

**ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ
НА ОСНОВЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ ПРИ
ПОМОЩИ ФОТО-ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
И МАГНИТОКОНЦЕНТРАЦИОННОГО ЭФФЕКТА**

Н. Н. Чернышов, Н. И. Слипченко, С. Н. Селевко, Р. Я. Умяров, Д. Н. Садым
*Харьковский национальный университет радиоэлектроники,
Украина*

Поступила в редакцию 05.03.2014

В статье показаны тенденции развития ФЭП, которые основаны на повышении уровня КПД за счет оптимизации конструктивных и физических параметров. Для этих целей применяются различные конструкции ФЭП. Существуют ФЭП на основе монокристаллического либо аморфного Si, органические, фотохимические, многослойные и другие. Многослойные ФЭП имеют высокий уровень КПД, но техпроцесс для их производства очень громоздок. В этой статье рассмотрены ФЭП на основе монокристаллического Si, так как они достигли большого распространения, показано их описание структуры и принцип действия. Практическое значение работы заключается в том, что в работе сделано описание фотоэлектромагнитного и магнитоконцентрационных эффектов, сделано описание компьютерной модели ФЭП и рассмотрены методы повышения КПД.

Ключевые слова: носители заряда, электрическая мощность, электрическое поле, физико-технические параметры, фотоэлектромагнитный эффект, магнитоконцентрационный эффект, термомагнитный эффект, монокристаллический Si, солнечные элементы.

**ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ
ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА
НА ОСНОВІ МОНОКРИСТАЛІЧНОГО КРЕМНІЮ ЗА
ДОПОМОГОЮ ФОТО-ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО
ТА МАГНІТОКОНЦЕНТРАЦІЙНОГО ЕФЕКТУ**

М. М. Чернышов, М. І. Слипченко, С. М. Селевко, Р. Я. Умяров, Д. М. Садим

У статті показані тенденції розвитку ФЕП, які засновані на підвищенні рівня ККД за рахунок оптимізації конструктивних та фізичних параметрів. Для цих цілей застосовують різні конструкції ФЕП. Існують ФЕП на основі монокристалічного або аморфного Si, органічні, фотохімічні, багатошарові та інші. Багатошарові ФЕП мають високий рівень ККД, але технологічний процес для їхнього виробництва дуже громіздкий. У цій статті розглянуті ФЕП на основі монокристалічного Si, тому що вони досягли великого поширення, показано опис їх структури та принцип дії. Практичне значення роботи полягає в тому, що в роботі зроблено опис фотоелектромагнітного та магнітоконцентраційних ефектів, зроблено опис комп'ютерної моделі ФЕП та розглянуто методи підвищення ККД.

Ключові слова: носії заряду, електрична потужність, електричне поле, фізико-технічні параметри, фотоелектромагнітний ефект, магнітоконцентраційний ефект, термомагнітний ефект, монокристалічний Si, сонячні елементи.

**PHOTOELECTRIC CONVERTER MODEL
STUDING BASED ON MONOCRYSTAL SI
USING PHOTO-ELECTROMAGNETIC
AND MAGNETO-CONCENTRATION EFFECT**

N. N. Chernyshov, N. I. Slipchenko, S. N. Selevko, R. J. Umyarov, D. N. Sadym

The paper shows tendencies of developing photoelectric converters (PEC) which are based on the efficiency increase due to optimization of both design and physical parameters. Different PEC designs are used for these purposes. There are PECs on the base of both monocrystal and amorphous Si,

organic, photochemical and other PECs. Multilayer PECs have a high efficiency, but the technological process of their manufacture is very complex. The paper considers PECs on the base of monocrystal Si, as they are widely used, and shows description of the structure and principle of action of a PEC on the base of monocrystal Si. The practical importance of the paper consists in that fact that it describes photoelectric magnetic and magneto-concentration effects and PEC computer model as well as it considers methods of efficiency improvement.

Keywords: charge carriers, electric power, electric field, physical and technical parameters, photo-electro-magnetic effect, magneto-concentration effect, thermomagnetic effect, monocrystal Si, solar elements.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время использование солнечной энергии является актуальной задачей. Для этих целей применяют различные конструкции ФЭП.

Существуют ФЭП на основе монокристаллического либо аморфного Si, органические, фотохимические, многослойные и другие [1]. Фотохимические преобразователи построены на основе органических красителей. Их КПД достигает 10,5 %. Многослойные преобразователи имеют высокий, по сравнению с другими типами, уровень КПД достигающий 32 %, но техпроцесс их производства очень громоздок. Большого распространения достигли ФЭП на основе монокристаллического Si с КПД 24,7 %. Эти преобразователи просты в производстве.

Практическое значение работы заключается в том, что рассмотрены тенденции развития ФЭП основанные на повышении уровня КПД за счет оптимизации конструктивных и физических параметров. В настоящее время для этих целей применяется как непосредственный эксперимент, так и компьютерное моделирование. Последнее позволяет сократить время разработки, оптимизировать массогабаритные и физико-технические параметры, избегая использования трудоемких экспериментов. Целью работы является исследование физических процессов в ФЭП на основе монокристаллического Si и выбор их структуры для повышения КПД.

ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ

Под фотоэлектричеством понимают процесс прямого преобразования солнечного излучения в электроэнергию с помощью солнечных элементов. В настоящее время использование возобновляемых источников

электроэнергии, альтернативных ископаемым опливам, постоянно увеличивается. ФЭП появились в 50-х годах прошлого столетия. Стимулом для масштабных научно-исследовательских работ, в этой области, стала необходимость обеспечения энергией спутников Земли и других космических аппаратов, назревшая в 60-х годах.

Для ученых солнечные элементы стали интересным способом применения Si. Вторым стимулом стал нефтяной кризис 70-х годов, заставивший весь мир искать новые источники энергии. Тогда научное сообщество обратило внимание на возможность использования фотоэлектричества. ФЭП были значительно усовершенствованы. Стали быстро понятны их преимущества, что подтолкнуло развитие производства. Кроме того солнечные элементы стали активно использовать в небольших устройствах малой мощности, таких как калькуляторы и часы.

В 80-х годах научные исследования стали давать результаты и эффективность солнечных элементов начала возрастать. В 1985 году КПД солнечных элементов достиг рубежа в 20 %. На протяжении следующих десяти лет рост фотоэлектрической промышленности оставался на уровне 15—20 % в год и был в основном обусловлен спросом на рынке удаленных потребителей энергии. В 2008 году рост составил 62 % и сегодня ФЭП используются не только там, где нет доступа к сети, но также как один из способов уменьшения вреда, наносимого окружающей среде традиционным производством электроэнергии.

В последнее время многие страны Европы планируют перейти на энергию Солнца в замен традиционным источникам. Германия планирует к 2040 году отказаться от ядерной энергетики. Рынок ФЭП постоянно растет.

Масштабы применения разнообразны: от электростанций установленной мощностью несколько мегаватт до солнечных калькуляторов.

Наиболее эффективными являются ФЭП из монокристаллического Si. Выбор исходного материала для их производства обусловлен рядом важных факторов:

- Si является наиболее распространенным после O_2 элементом;
- для солнечного спектра наибольшая выходная электрическая мощность получается у ФЭП, изготовленных из Si (ширина запрещенной зоны у них 1—1,5 эВ (рис. 1));
- эти ФЭП подходят для солнечного излучения по спектральной чувствительности;
- по сравнению с Ge, эти ФЭП менее чувствительны к температурным колебаниям.

Также Si обладает минимальными потерями на отражение, так как его окисные пленки, образующиеся на поверхности достаточно простым способом, абсолютно прозрачны. Они имеют промежуточный коэффициент преломления, что уменьшает отражение света непосредственно от Si [2].

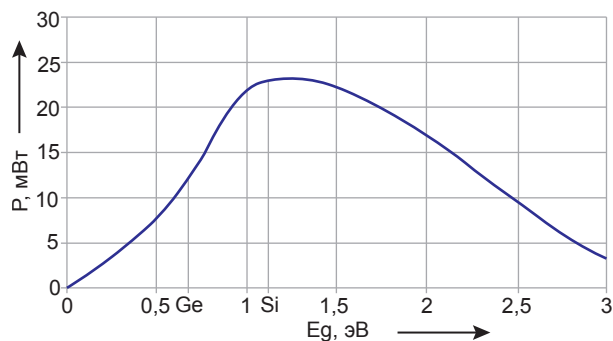


Рис. 1. Зависимость выходной мощности P с 1 см^2 от ширины запрещенной зоны

ПРИНЦИП РАБОТЫ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ФЭП

ФЭП — это электронное устройство, напрямую преобразующее солнечное излучение в электричество. Свет, падающий на солнечный элемент, приводит к появлению в нем тока и напряжения. Таким образом, создается полезная электрическая мощность. Для того, чтобы преобразователь работал:

- нужен материал, в котором поглощенный свет возбуждает электроны в состоянии с более высокой энергией;

- нужно переместить ставшие свободными электроны из ФЭП во внешнюю цепь. Электроны, покинувшие ФЭП, отдают полученную энергию во внешней цепи и возвращаются обратно.

Наиболее распространенной является модель ФЭП с одним p - n -переходом [3]. Для создания такой структуры выращивают монокристаллический Si с p -типом проводимости по методу Чохральского. При получении этого типа проводимости в расплав добавляют примесь p -типа элементов III группы, например, атомы B которые имеют три электрона на внешней электронной оболочке, что на один электрон меньше чем у Si, который он замещает. А n -область получают диффузионным методом, помещая кристалл при повышенной температуре в среду содержащую элемент V группы, например, атомы P . Изготовление ФЭП заканчивается созданием контактов на полупроводниковом кристалле. Основными этапами работы ФЭП являются:

- генерация носителей заряда под действием солнечного излучения;
- интегрирование сгенерированных носителей заряда и получение тока;
- образование высокого напряжения;
- рассеяние энергии через нагрузку и паразитные сопротивления.

ФЭП освещенный солнечным светом поглощает фотоны с различной энергией на различной глубине (рис. 2). На рисунке показано как происходит получение электронно-дырочной пары для фотонов с различной длиной волны и энергией.

Выбитые электроны и дырки могут свободно передвигаться по материалу полупроводника под действием электрических полей, образовавшихся в материале под влиянием p - n -перехода. Электроны притягиваются n -областью (эммитерной областью), а дырки p -областью (базовой областью). Следовательно, ФЭП перекачивает электроны в n -область через внешнюю нагрузку и обратно к контакту с p -областью. На поверхности раздела контакт- p -область полупроводника электроны занимают место дырок, то есть — рекомбинируют. При этом они становятся электрически нейтральными до тех пор, пока

новый фотон не разделит их на электронно-дырочную пару. Рассмотрим подробнее образование фототока и напряжения на монокристаллическом ФЭП. Электроны (не основные носители в p -области) перебрасываются контактным полем в n -область, заряжая ее отрицательно. Большая часть дырок не способна преодолеть потенциальный барьер и остается в p -области, заряжая ее положительно [3—5].

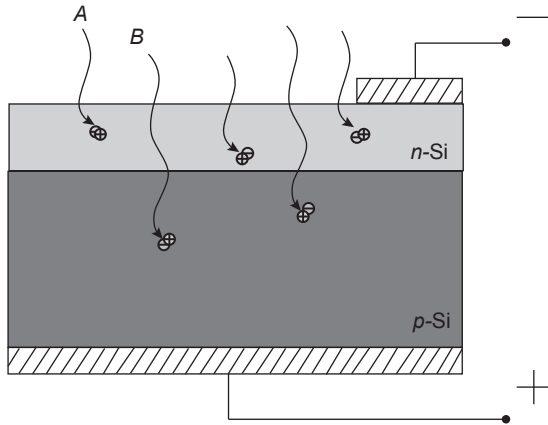


Рис. 2. Структура ФЭП и поглощение фотонов

Электрическое поле контакта пространственно разделяет отрицательные электроны и положительные дырки, образующиеся под действием света. Вследствие этого на переходе формируется прямое смещение U , понижающее потенциальный барьер на величину qU , где q — заряд электрона по модулю.

Перемещение электронов через p - n -переход создает ток I_ϕ , называемый первичным фототоком, которому, как и току неосновных носителей, назначают отрицательный знак. Понижение барьера ведет к возрастанию тока основных носителей. Таким образом, через переход протекают следующие токи: неосновных носителей I_s , основных носителей и первичный фототок I_ϕ .

Полный ток через p - n — переход равен:

$$I = I_s \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) - I_\phi. \quad (1)$$

Это уравнение описывает ВАХ. Определим прямое смещение. При этом напряжение холостого хода U_{xx} равно:

$$U_{xx} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_\phi}{I_s} + 1 \right). \quad (2)$$

Таким образом, при освещении p - n -перехода контактная разность потенциалов в нем уменьшилась на величину U , а другие контактные разности потенциалов не изменились. В результате на клеммах ФЭП появилось напряжение U , называемое фото — ЭДС. Следовательно, p - n -переход стал источником тока, в котором энергия света преобразуется непосредственно в электрическую.

Так как фото — ЭДС равна понижению контактного напряжения, она не может превысить само контактное напряжение U_k (для Si оно примерно равно 1 В). Как во всяком другом источнике тока в ФЭП должны быть сторонние силы, природа которых отличается от сил электростатического поля. Под действием электростатических сил заряды перемещаются в направлении уменьшения потенциальной энергии. Для непрерывного протекания тока по замкнутой цепи необходимо, чтобы на одном участке цепи заряды перемещались в направлении от меньшей к большей потенциальной энергии, то есть поднимались на потенциальный барьер. Это участок действия сторонних сил. Их физическая природа может быть различной. В гальванических элементах сторонние силы возникают в результате химических реакций на электродах, а энергия, освобождаемая в реакциях, превращается в работу тока. В явлении электромагнитной индукции сторонние силы — это силы электрического поля, однако не электростатического, а вихревого.

В ФЭП потенциальная энергия электронов повышается за счет энергии фотонов, когда электроны переходят на более высокий энергетический уровень в кристалле из валентной зоны в зону проводимости. Первичный фототок пропорционален потоку излучения (мощности излучения) Φ , падающему на ФЭП ($I_\phi = \alpha\Phi$, где α — коэффициент пропорциональности). Ток I в нагрузке зависит от I_ϕ и сопротивления нагрузки R . При коротком замыкании ФЭП ($R = 0$) напряжение на сопротивлении $U = IR = 0$, а ток равен I_ϕ . Это означает, что все генерированные светом носители поступают во внешнюю цепь, а высота барьера в p - n -переходе не изменяется. Если внешняя цепь разомкнута, то $I = 0$.

Из уравнения (2) видно, что напряжение логарифмически растет с ростом первичного фототока или потока излучения. Часто ФЭП включают в батареи: последовательно — для увеличения напряжения, параллельно — для увеличения тока. ВАХ идеального ФЭП, показана на рис. 3. Каждой точке кривой соответствует определенное сопротивление нагрузки: с увеличением R напряжение растет, а ток падает. В нагрузке выделяется электрическая мощность $P = IU$.

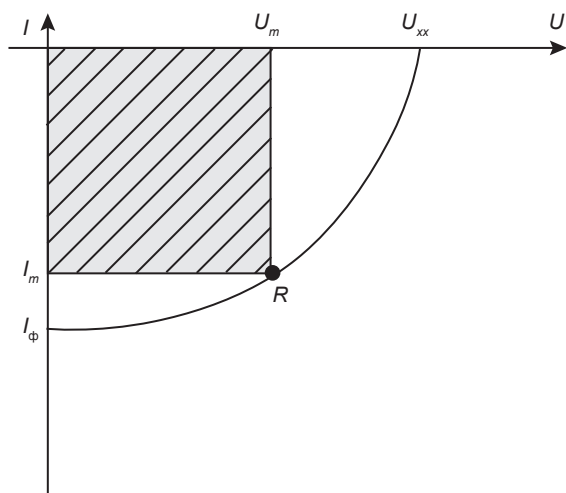


Рис. 3. ВАХ идеального ФЭП

Она зависит от R и при некотором его значении R достигает максимального значения $P_m = I_m U_m$, где I_m и U_m — ток и напряжение при максимальной мощности. С ростом Φ увеличиваются напряжение, ток и мощность, а оптимальное сопротивление R уменьшается.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЭФФЕКТА

Одним из способов повышения КПД является приложение магнитного поля к ФЭП. Это представляет собой фотоэлектромагнитный (ФЭМ) эффект Кикоина—Носкова.

Основной задачей моделирования является расчет распределения концентрации носителей в монокристаллическом Si-ФЭП при приложенном магнитном поле.

Это позволяет более качественно расположить контактные выводы, что уменьшит потери и позволит обосновать эффективность применения ФЭМ эффекта при производстве и эксплуатации ФЭП [6]. ФЭМ эффект был

впервые обнаружен в 1934 году на кристаллах закиси меди. Он наблюдается при появлении ЭДС в полупроводниковой пластине, помещенной в магнитное поле и освещаемой светом. ЭДС ФЭМ эффекта возникает в направлении перпендикулярном к направлению пучка света и магнитного поля (рис. 4).

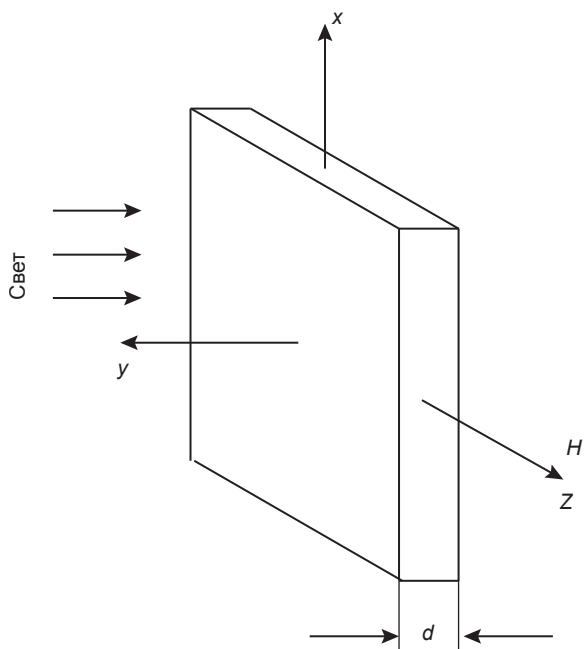


Рис. 4. Схема возникновения нечетного ФЭМ эффекта

В слабых магнитных полях ЭДС ФЭМ эффекта пропорциональна магнитному полю и меняет знак с изменением направления магнитного поля (четная ФЭМ ЭДС нас не интересует, так как она не дает большего повышения КПД).

Объяснение этого эффекта состоит в следующем. При освещении образца светом, в тонком приповерхностном слое освещенного образца возникает область с повышенной концентрацией электронно-дырочных пар, которые проникают вглубь образца. Диффундирующие носители отклоняются в магнитном поле в противоположные стороны, образуя фотомагнитный ток. Плотность этого тока убывает по толщине образца за счет рекомбинации избыточных носителей заряда. Если контакты образца замкнуты, то во внешней цепи течет ток короткого замыкания ФЭМ эффекта.

При разомкнутой цепи возникает электрическое поле, направленное вдоль образца. Ток проводимости, вызванный этим полем, в

среднем компенсирует магнитодиффузионный ток. В стационарном состоянии этому соответствует некоторое значение ЭДС [7].

Фотомагнитный эффект на *p-n*-переходе был открыт в 1961 году. Эффект наблюдался на образце Ge, одна часть которого имела проводимость *p*-типа, а другая *n*-типа. При освещении плоскости *p-n*-перехода, помещенной в магнитное поле, в ней протекает фотомагнитный ток. Возникновение нечетного ФЭМ эффекта в *p-n*-переходе объясняется следующим образом. Неосновные носители, рожденные светом, диффундируют вглубь образца к *p-n*-переходу. Фотоносители, достигшие перехода, создают фото-ЭДС.

Магнитное поле, указанное на рис. 5, отклоняет потоки электронов и дырок к *p-n*-переходу. В *p*- и *n*-области составляющие потока неосновных носителей по направлению к *p-n*-переходу увеличиваются по сравнению с их потоком без магнитного поля. Это приводит к увеличению фототока и фото-ЭДС на *p-n*-переходе в магнитном поле. При противоположном направлении магнитного поля фотоносители отклоняются в другую сторону, и фотоэффект уменьшается. Эффект пропорционален магнитному полю и меняет знак при изменении его направления на противоположное.

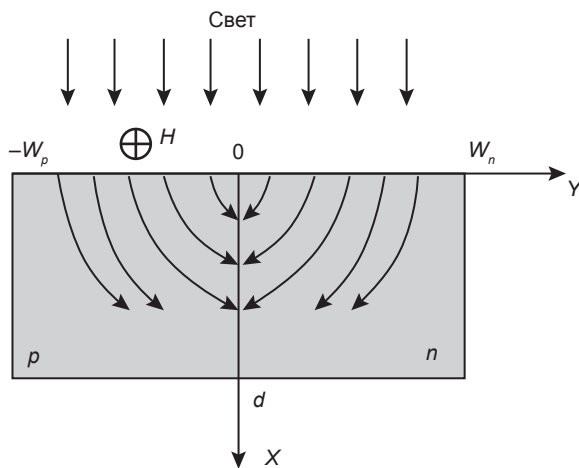


Рис. 5. Условия наблюдения ФЭМ эффекта

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАГНИТОКОНЦЕНТРАЦИОННОГО ЭФФЕКТА

Диффузия в магнитном поле приводит к появлению объемных зарядов и ЭДС за счет

перераспределения в пространстве заряженных частиц-носителей тока. Однако, кроме наблюдения этих ЭДС, возможно наблюдение и исследование изменений распределения концентраций диффундирующих неравновесных носителей в магнитном поле (магнитоконцентрационных эффектов (МК)). К таким эффектам относится изменение распределения концентрации дрейфующих в электрическом поле неосновных носителей заряда при включении поперечного магнитного поля (эффект Суля).

Другим эффектом является эффект «фокусировки» диффундирующих носителей продольным магнитным полем. Если в некоторой точке на поверхности полубесконечного образца генерируются точечным световым зондом неравновесные носители тока, то при отсутствии магнитного поля они будут диффундировать вглубь образца, создавая сферически симметричное распределение. Совместим начало координат с точкой инъекции, направив ось *z* перпендикулярно к поверхности образца. Тогда при включении магнитного поля на составляющие диффузионных токов будет действовать сила Лоренца, отклоняющая их на угол

$$\theta = \frac{\mu H}{c} . \tag{3}$$

Если смотреть сверху, макро-траектории неравновесных носителей искривятся. Тогда в перпендикулярном к магнитному полю направлении, носители тока за время жизни протиффундируют меньшее расстояние от точки инъекции, чем при $H = 0$ (рис. 6).

Это равносильно уменьшению длины диффузионного смещения в плоскостях, параллельных *xу* (при неизменном времени жизни), и должно привести к повышению концентрации носителей на оси *z*.

Изменение распределения концентрации носителей заряда в магнитном поле определенным образом связано с подвижностью носителей тока. МК эффект связан с изменением направления дрейфа неравновесных неосновных носителей в поперечном магнитном поле [8]. Для того чтобы продемонстрировать специфические черты этого эффекта, рассмотрим вопрос о влиянии

поперечного магнитного поля на дрейф основных равновесных носителей. То есть обратимся к эффекту Холла в монополярном полупроводнике. При включении магнитного поля, дрейфующие в электрическом поле основные носители заряда, отклоняются в направлении y . Это приводит к тому, что у поверхностей возникает заряд, а вместе с ним и поле Холла. Отклонение от первоначального направления будет продолжаться до тех пор, пока поле Холла не возрастет настолько, чтобы скомпенсировать отклоняющее действие магнитного поля. В первом приближении движение основных носителей при наличии поперечного магнитного поля происходит в том же направлении, как и без него. При этом суммарное поле направлено под углом θ_n к направлению движения носителей заряда.

вдоль образца, прижимаются к одной стороне и двигаются вблизи этой стороны.

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ КПД

Коэффициентом полезного действия ФЭП называют отношение максимальной электрической мощности к потоку излучения

$$\eta = \frac{P_m}{\Phi} \quad (4)$$

При проектировании Si-ФЭП основное внимание уделяется отражению от поверхности, разделению носителей, рекомбинации и паразитным сопротивлениям. Для того чтобы электрон смог «вырваться» из валентной зоны и принял участие в образовании тока, необходимо приложить к нему тот минимум энергии который позволит ему перейти из валентной зоны в зону проводимости. Этот минимум энергии электрону передает фотон. Связь между фотонами и электронами описывается формулой Эйнштейна [8]

$$h\nu = A_{\text{вых}} + E_k, \quad (5)$$

где E_k — кинетическая энергия вылетающего электрона; $A_{\text{вых}}$ — работа выхода (минимум энергии который необходим электрону для выхода из материала).

Минимальная энергия, которую необходимо приложить для перехода в зону проводимости определяется частотой фотона, минимум этой частоты называется красной границей фотоэффекта.

Энергия фотона расходуется на ионизацию атома и работу, необходимую для «вырывания» электрона, а остаток переходит в кинетическую энергию электрона. К тому же каждый полупроводниковый материал обладает спектральной зависимостью поглощения фотонов. (Si-ФЭП более чувствителен к синей части спектра). $h\nu \geq E_g$ где E_g — ширина запрещенной зоны. Для повышения КПД и уменьшения потерь при отражении от поверхности ФЭП на эмиттерную область наносят специальную поглощающую пленку либо текстурируют поверхность.

Антиотражающие покрытия на ФЭП представляют собой тонкий слой диэлектрического материала специально подобранной

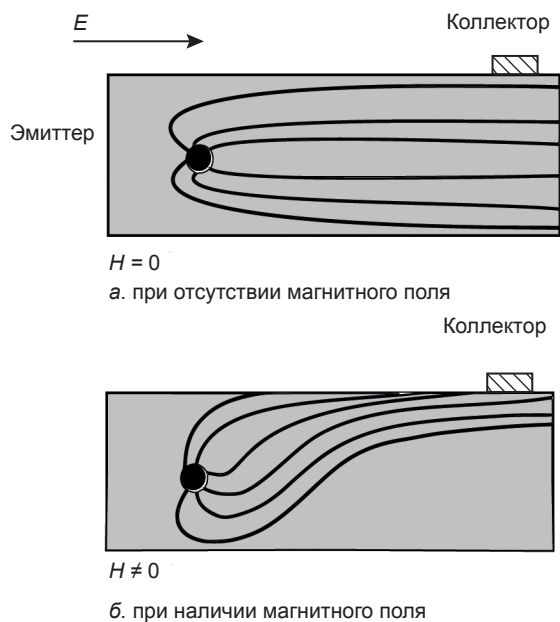


Рис. 6. Траектории движения неосновных носителей заряда

Теперь выясним, что произойдет с неосновными носителями (дырками), которые вводятся в образец. Условия для неосновных носителей отличны от условий для основных. Неосновные носители вводятся уже при наличии холловского поля в образце. Двигаясь слева направо, они отклоняются магнитным полем вверх. При этом холловское электрическое поле (которое препятствовало такому отклонению основных носителей) отклоняет их в том же направлении. В результате неосновные носители, дрейфуя

толщины. Толщина подбирается так, чтобы волна, отразившаяся от поверхности покрытия, была в противофазе с волной, отразившейся от поверхности полупроводника. В результате интерференции этих двух волн интенсивность отраженной волны становится равной нулю. Текстурирование поверхности в комбинации с антиотражающим покрытием или без, используется для уменьшения отражения. Любая неровность поверхности будет увеличивать вероятность отраженного света попасть на материал, а не отразиться в окружающий воздух. Также на КПД влияют контакты (пальцевые контакты размером 20—200 мкм, расположенные на расстоянии 1—5 мм друг от друга). Они созданы для того чтобы увеличить проводимость. Металлические контакты затеняют ФЭП, поэтому существует компромисс между сбором носителей и сопротивлением лицевой металлической сетки.

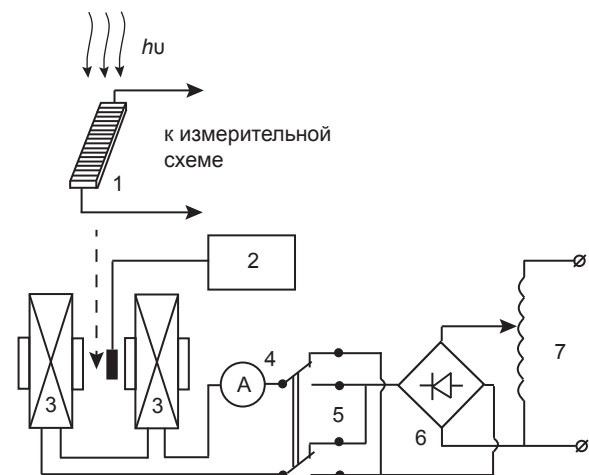
Для уменьшения затенения ФЭП контактами используют технологию производства с утопленными контактами. Она основывается на создании металлического контакта внутри проточенной лазером канавки. С помощью этой технологии производятся коммерческие солнечные элементы с высокой эффективностью. Она позволяет преодолеть многие недостатки, связанные с трафаретной печатью контактов, что увеличивает КПД таких солнечных элементов на 25 %.

Главной особенностью, определяющей эффективность таких ФЭП, является погружение металлического контакта в канавку. Это позволяет значительно увеличить отношение высоты контакта к его ширине, а значит и объем металла, создающего пальцевой контакт. Еще одним перспективным методом повышения КПД монокристаллических ФЭП является реализация в базовом кристалле под действием стационарного магнитного поля ФЭМ эффекта Кикоина—Носкова, МК эффекта, термомагнитного эффекта Нернста—Эттингсгаузена и эффекта перестроения точечных дефектов. Это связано с тем, что ФЭМ и термомагнитный эффекты могут давать дополнительное увеличение фототока, МК эффект изменяет траекторию движения носителей заряда прижимая их к

одной из сторон образца. Это позволяет более эффективно осуществлять преобразование энергии [7—9].

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ФЭП

Исследование параметров ФЭП производится на установке схема, которой представлена на рис. 7. Образец 1 освещаемый световым потоком помещается между электромагнитов 3. Электромагниты обеспечивают индуктивность $B = 0,2$ Тл. Их применение позволяет исследовать как четный, так и нечетный ФЭМ эффекты. Для этого используется переключатель 5, который меняет полярность.



- 1 — исследуемый образец Si-ФЭП;
- 2 — измеритель индукции;
- 3 — электромагнит;
- 4 — амперметр для измерения тока катушки;
- 5 — переключатель направления тока;
- 6 — источник постоянного тока;
- 7 — автотрансформатор

Рис. 7. Схема магнитного блока установки для исследования параметров ФЭП непосредственно в магнитном поле

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практическое значение работы заключается в том, что в работе сделано описание фотоэлектроманнитного и магнитоконцентрационных эффектов, сделано описание компьютерной модели ФЭП и рассмотрены методы повышения КПД.

Разработана схема магнитного блока установки для исследования параметров ФЭП непосредственно в магнитном поле. На основании проведенных исследований разработана компьютерная модель монокристаллического ФЭП. При разработке расчет

производился как под действием магнитного поля, так и без него, при этом координатных изменений в самой модели производить не было необходимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блох М. Д., Магарилл Л. И. Теория фотогальванического эффекта на свободных носителях в магнитном поле // ФТГ. — 1980. — Т. 22, № 8. — С. 2279—2284.
2. Chern Y. F., Dobrovolska M., et al. Interference of electric-dipole and magnetic-dipole interactions in conduction-electron-spin resonance in InSb // Phys. Rev. B. — 1985. — Vol. 32. — P. 890—902.
3. Ивченко Е. Л., Пикус Ю. Б., Расулов Р. Я. // ФТТ. — 1988. — Т. 30. — С. 99.
4. Основа солнечных ФЭП / URL: <http://kapsta.at.ua/publ/9-1-0-10/>, 2009.
5. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей / пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 360 с.
6. Кремний монокристаллический / URL <http://www.aviacool.ru/index.php/2011-01-02-17-00-19.html> /, 2011.
7. Кикоин И. К. Фотоэлектромагнитный эффект // УФН. — 1978. — Т. 124, Вып. 4. — С. 597—617.
8. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников. — М.: Наука, GIFML, 1990. — 670 с.
9. Чернышов Н. Н., Слипченко Н. И., Панченко А. Ю., Фурсова Е. В., Лю Чан. Анализ влияния магнитного поля на физические процессы в фотоэлектрических преобразователях на основе компьютерной модели // Фізична інженерія поверхні. — Х.: НФТЦ. — 2011. — Т. 9, № 1. — С. 82—86.

LITERATURA

1. Bloh M. D., Magarill L. I. Teoriya fotogal'vanicheskogo effekta na svobodnyh nositelyah v magnitnom pole // FTG. — 1980. — Vol. 22, No. 8. — P. 2279—2284.
2. Chern Y. F., Dobrovolska M., et al. Interference of electric-dipole and magnetic-dipole interactions in conduction-electron-spin resonance in InSb // Phys. Rev. B. — 1985. — Vol. 32. — P. 890—902.
3. Ivchenko E. L., Pikus Yu. B., Rasulov R. Ya // FTT. — 1988. — Vol. 30. — P. 99.
4. Osнова solnechnyh FEP / URL: <http://kapsta.at.ua/publ/9-1-0-10/>, 2009.
5. Raushenbah G. Spravochnik po proektirovaniyu solnechnyh batarej / per. s angl. — M.: Energoatomizdat, 1983. — 360 p.
6. Kremnij monokristalicheskij / URL <http://www.aviacool.ru/index.php/2011-01-02-17-00-19.html> /, 2011.
7. Kikoin I. K. Fotoelektromagnitnyj effekt. / UFN. — 1978. — Vol. 124, Vyp. 4. — P. 597—617.
8. Bonch-Bruevich V. L., Kalashnikov S. G. Fizika poluprovodnikov. — M.: Nauka, GIFML, 1990. — 670 p.
9. Chernyshov N. N., Slipchenko N. I., Panchenko A. Yu., Fursova E. V. Lyu Chan. Analiz vliyaniya magnitnogo polya na fizicheskie processy v fotoelektricheskikh preobrazovatelyah na osnove komp'yuternoj modeli // Fizichna inzheneriya poverhni. — H.: NFTC. — 2011. — Vol. 9, No. 1. — P. 82—86.