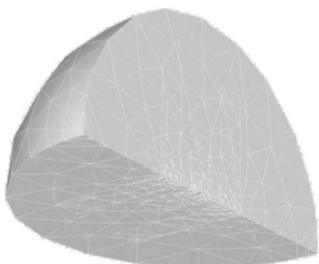


Рис. 1. Пример разбиения пространства исследуемой модели на конечные элементы

Обычно в инженерных расчетах используются более плотные разбиения [6], хотя это сопровождается существенным увеличением времени, необходимым для получения результатов. На данном рисунке показать более плотное разбиение затруднительно.

В целом, плотность разбиения не является принципиальным ограничением, поскольку всегда существует возможность ее увеличить, увеличив время расчета или используя компьютер с более высоким быстродействием. В данной серии расчетов чаще использовалось более плотное разбиение, например для определения векторного магнитного потенциала \vec{A}^M плотность была в 4 раза выше.

3. Результаты моделирования

Расчет \vec{A}^M проводился для каждой из его компонент – A_x^M , A_y^M и A_z^M . Несмотря на то, что программный

комплекс допускает непосредственное вычисление требуемого параметра, это позволило провести качественный анализ полученных результатов на их соответствие физическим представлениям. На рис.2 даны результаты конечного расчета пространственного распределения модуля этого параметра.



Рис. 2. Расчет векторного магнитного потенциала $|\vec{A}^M|$, К/м

Далее вычислялось пространственное распределение напряженности магнитного поля \vec{H} . Результаты расчета представлены на рис.3.

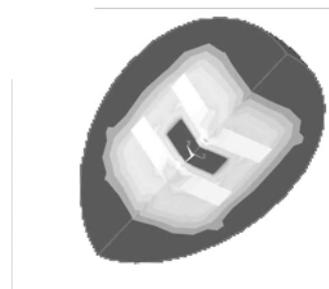


Рис. 3. Расчет напряженности магнитного поля $|\vec{H}|$, А/м

Поскольку при расчете распределения \vec{H} не ставилась цель определить эффекты воздействия внешнего тока, то в этом расчете можно было использовать достаточно грубое разбиение пространства.

Также как и при расчете магнитного потенциала, расчет \vec{H} был разделен на два этапа. На первом вычислялось пространственное распределение каждой из компонент вектора \vec{H} . После предварительного анализа полученных распределений был сделан окончательный расчет пространственного распределения $|\vec{H}|$.

Можно заметить (рис.3), что вокруг полупроводниковой пластины наблюдается некоторое увеличение поля H . Оно обусловлено ростом осевой компоненты поля (H_x). Объясняется это явление дальнейшими расчетами пространственного распределения магнитной индукции \vec{B} (рис.4).

По аналогии с методикой получения предыдущих результатов, расчет магнитной индукции также проведен в два этапа.

Как видно из рис.4, пространственное распределение модуля вектора магнитной индукции, в основном, определяется геометрической формой магнитов. Относительная магнитная проницаемость кремния равна

единице, поэтому распределение $|\vec{B}|$ в пространстве между магнитами практически однородно.



Рис. 4. Расчет магнитной индукции $|\vec{B}|$, Тл

Дальнейшие расчеты проведены при подключении источника тока к торцам полупроводниковой пластины.

На рис.5 представлено распределение электрического потенциала в пластине. Считалось, что удельное сопротивление полупроводника одинаковое по всему объему пластины. Этот расчет не требовал предварительного этапа анализа компонент.

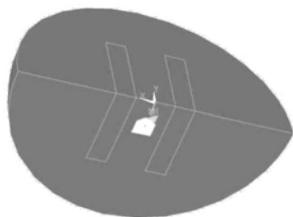


Рис. 5. Расчет потенциала электрического поля при подаче тока U , В

Как видно из представленного распределения, вдоль линий тока величина электрического потенциала практически не изменяется. Основное изменение происходит в поперечном направлении. Такое распределение соответствует физическим представлениям смещения тока в соответствии с действием силы Лоренца.

Расчет пространственного распределения напряженности электрического поля \vec{E} , как и для других векторных величин, проводился в два этапа.

Результаты расчета $|\vec{E}|$ представлены на рис.6.

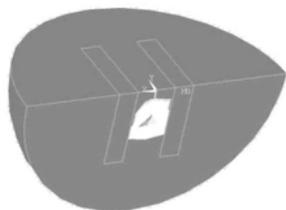


Рис. 6. Расчет напряженности электрического поля E , В/м

Распределение поля здесь также соответствует физическим представлениям.

Выводы

Полученная расчетная модель позволяет вычислять поля в полупроводниковой пластине, что является

первым этапом построения полной численной модели фотопреобразователя солнечной энергии на основе р-п перехода. Результаты расчета соответствуют физическим представлениям, что позволяет сделать вывод о правильном выборе метода и исходных данных.

Проведенное моделирование показывает, что, несмотря на отсутствие блока, описывающего фотогенерацию подвижных носителей в современных версиях программных комплексов, с его помощью можно создать эффективный расчетный инструмент для численного моделирования фотопреобразователей с внешним магнитным полем. Использование численных методов, по сравнению с аналитическими, требует меньших затрат, а полученные результаты позволят существенно сократить объем экспериментальных исследований при оптимизации конструкций ФЭП в целях повышения их КПД.

Литература: 1. *Solar Generation: Solar electricity for over one billion people and two million jobs by 2020: conference thesis* (Sept. 2006) / W. Hoffmann, S. Teske – Brussels, Belgium / Greenpeace International, Amsterdam, Netherlands: European photovoltaic Industry Association. 52p. 2. *Research, Solar Cell Production and Market Implementation of Photovoltaics* October 2004: PV Status Report 2004 / European Commission, DG JRC, Institute for Environment and Sustainability Energies Unit Via Enrico Fermi 1; leader Jdger-Waldau A. TP 450 I – 21020 Ispra, Italia, 2004. 95p. 3. *Зайцев Р.В., Копач В.Р., Кіріченко М.В., Хрипунов Г.С.* Вплив стаціонарного магнітного поля на ефективність роботи фотоелектричних перетворювачів // Науковий вісник КУЕІТУ «Нові технології». 2010. №1. С.20-26. 4. *Бонч-Бруевич В.Л., Калашиников С.Г.* Физика полупроводников М.: Наука, 1977. 678с. 5. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Т.III. Квантовая механика. М.: Наука, 1989. 768с. 6. *Зинкевич О., Морган К.* Конечные элементы и аппроксимация. М.: Мир, 1986. 318 с.

Поступила в редколлегию 23.08.2010

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. Дорошенко В.А.
д-р физ.-мат. наук, проф. Лучанинов А.И.

Чернышов Николай Николаевич, канд. техн. наук, доцент кафедры микроэлектроники электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: математическая физика, задачи теории поля, методы математического анализа, численное моделирование. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057) 702-13-62.

Слипченко Николай Иванович, д-р физ.-мат. наук, проф., проректор по научной работе ХНУРЭ. Научные интересы: полупроводниковые приборы, микроволновая микроскопия, микро- и оптоэлектроника, приборостроение. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057) 7021-013.

Панченко Александр Юрьевич, д-р физ.-мат. наук, доц., профессор кафедры радиоэлектронных устройств ХНУРЭ. Научные интересы: радиофизика, методы математического анализа, дистанционные методы измерений, неразрушающий контроль. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057) 7021-444.

Лю Чан, аспирант кафедры микроэлектроники электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: математическая физика, численное моделирование. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057) 702-13-62.

Щербак Евгений Леонидович, студент 4-го курса факультета электронной техники ХНУРЭ. Научные интересы: численное моделирование, программирование. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057) 702-13-62.