

УДК 621.383

В.А. Гусев, профессор, д-р техн. наук*Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua***ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ОСНОВЕ ЗАРЯДОВЫХ НАСОСОВ**

Проведен анализ направлений по повышению эффективности традиционных кремниевых солнечных элементов. Представлена новая физическая модель фотопреобразователей на основе зарядовых насосов.

Ключевые слова: *солнечные элементы, фотопреобразователь, зарядовый насос, фотоэффект*

Традиционный подход к преобразованию солнечной энергии в электрическую основан на внутреннем фотоэффекте, заключающемся в генерации электронно-дырочных пар в полупроводнике фотонами излучения с энергией кванта, превышающей ширину запрещенной зоны ΔE_g . В качестве элемента, пространственно разделяющего отрицательно заряженные электроны и положительно заряженные дырки и создающего источник фотоэдс, используется p - n переход. Контактное поле неподвижных ионов акцепторов и доноров, определяемое уровнем легирования p - и n - областей с потенциалом в диапазоне $(0,5...0,8)\Delta E_g/q$, осуществляет коллектирование фотогенерированных носителей с глубин p - и n - областей порядка диффузионных длин неравновесных (неосновных) носителей заряда L_n и L_p . Процесс разделения неравновесных носителей сопровождается их рекомбинацией. Поэтому полезная доля поглощенного излучения, преобразованного в электрическую энергию, или эффективность фотопреобразователя для наиболее распространенных монокристаллических кремниевых солнечных элементов (более 90 %) не превышает (18...20) %.

Целью настоящей работы является анализ направлений по повышению эффективности традиционных кремниевых солнечных элементов и представление новой физической модели фотопреобразователей на основе зарядовых насосов.

Одной из основных проблем развития солнечной энергетики является снижение стоимости кремниевых структур с p - n переходом большой площади 150...200 см². Из экономических соображений в последние годы осуществляется перевод фотоэнергетики на более дешевые кремниевые подложки из поликремния, мультикремния, листового кремния, тонкопленочного кремния, в которых темп рекомбинации неравновесных носителей заряда на порядки выше, чем у монокристаллического кремния. Это обстоятельство послужило основной причиной проведения масштабных научных исследований, конструкторских и технологических работ по снижению рекомбинационных потерь в объеме и на поверхности кремниевых фотопреобразователей с сопутствующим упрощением технологии изготовления, направленных на снижение цены, солнечных элементов.

Первым существенным результатом этих исследований явилась структура солнечного элемента с изотипным p - p^+ переходом на тыльной стороне (рисунок 1).

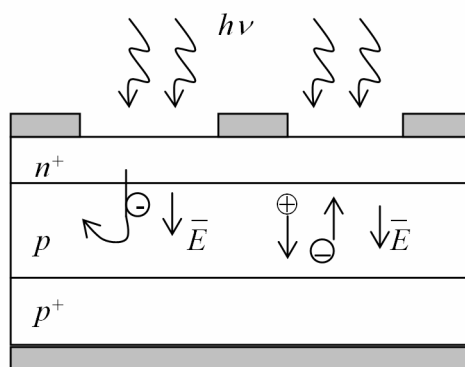


Рисунок 1 — Сечение структуры кремниевых элементов с изотипным p^+ - p переходом

Этот переход создает ускоряющее электрическое поле для неосновных носителей заряда в базе (электронов), что уменьшает время разделения (коллектирования) и рекомбинационные потери. Одновременно, оно является тормозящим для инжектируемых электронов из n^+ – области фронтального перехода в p - базу, которые определяют величину «темнового» тока и соответствующие энергетические потери (FF – коэффициент заполнения).

Этот тип структуры позволил достичь в коммерческом производстве солнечных элементов приемлемый уровень эффективности для систем наземного базирования до (16...20) %.

Вторым по важности результатом можно считать разработанную низкоэнергетическую технологию изготовления кремниевых элементов на основе технологии толстопленочных гибридных интегральных схем 60-х годов XX века. Эта технология не использует сложного современного технологического оборудования, что существенно снижает экономические затраты на изготовление солнечных батарей. Однако это направление потеряет свое значение при резком увеличении объема реализации солнечных элементов.

Для энергетических систем космического назначения были разработаны кремниевые элементы с эффективностью более 24 % с пассивированными эмиттером (n^+ -область) и тыльным электродом (PERLcell, PERCcell). Однако эти структуры изготавливались на основе самых дорогих монокристаллов кремния зонной плавки. В этих структурах более эффективно используется падающее излучение за счет структурирования фронтальной и тыльной поверхности и использования внутреннего отражения от тыльного контакта, увеличивающего эффективную длину (поглощение) светового луча. При этом используется современная «дорогая» технология твердотельной электроники.

Из физики работы биполярных инжекционных полупроводниковых приборов известно, что на больших уровнях инжекции индуцируется электрическое поле, пропорциональное градиенту концентрации основных носителей заряда в базе диода, транзистора и др. [1],

$$\bar{E}_d = \varphi_T d \ln P(x) / dx = (\varphi_T / P(x)) dP(x) / dx ,$$

где φ_T – тепловой потенциал электрона; $P(x)$ – распределение концентрации дырок.

Это диффузионное поле является ускоряющим неосновные носители заряда в фотоэлементе от тыльной стороны к фронтальной. В солнечном элементе это явление проявляется в повышении тока короткого замыкания и фактора FF в первую очередь, эффективности и напряжения холостого хода при увеличении концентрации (интенсивности) солнечного потока. В отличие от статического электрического поля (p^+ - p переход) диффузионное E_d индуцируется излучением и возрастает с ростом его интенсивности. При этом, как и в биполярных дрейфовых транзисторах, влияние встроенного статического поля уменьшается с ростом уровня инжекции (мощности излучения).

Дальнейший прогресс в повышении эффективности солнечных элементов связывают с каскадным последовательным включением структур с разными ширинами запрещенной зоны, обеспечивающим полное поглощение энергетического спектра солнечного излучения. Это направление требует привлечения дорогостоящих технологий, что вступает в противоречие с основной проблемой фотоэнергетики – обеспечение низкой стоимости элементной базы.

Снижение этих противоречий может быть достигнуто за счет использования некоторых свойств пленочных гетероструктурных элементов в сравнительно «дешевой» отработанной технологии кремниевых солнечных элементов. Наличие в гетероструктурах эффективных сил, связанных с энергией разрыва валентной зоны и зоны проводимости, способствует снижению рекомбинационных потерь и повышению эффективности фотоэлемента [2].

Экспериментально подтвержденное в серийном производстве свойство кремниевых солнечных элементов повышать эффективность преобразования солнечной энергии с помощью встроенных в его структуру статического и индуцированного электрических полей предполагает поиск направлений по введению в базу локальных областей, индуцирующих такие поля и способствующих разделению фотогенерированных носителей заряда и снижению их рекомбинации. По своему функциональному назначению они были названы зарядовыми насосами.

Одним из способов встраивания индуцированного поля является включение в структуру солнечного элемента зарядовых насосов, способных переносить заряды, генерируемые светом из тыльной области к фронтальной, не допуская их рекомбинации. В фотопреобразователях с p - базой в качестве зарядовых насосов могут быть локальные n^+ – элементы с «плавающим потенциалом», МДП – структуры и другие системы.

Локальные n^+ – области формируются методами последовательной эпитаксии, диффузии или ионной имплантацией примесей, пространственно разделены между собой на расстоянии порядка двух – трех диффузионных длин в «красной» области, и имеющих форму цилиндра, эллипсоида вращения или параллелепипеда высотой h от одной десятой до полной толщины базы (d). При этом нижняя плоскость n^+ - области отделена от тыльного омического электрода p^+ - областью или диэлектриком (рисунок 2).

Разделяемые контактным потенциалом локальной n^+ - области фотогенерированные электронно-дырочные пары заряжают n^+ - область отрицательно относительно p - базы, собирая электроны с прилегающего (латерально) объема, определяемого диффузионной длиной, а избыточные дырки, как основные носители p - базы, за время релаксации (практически мгновенно) отслеживают изменение избыточной концентрации электронов (прямое смещение p - n перехода). Плавающие (избыточные) электроны в n^+ - области являются основными носителями и за время заряда (10^{-10} с) зарядной ёмкости

локального об'єкта досягають верхньої плоскості n^+ - області і інжектуються вгору к основному n^+ - p переходу, формуючому зовнішню фотоздс.

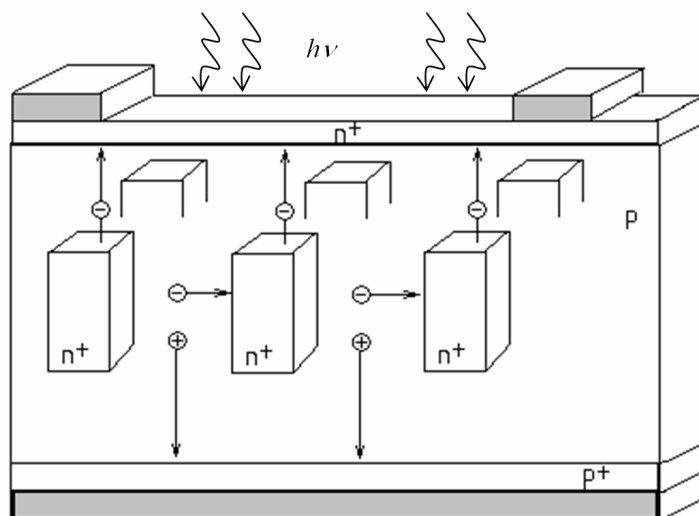


Рисунок 2 — Структура кремниевого фотоэлемента с зарядовыми насосами

В режиме преобразования энергии излучения в электрическую основной n^+ - p переход находится под потенциалом U_{max} , а локальные n^+ - области — напряжением холостого хода U_{xhj} , превышающем U_{max} на (100...200) мВ. Эта разность потенциалов индуцирует электрическое поле в p - базе, ускоряя перенос электронов из «красной» области фотоэлемента в «голубую» и уменьшает рекомбинационные потери не только инжектированных из n^+ -области электронов, но и генерируемых светом в этом пространстве.

В установившемся динамическом равновесном процессе перераспределения зарядов в p - базе инжекция электронов из локальных n^+ - областей с плавающим потенциалом увеличивает концентрацию электронов в зоне собирания основного p - n перехода, выполняя функцию зарядовых насосов, непрерывно переносящих неравновесные заряды из удаленных областей в зону действия контактного поля, тем самым снижая рекомбинационные потери.

Наложение статического и индуцированного полей в структуре с зарядовыми насосами ускоряет процесс переноса и разделения зарядов основным p - n переходом на порядок и более по сравнению с традиционным диффузионным переносом. Одновременно встречная инжекция снизу вверх (от областей насоса до верхнего основного p - n перехода) уменьшает ток насыщения темного тока фотоэлемента, что повышает коэффициент заполнения FF , эффективность и U_{xx} фотопреобразователя.

Концепция зарядовых насосов наиболее приемлема для «дешевых» подложек из мульти и поликремния с малыми величинами времени жизни и диффузионной длины. В этом случае роль зарядовых насосов могут выполнять границы раздела между кристаллитами, легированные примесью противоположного типа за счет явлений сегрегации и ускоренной диффузии.

Оптимальная структура солнечного фотоэлемента с зарядовыми насосами данного типа определяется средним временем жизни в p - базе, уровнем легирования и толщиной базы, высотой локальных n^+ - областей с плавающим потенциалом и латеральным расстоянием между ними, последовательным омическим сопротивлением и оптическими свойствами фронтального и тылового контактов. Эта структура должна обеспечить максимальное преобразование энергии излучения в «красной» области (заряд насоса у тыльной стороны), из которой неравновесные фотоносители заряда не могут достигнуть собирающего n^+ - p перехода из-за интенсивных процессов рекомбинации, и минимально участвовать в преобразовании световой энергии в «голубой» области, где практически все носители разделяются основным n^+ - p переходом.

Быстрая доставка (разряд насоса) носителей заряда в «голубую» область обеспечивает повышение эффективности и других параметров солнечного элемента.

Размеры зарядового насоса (n^+ - область) и уровень её легирования определяются физическими свойствами базы и необходимым временем перезарядки ($\leq 10^{-9}$ с), обеспечивающими более высокое напряжение холостого хода U_{xhj} относительно рабочего напряжения U_{max} . Количественная оценка потерь в традиционной структуре коммерческого кремниевого солнечного элемента и элемента с зарядовыми насосами показывает возможность повышения эффективности с существующего уровня 16 % до 22 %.

В общем случае зарядовый насос – это локальная область в объеме базы с плавающим потенциалом, способная пространственно разделять фотовозбужденные неравновесные носители заряда и индуцировать электрическое поле, обеспечивающее их перемещение в зону действия основного коллектирующего p - n перехода. При этом спектральная характеристика поглощения излучения области зарядового насоса может отличаться от спектральной характеристики основного материала фотопреобразователя.

В качестве зарядовых насосов в структуре полупроводниковых фотопреобразователей могут быть встроенные локальные n^+ -, p^+ - области с плавающим потенциалом (в p - и n - базе соответственно), системы металл-полупроводник (барьер Шоттки), диэлектрик – полупроводник, металл – диэлектрик – полупроводник пористый кремний, локальный гетеропереход на основном материале, локальные квантовые ямы, квантовые проволоки и квантовые точки. Зарядовые насосы могут активироваться внешними воздействиями, но с обеспечением энергетического выигрыша фотопреобразователя в целом с учетом энергетических затрат на активацию.

Для подтверждения физической модели работы фотоэлементов с зарядовыми насосами были проведены экспериментальные исследования на кремниевых структурах n^+p - n - n^+ биполярных транзисторов КТ-841. Роль фотоэлемента играл p - n переход база- коллектор. Исследовались две партии приборов. Первая партия имела традиционную структуру коллекторного перехода p - n - n^+ . Вторая партия содержала локальные p^+ - области с плавающим потенциалом в слаболегированном n – слое коллектора [3]. Каждая партия содержала по 10 приборов.

На рисунке 3 приведены сравнительные вольтамперные характеристики под воздействием постоянной мощности излучения или плотности падающего потока. Как следует из рассмотрения рисунка 3, ток короткого замыкания $I_{кз}$ во второй партии на (32...40) % превышает $I_{кз}$ первой партии. Коэффициент заполнения FF структур с зарядовыми насосами лежал в диапазоне 0,68...0,75, в то время как в традиционных структурах он не превышал 0,65. Напряжение холостого хода $U_{хх}$ первой партии превышало значение $U_{хх}$ второй партии на (21...29) мВ.

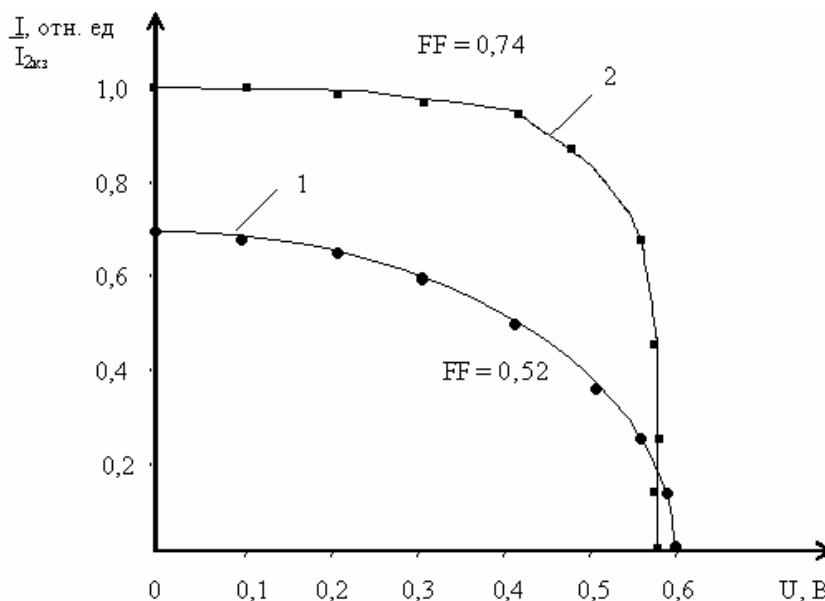


Рисунок 3 — Сравнительные световые вольтамперные характеристики фотоэлементов:
1 — традиционные структуры; 2 — структуры с зарядовыми насосами

Сравнение световых вольтамперных характеристик свидетельствует о значительном влиянии локальных p^+ - областей с плавающим потенциалом на эффективность фотопреобразователей, несмотря на то, что расположение и форма этих областей были не оптимизированы под задачи фотопреобразователя.

Предполагаемый механизм перераспределения фотовозбужденных носителей заряда с помощью зарядовых насосов упрощает процедуру подавления пространственной флуктуации рекомбинационных свойств в солнечных элементах большой площади благодаря гальванической развязке локальных генерационных областей и открывает перспективу дальнейшего увеличения площади фотоэлементов и эффективности фотоэлектрических модулей. Возможность пространственного разделения рекомбинационных и генерационных носителей заряда способствует решению проблемы расширения

спектральної характеристики фотоелемента включенням ізотипного гетероперехода, забезпечуючого поглинання і фотогенерацію в інфрачервоному діапазоні сонячного випромінювання.

Дальніші дослідження будуть направлені на розробку оптимальних методів реалізації структури фотоелементів з зарядовими насосами і теоретичним аспектам їх функціонування.

Бібліографічний список використаної літератури

1. Гусев В.А. Основы твердотельной электроники: учебное пособие / В.А. Гусев. — Севастополь: СевНТУ, 2004. — 635 с.: ил.
2. Современные проблемы полупроводниковой фотоэнергетики: пер. с англ. / С. Фонаш, А. Ротворф, Л. Казмерски [и др.]; под ред. Т. Коутса, Дж. Микина. — М.: Мир, 1988. — 307 с.: ил.
3. Гусев В.А. Объемный делительный слой в структуре высоковольтных полупроводниковых приборов / В.А. Гусев, Д.Г. Мурзин // Вестник СевНТУ. Сер. Информатика, электроника, связь: сб. науч. тр. — Севастополь, 2007. — Вып. 82. — С. 85–89.

Поступила в редакцию 02.02.2011 г.

Гусев В. О. Фотоперетворювачі на основі зарядових насосів

Провдений аналіз напрямків з підвищення ефективності звичайних кремнієвих сонячних елементів. Представлена нова фізична модель фотоперетворювача на основі зарядових насосів.

Ключові слова: сонячні елементи, фотоперетворювач, зарядові насоси.

Gusev V.A. Photoelectric converters based on charge pumps

The analysis of trends to increase efficiency of the conventional silicon solar cells is carried out. The new physical model of the photoelectric converter based on charge pumps is presented.

Keywords: photoelectric converter, charge pumps, solar cells.