

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ

Н.Н. Чернышов¹, Н.И. Слипченко¹, А.Ю. Панченко¹,
Лю Чан¹, Е.Л. Щербак¹, Е.В. Фурсова²

¹Харьковский национальный университет радиоэлектроники
Украина

²Научный физико-технологический центр МОН и НАН Украины (Харьков)
Украина

Поступила в редакцию 18.03.2011

В работе проведен 3D-расчет компонент электрического поля в кремниевой пластине, помещенной в магнитное поле при пропускании тока. Методика расчета является первым этапом создания численной модели фотоэлектрических преобразователей в магнитном поле, которая необходима при оптимизации конструкций фотоэлектрических преобразователей для повышения КПД.

Ключевые слова: технологии энергосбережения, альтернативные источники энергии, фотоэлектрические преобразователи, компьютерное моделирование.

Проведено 3D-розрахунок компонентів електричного поля у кремнієвій пластині, що поміщена у магнітне поле при пропусканні струму. Методика розрахунку є першим етапом створення числової моделі фотоелектричних перетворювачів в магнітному полі, що необхідна для оптимізації конструкцій фотоелектричних перетворювачів з метою підвищення їх ККД.

Ключові слова: технології енергозбереження, альтернативні джерела енергії, фотоелектричні перетворювачі, комп'ютерне моделювання.

The 3D calculation of field components in a silicon plate with conducting current which is placed in a magnetic field has been made. This calculation method is the first stage of creating the numerical model of photoelectrical converters in a magnetic field, which is necessary for optimizing constructions of photoelectrical converters for efficiency increasing.

Keywords: energy-saving technology, alternative energy sources, photoelectrical converters, computer simulation technique.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальной задачей современной науки является разработка экологически чистых технологий энергообеспечения и создания альтернативных источников энергии. Наиболее перспективными направлениями являются создание новых высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) солнечной энергии [1] и повышение КПД уже созданных. Однако, в ряде случаев, для решения практических задач [2] уже недостаточно только традиционных способов оптимизации конструктивно-технологических решений. Анализ экспериментальных результатов, представленных в современной литературе, например [3], указывает на то, что одним из перспективных путей повы-

шения эффективности ФЭП является использование магнитного поля, что обуславливает целесообразность развития теоретических основ и численных моделей, обеспечивающих развитие данного направления.

Целью настоящей работы является создание расчетной 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].

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

Теория кинетических явлений в полупроводниках основана на результатах эксперимен-

тальных 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.

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 σ , связывающая $\vec{j} = \sigma\vec{E}$, определяется как $\sigma = en\mu$.

Явления переноса заряда в полупроводниках определяются совокупностью коэффициентов $\sigma_{\alpha\beta}$, 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, которое в направлении перпендикулярном дрейфовому току пропорционально 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]. Поэтому 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 настоящее время 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).

ОСОБЕННОСТИ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ

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

При формировании исходных условий учитывалась проводимость полупроводника, суммарное магнитное поле в нем, с учетом размеров ПМ 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.

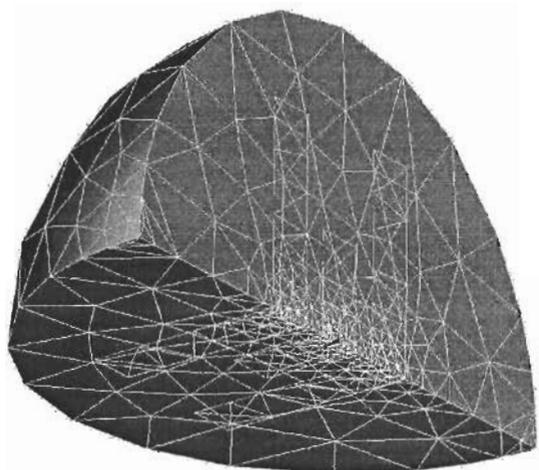


Рис. 1. Пример разбиения пространства исследуемой модели на конечные элементы.

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.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Расчет магнитного потенциала \vec{A}^M проводился для каждой из его компонент – A_x^M , A_y^M и c . 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 показаны результаты расчета пространственного распределения модуля этого параметра.

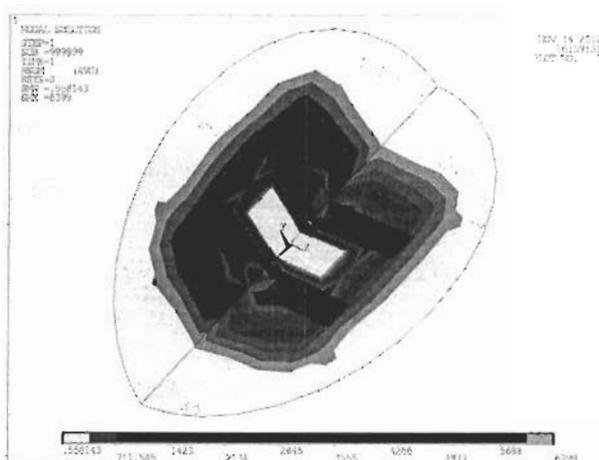


Рис. 2. Расчет векторного магнитного потенциала $|\vec{A}^M|$, Кл/м.

Далее вычислялось пространственное распределение напряженности магнитного поля \vec{H} . Результаты расчета, представлены на рис. 3. Поскольку при расчете \vec{H} не ставилось целью определить эффекты воздействия внешнего тока, то в этом расчете можно использовать достаточно грубое разбиение.

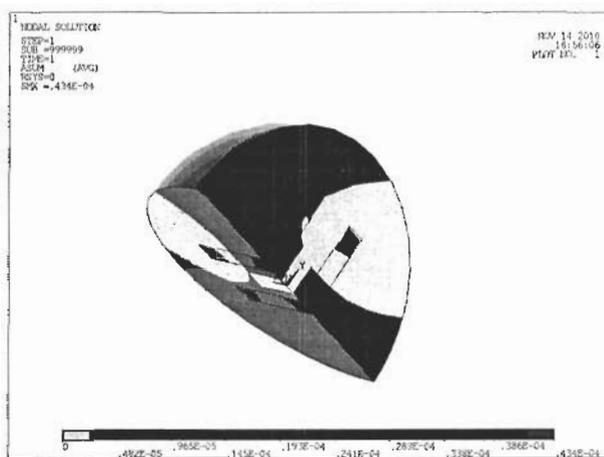


Рис. 3. Расчет напряженности магнитного поля $|\vec{H}|$, А/м.

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 полу-

ченных распределений, был сделан окончательный расчет распределения $|\vec{H}|$. Можно заметить, что вокруг полупроводниковой пластины наблюдается увеличение поля H . Оно обусловлено ростом осевой компоненты поля H_x . Объясняется это явление дальнейшими расчетами пространственного распределения магнитной индукции \vec{B} (рис. 4).

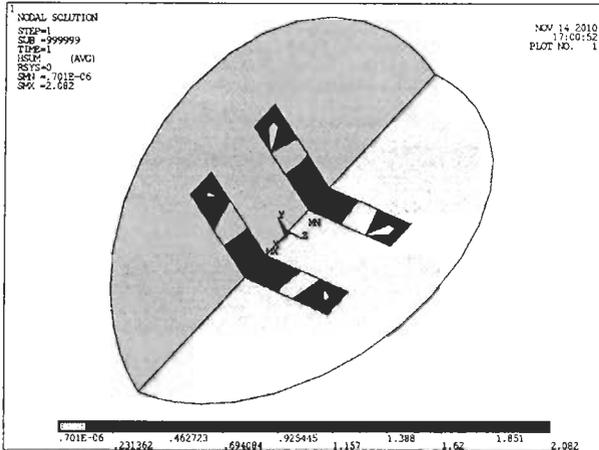


Рис. 4. Расчет магнитной индукции $|\vec{B}|$, Тл.

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 $|\vec{B}|$ между магнитами практически однородно.

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.

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

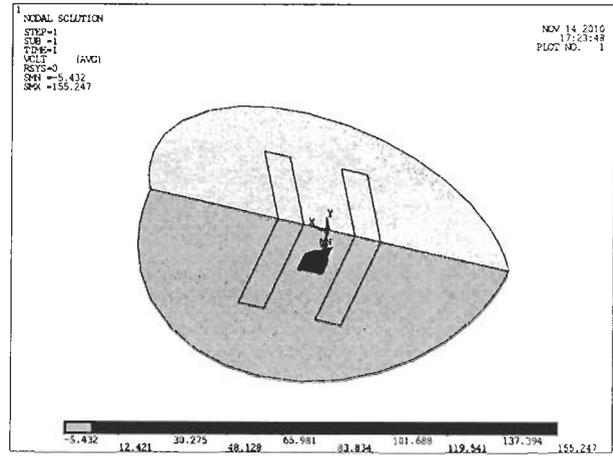


Рис. 5. Расчет потенциала электрического поля при подаче тока U , В.

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.

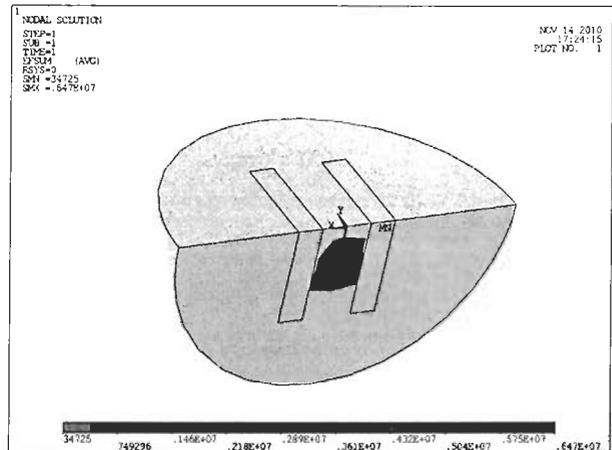


Рис. 6. Расчет напряженности электрического поля E , В/м.

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 ФЭП солнечной энергии на основе $p-n$ -перехода. Результаты расчета соответствуют физическим представлениям, что позволяет сделать вывод о правильном выборе метода и исходных данных.

Проведенное моделирование показывает возможность создания эффективного расчет-

ного инструмента для численного моделирования ФЭП с внешним магнитным полем. Использование численных методов, по сравнению с аналитическими, требует меньших затрат, а полученные результаты позволят сократить объем экспериментальных исследований при оптимизации конструкций с целью повышения их КПД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hoffmann W., Teske S. Solar Generation: Solar electricity for over one billion people and two million jobs by 2020//Conf. thesis Brussels, Belgium Greenpeace International, Amsterdam, Netherlands: European photovoltaic Industry Association – 2006. – 52 p.
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. – 95 p.
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., Калашников С.Г. Физика полупроводников. – М.: Наука, 1977. – 678 с.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Квантовая механика. Т. III. – М.: Наука, 1989. – 768 с.

LITERATURA

1. Hoffmann W., Teske S. Solar Generation: Solar electricity for over one billion people and two million jobs by 2020//Conf. thesis Brussels, Belgium Greenpeace International, Amsterdam, Netherlands: European photovoltaic Industry Association – 2006. – 52 p.
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. – 95 p.
3. Zaytsev R.V., Kopach V.R., Kirichenko M.V., Khripunov G.S. Vpliv stacionarnogo magnitnogo polya na yefektivnist roboti fotoyelektrichnikh peretvoryuvachiv//Naukoviy visnik KUYeITU “Novi tekhnologii”. – 2010. – № 1. – С. 20-26.
4. Bonch-Bruyevich V.L., Kalashnikov S.G. Fizika poluprovodnikov. – М.: Nauka, 1977. – 678 s.
5. Landau L.D., Lifshits Ye.M. Teoreticheskaya fizika. Kvantovaya mekhanika. T. III. – М.: Nauka, 1989. – 768 s.