

Применение рефлекторов из ITO/Al для повышения эффективности монокристаллических кремниевых фотопреобразователей

© В.Р. Копач, М.В. Кириченко[¶], Г.С. Хрипунов, Р.В. Зайцев

Национальный технический университет „Харьковский политехнический институт“,
61002 Харьков, Украина

(Получена 12 октября 2009 г. Принята к печати 19 октября 2009 г.)

Показано, что для повышения эффективности работы и технологичности изготовления однопереходных монокристаллических кремниевых фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии необходимо использовать тыльно-поверхностный рефлектор на основе проводящего прозрачного оксида индия-олова (ITO) толщиной 0.25–2 мкм. Для повышения КПД и снижения чувствительности к углу падения света на фотоприемную поверхность многопереходных фотоэлектрических преобразователей с вертикальными диодными ячейками на основе монокристаллического кремния необходимо создать вдоль вертикальных границ диодных ячеек рефлекторы из ITO/Al с толщиной слоя ITO более 1 мкм. Проведенные экспериментальные исследования многопереходных фотоэлектрических преобразователей с рефлекторами ITO/Al на границах диодных ячеек показали необходимость модернизации используемой технологии формирования слоев ITO для получения теоретически рассчитанной их толщины.

1. Введение

Важнейшей составной частью системы захвата и удержания фотоактивной компоненты солнечного спектра в наиболее высокоэффективных экспериментальных образцах однопереходных (ОП) кремниевых фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), имеющих КПД 22.7–24.7% [1–3], являются тыльно-поверхностные рефлекторы (ТПР), состоящие из послойно сформированных на соответствующей планарной поверхности базового кристалла кремния пленок SiO_2 и Al. В [4] было показано, что в условиях серийного производства таких ФЭП хорошей альтернативой двухслойному рефлектору SiO_2/Al является двухслойный ТПР TiO_2/Al .

Вместе с тем в случае ТПР с диэлектрическим оксидным слоем электрический контакт слоя Al (одновременно выполняющего функцию тыльного сплошного электрода) с базовым кристаллом осуществляется через многочисленные сквозные отверстия в диэлектрическом слое, суммарная площадь которых составляет < 1% общей площади тыльной поверхности базового кристалла Si [5]. Такой многоточечный характер контакта приводит к некоторому повышению последовательного сопротивления ОП Si-ФЭП, частично компенсируя выигрыш в КПД, достигаемый за счет снижения потерь энергии солнечного излучения. Исходя из изложенного целесообразно представляется замена перфорированного диэлектрического оксидного слоя ТПР сплошным слоем прозрачного проводящего материала, что позволило бы максимально избавиться от негативного влияния добавочного последовательного сопротивления, дополнительно повысив КПД ОП Si-ФЭП, а также упростить изготовление таких ФЭП за счет исключения операции перфорирования одного из слоев ТПР.

Другим направлением совершенствования существующих и разработки новых гелиотехнических систем

является использование ФЭП специальной конструкции в условиях концентрированного солнечного излучения [6–9]. К таким ФЭП относятся, например, многопереходные фотоэлектрические преобразователи (МП Si-ФЭП), представляющие собой монокристаллическую конструкцию из множества (более 10) монокристаллических кремниевых плоскопараллельных вертикальных диодных ячеек с p - n -переходами, ориентированными перпендикулярно фотоприемной поверхности и включенными последовательно через металлические прослойки между соответствующими плоскостями соседних ячеек [8,9]. Схематическое изображение МП Si-ФЭП с вертикальными диодными ячейками приведено на рис. 1.

Существенными достоинствами МП Si-ФЭП рассматриваемого типа в условиях концентрированного солнечного излучения по сравнению с монокристаллическими ОП Si-ФЭП на основе диодной структуры, параллельной фотоприемной поверхности, являются: потенциальная возможность значительно более эффективного преобра-

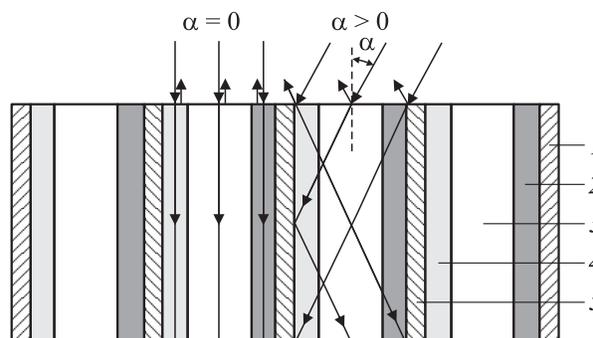


Рис. 1. Схематическое изображение сечения МП Si-ФЭП с вертикальными диодными ячейками $n^+ - p - p^+$ -типа: 1 — сплошной металлический электрод; 2 — слой p^+ -кремния толщиной менее 1 мкм; 3 — слой p -кремния толщиной 160 мкм; 4 — слой n^+ -кремния толщиной менее 1 мкм; 5 — металлическая прослойка толщиной ~ 10 мкм.

[¶] E-mail: kirichenko_mv@mail.ru

зования энергии излучения в электрическую и генерирование в 10–40 раз большего выходного напряжения. Последнее обстоятельство упрощает задачу разработки высоковольтных фотоэлектрических систем и обеспечивает снижение потерь электроэнергии в линии передачи ее от ФЭП к потребителю. Кроме того, отсутствие со стороны фотоприемной поверхности МП Si-ФЭП гребенчатого токосъемного электрода с узкими и тонкими (~ 10 мкм) полосчатыми элементами, разделенными зазорами < 1 мм, позволяет отказаться при изготовлении таких ФЭП от дорогого процесса фотолитографии.

Вместе с тем МП Si-ФЭП с вертикальными диодными ячейками, как и ОП Si-ФЭП, присущ фундаментальный недостаток, состоящий в снижении освещенности (E) фотоприемной поверхности при увеличении угла падения на нее солнечного излучения (α). При работе же ФЭП в условиях концентрирования солнечного излучения с использованием линз, а также линейных многогранных или круглых отражателей излучение при низком ($K \leq 10$) и среднем ($10 < K < 1000$) уровнях концентрации K всегда падает на фотоприемную поверхность ФЭП под углом $\alpha > 0$ [10].

Поскольку в известных МП Si-ФЭП (рис. 1) вдоль внутренних поверхностей кремниевой основы диодных ячеек отсутствуют рефлекторы, подобные высокоэффективным двухслойным ТПР ОП Si-ФЭП, то фотоэлектрически активная для монокристаллического кремния длинноволновая компонента солнечного излучения с длиной волны $(0.95–1.00) \leq \lambda < 1.11$ мкм при прохождении сквозь диодные ячейки может терять энергию из-за недостаточно высокого коэффициента отражения света (R) от указанных поверхностей (ситуация $\alpha > 0$ на рис. 1). Для минимизации указанных потерь солнечного излучения целесообразным представляется создание вдоль внутренних поверхностей кремниевой основы диодных ячеек (аналогично ОП Si-ФЭП) рефлекторов из сплошного слоя прозрачного проводящего материала и алюминия, что позволило бы свести к минимуму и негативное влияние добавочного последовательного сопротивления ФЭП.

В связи с изложенным задачей настоящей работы являлось определение оптимальной конструкции двухслойных рефлекторов, состоящих из прозрачного проводящего материала и алюминия, а также экспериментальное исследование угловой зависимости тестовых образцов МП Si-ФЭП с такими рефлекторами на границах вертикальных диодных ячеек.

2. Теоретические предпосылки

2.1. Однопереходные фотоэлектрические преобразователи

Проведенный анализ показал, что решение рассматриваемой задачи может быть достигнуто за счет использования в составе двухслойного ТПР прозрачного индий-оловянного оксида (ИТО) вместо SiO_2 или TiO_2 .

Указанный материал представляет собой сильно легированный оловом окисел In_2O_3 n^+ -типа проводимости, удельное сопротивление ρ которого можно варьировать в пределах нескольких порядков величины за счет процентного содержания Sn [11]. Характерные значения удельного сопротивления этого материала составляют $\rho \sim (10^{-4}–10^{-3})$ Ом·см при коэффициенте экстинкции $\chi \ll 0.1$ в области длин волн $\lambda \leq \lambda_{RB}$ [12,13], где λ_{RB} — красная граница фотоэффекта, которая для кристаллического кремния составляет 1.1 мкм [14].

Согласно [15], при таких значениях ρ и толщинах ИТО $t_{\text{ИТО}} \leq 2$ мкм добавка к последовательному сопротивлению Si-ФЭП, приходящаяся на единицу площади его планарной поверхности при сплошных контактах по границам Si/ИТО/Al, не должна превышать $4 \cdot 10^{-6}$ Ом·см². Это примерно на 5 порядков величины меньше последовательного сопротивления без прослоек ИТО для однопереходных монокристаллических Si-ФЭП при сплошном контакте металлического электрода с тыльной поверхностью базового кристалла Si [16]. Весьма малые значения χ сводят к минимуму поглощения света в ИТО. Все указанное свидетельствует, что использование ИТО в составе двухслойного ТПР ИТО/Al не должно негативно влиять на эффективность работы Si-ФЭП рассматриваемого типа. Кроме того, современные методы осаждения пленок ИТО позволяют осуществлять соответствующий процесс при температурах ниже 450°C [11–13,17], что хорошо согласуется с концепцией технологии изготовления монокристаллических Si-ФЭП, согласно которой наиболее высокотемпературным процессом должно быть изготовление диффузионных слоев n^+ -Si и p^+ -Si, осуществляемое при 900–1000°C [17,18].

После выбора ИТО в качестве наиболее оптимального материала неметаллической составляющей рассматриваемого двухслойного ТПР необходимо определить толщину $t_{\text{ИТО}}^{\text{max}}$ слоя ИТО, при которой ТПР ИТО/Al может обеспечить максимальную интегральную отражательную способность в требуемом диапазоне длин волн λ [19]. Как показано в [4], этот диапазон значений λ в случае ОП Si-ФЭП при толщине базового кристалла Si $\sim (180–200)$ мкм (значения, характерные для современных серийных ОП Si-ФЭП) соответствует $0.88 \leq \lambda \leq 1.11$ мкм.

Способ определения $t_{\text{ИТО}}^{\text{max}}$ слоя ИТО был аналогичен использованному в [4] при нахождении интерференционной толщины для оксидных слоев двухслойных ТПР SiO_2/Al и TiO_2/Al и заключался в следующем. Прежде всего аналогично [20] были определены оптимальные толщины $t_{\text{ИТО}}^{\text{opt}}(\lambda)$ оксида, обеспечивающие максимальные значения R в указанном диапазоне длин волн. Далее, по полученной зависимости $t_{\text{ИТО}}^{\text{opt}}(\lambda)$ выбирались значения $t_{\text{ИТО}}^{\text{opt}}$, соответствующие $\lambda = 0.8, 0.9, 1.0$ и 1.1 мкм, которые были приблизительно следующими: 0.18, 0.21, 0.25 и 0.28 мкм. Для этих значений $t_{\text{ИТО}}^{\text{opt}}$, как и в [20], рассчитывались спектральные зависимости коэффициента отражения $R(\lambda, t_{\text{ИТО}}^{\text{opt}}(\lambda), n_0)$ в диапазоне $0.80 \leq \lambda \leq 1.13$ мкм.

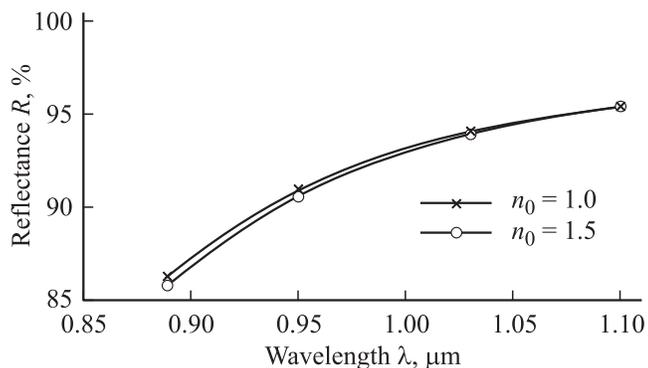


Рис. 2. Зависимости отражения R от длины волны λ и показателя преломления среды n_0 для тыльно-поверхностного рефлектора ITO/Al с $t_{ITO}^{opt} = t_{ITO}^{max}$.

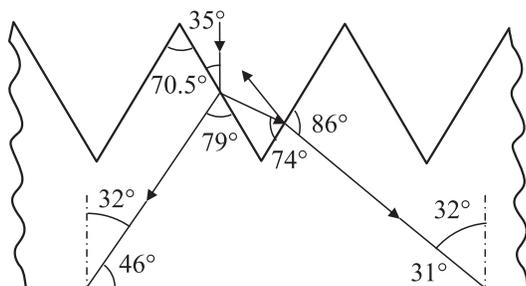


Рис. 3. Схематическое изображение траектории световых лучей внутри базового кристалла Si однопереходного фотоэлектрического преобразователя с текстурированной фронтальной поверхностью и гладкой тыльной поверхностью [22].

При расчетах указанных зависимостей спектральная зависимость показателя преломления Si, $n_{Si}(\lambda)$, была заимствована из [21]. В случае контакта фронтальной поверхности Si-ФЭП с воздухом показатель преломления среды $n_0 = 1.0$, а в случае контакта этой поверхности с защитным стеклом аналогично [15] полагали $n_0 = 1.5$. Анализ всей совокупности зависимостей $R(\lambda, t_{ITO}^{opt}(\lambda), n_0)$ показал, что как при $n_0 = 1.0$, так и при $n_0 = 1.5$ наиболее оптимальная толщина ITO, обеспечивающая максимальную интегральную отражательную способность ТПР ITO/Al в заданном диапазоне длин волн, составляет 0.25 мкм. Зависимости $R(\lambda, n_0)$ для $t_{ITO}^{max} = 0.25$ мкм приведены на рис. 2.

В случае текстурированной фронтальной поверхности с инвертированными пирамидами, ограниченными плоскостями типа (111), значение наиболее оптимальной толщины окисла для ТПР ITO/Al не является столь критичным. Это обусловлено спецификой траектории световых лучей внутри базового кристалла Si, показанной на рис. 3 согласно [22].

Как видно из рис. 3, углы падения света на гладкую тыльную поверхность таких Si-ФЭП превышают 40° . Вместе с тем ранее было показано [15], что предельный угол полного внутреннего отражения при падении света

из кремния на ITO составляет $\sim 32^\circ$. Таким образом, при наличии указанной выше текстуры со стороны фронтальной поверхности можно использовать принципиально иной подход к определению t_{ITO}^{max} , основанный на учете эффекта полного внутреннего отражения света от границы раздела Si/ITO. Так как, согласно [23], эффект полного внутреннего отражения обусловлен волновыми процессами в слое ITO толщиной не более длины волны света, то, с одной стороны, для подавления потерь энергии излучения, которые могут быть связаны с проникновением части энергии излучения в металл, контактирующий с ITO, а с другой стороны, с целью минимизации сопротивления слоя ITO, толщину слоя ITO следует экспериментально оптимизировать в пределах значений $1 < t_{ITO}^{max} < 2$ мкм.

2.2. Многопереходные фотоэлектрические преобразователи

Проведенный анализ показал, что повышение эффективности МП Si-ФЭП может быть достигнуто путем создания вдоль вертикальных Si-границ диодных ячеек, перпендикулярных направлению тока, рефлекторов из слоев ITO и Al. Образующийся при контакте p -Si с n^+ -ITO барьер Шоттки может быть использован в качестве выпрямляющего перехода, что позволит упростить технологию изготовления МП Si-ФЭП за счет отказа от термодиффузионного формирования выпрямляющих p - n -переходов внутри вертикальных диодных ячеек. Схематическое изображение вертикального сечения предлагаемой конструкции МП Si-ФЭП с рефлекторами на вертикальных границах диодных ячеек приведено на рис. 4.

Новая конструкция МП Si-ФЭП позволяет исключить потери фотоактивного излучения на частичное поглощение металлическими слоями между отдельными диодными ячейками в случае использования МП Si-ФЭП в гелиосистемах с высоким уровнем концентрации солнечного излучения, основная часть которого поступает на фотоприемную поверхность МП Si-ФЭП под углом $0 < \alpha < 90^\circ$.

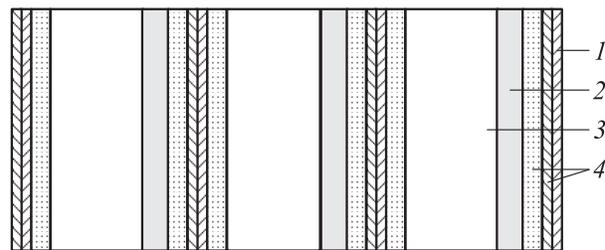


Рис. 4. Схематическое изображение сечения МП Si-ФЭП с рефлекторами из ITO/Al в составе вертикальных диодных ячеек $n^+ - p - p^+$ -типа: 1 — сплошной металлический электрод; 2 — слой p^+ -кремния; 3 — слой p -кремния толщиной 160 мкм; 4 — рефлектор n^+ -ITO/Al.

Проведенные в [24] расчеты показали, что при всех реальных значениях угла α свет с $0.9 \leq \lambda \leq 1.1$ мкм, попадая внутрь диодных ячеек такого ФЭП, должен испытывать практически полное внутреннее отражение от рассматриваемых рефлекторов, что должно существенно приблизить коэффициент оптического отражения от границ ITO/Si к единице и позволит повысить КПД МП Si-ФЭП примерно в 1.2 раза. Уже упоминалось, что, согласно [23], эффект полного внутреннего отражения обусловлен волновыми процессами в слое ITO толщиной не более длины волны света, поэтому, с одной стороны, для подавления потерь энергии излучения, которые могут быть связаны с проникновением части энергии излучения в металл, контактирующий с ITO, а с другой стороны, с целью минимизации сопротивления слоя ITO проходящему через него току, толщину t_{ITO} этого слоя следует, как и в случае с двухслойным ТПР для ОП Si-ФЭП, экспериментально оптимизировать в пределах значений $1 < t_{ITO} < 2$ мкм. Вклад же последовательного сопротивления слоя ITO в последовательное сопротивление диодной ячейки, приходящееся на единицу ее площади, как было показано в [15], составляет $4 \cdot 10^{-6}$ Ом \cdot см $^{-2}$, что примерно на 5 порядков величины меньше, чем без прослоек ITO для исследованных МП Si-ФЭП. Последнее показывает, что использование двухслойных рефлекторов из ITO/Al с $1 < t_{ITO} < 2$ мкм в составе МП Si-ФЭП не должно оказывать негативного влияния на эффективность работы рассматриваемых приборов.

3. Методика эксперимента

В связи с изложенным была изготовлена серия образцов вертикальных диодных ячеек на основе пластин кремния марки КДБ-7.5 толщиной (150 ± 20) мкм и диаметром 44 мм, на поверхностях которых методом магнетронного распыления и термовакuumного осаждения последовательно формировались слои ITO и Al толщиной ~ 0.5 мкм. Для предотвращения образования встречно включенных барьеров Шоттки одна из поверхностей пластин перед нанесением ITO дополнительно подлегировалась Al. Вырезанные из таких пластин вертикальные диодные ячейки с планарными размерами 6×2 мм состыковывались по 10 штук в МП Si-ФЭП с площадью фотоприемной поверхности 10 мм 2 .

Схематическое изображение вертикального сечения исследованных ФЭП соответствует показанному на рис. 4.

Определение величин плотности тока короткого замыкания J_{SC} и напряжения холостого хода U_{OC} исследованных ФЭП проводилось путем измерения и последующей аналитической обработки нагрузочных световых вольт-амперных характеристик (ВАХ).

Режим облучения АМ0, аналогично [25], имитировался с использованием ксеноновой лампы-вспышки.

Степень концентрации излучения на фронтальной поверхности ФЭП составляла 160.

Для изменения угла α исследуемый МП Si-ФЭП закреплялся на гониометрическом устройстве, позволяющем изменять этот угол в пределах от 0 до 360° с точностью до 0.01°. Измерения нагрузочных световых ВАХ проводились в диапазоне углов α от 0 до 75° с шагом 5° при освещении сначала выпрямляющего, а затем изотипного переходов исследуемых ФЭП. Такой выбор диапазона углов α обусловлен тем, что при превышении углом α величины угла Брюстера, составляющего 74.5° для кремния, решающее влияние на угловые зависимости выходных параметров ФЭП начинает оказывать резко возрастающий коэффициент отражения от фронтальной поверхности ФЭП, а не особенности его конструкции. Температура образцов 25°C при измерениях нагрузочных световых ВАХ поддерживалась с помощью термостата. Аналитическая обработка ВАХ осуществлялась подобно [26].

4. Экспериментальные результаты

На рис. 5 приведены нормированные угловые зависимости $U_{OC}^{norm}(\alpha)$ и $J_{SC}^{norm}(\alpha)$, рассчитанные по экспериментальным значениям тока короткого замыкания J_{SC} и напряжения холостого хода U_{OC} следующим образом: $J_{SC}^{norm}(\alpha) = J_{SC}(\alpha)/J_{SC}(\alpha = 0)$, $U_{OC}^{norm}(\alpha) = U_{OC}(\alpha)/U_{OC}(\alpha = 0)$. Для сравнения на рис. 5 также приведены полученные в [24] аналогичные зависимости для МП Si-ФЭП традиционной конструкции, не имеющего рефлекторов в составе вертикальных диодных ячеек.

Из рис. 5 видно, что характер зависимостей $U_{OC}^{norm}(\alpha)$ и $J_{SC}^{norm}(\alpha)$ для исследованных образцов в целом подобен характеру $U_{OC}^{norm}(\alpha)$ и $J_{SC}^{norm}(\alpha)$ для МП Si-ФЭП традиционной конструкции.

Резкие отклонения, наблюдающиеся на зависимостях $U_{OC}^{norm}(\alpha)$ и $J_{SC}^{norm}(\alpha)$ (кривые 1, 5), полученных при освещении изотипного перехода исследованных МП Si-ФЭП, после достижения углов 70 и 25° соответственно могут быть объяснены тем, что при освещении изотипного перехода существенный вклад в величины указанных параметров вносит влияние, возможно, плохо отражающей поверхности контакта p^+ -Si:Al/ITO на вертикальной границе единичной ячейки. При этом вследствие малой толщины ячеек (~ 150 мкм) даже при небольших углах поворота ФЭП значительная часть длинноволновых квантов света, проникших в его объем, не успевает поглотиться и попадает на границу p^+ -Si:Al/ITO в ячейке, где и сказывается негативное влияние низкой отражающей способности такой границы на выходные параметры МП Si-ФЭП и особенно на величину J_{SC} .

Вместе с тем необходимо отметить, что при создании МП Si-ФЭП с рефлекторами из ITO/Al в составе вертикальных диодных ячеек удалось лишь повторить, но не существенно улучшить характеристики угловых

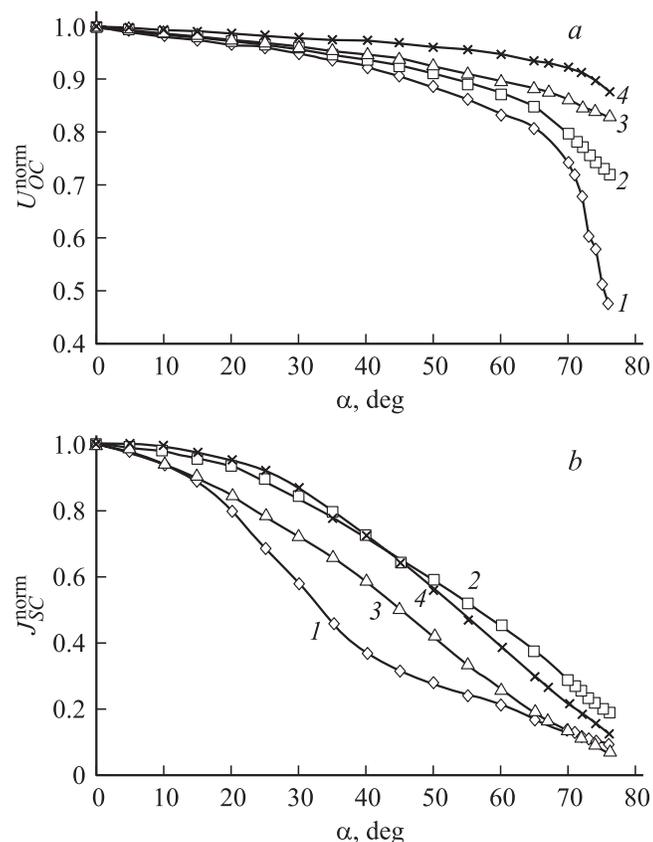


Рис. 5. Зависимости $U_{OC}^{norm}(\alpha)$ (a) и $J_{SC}^{norm}(\alpha)$ (b): (1, 2) — МП Si-ФЭП с рефлекторами ITO/Al в составе диодных ячеек; (3, 4) — МП Si-ФЭП традиционной конструкции. Освещение ФЭП со стороны выпрямляющих (2, 3) и изотипных (1, 4) переходов.

зависимостей выходных параметров МП Si-ФЭП традиционной конструкции. Помимо вышеуказанного негативного влияния низкой отражательной способности границ p^+ -Si: Al/ITO, данное обстоятельство может быть обусловлено также ограниченными технологическими возможностями вакуумной установки ВУП-5, в которой методом магнетронного распыления были получены слои ITO. Это привело к тому, что толщина получаемых слоев составляла 0.3–0.4 мкм вместо рассчитанных в [24] 1–2 мкм. Недостаточная толщина слоев ITO не обеспечивает реализации эффекта полного внутреннего отражения длинноволновой компоненты солнечного излучения [24], и в этом случае влияние, вероятно негативное, на угловые зависимости $U_{OC}^{norm}(\alpha)$ и $J_{SC}^{norm}(\alpha)$ может также оказывать плохо отражающая поверхность раздела ITO/Al в диодной ячейке, а находящийся на границе ячейки слой Al.

Однако даже с учетом отмеченных недостатков реализация при создании исследованных МП Si-ФЭП ресурсосберегающей технологии изготовления, исключающей высокотемпературные операции термодиффузионного формирования выпрямляющего и изотипного переходов, делает перспективным дальнейшее совершенствование

предложенного конструкционного решения. Основным направлением такого совершенствования должна являться модернизация технологии формирования ITO, что позволит увеличить толщину наносимых слоев до требуемых 1–2 мкм и позволит создать высокоэффективные ресурсосберегающие и в результате имеющие сниженную себестоимость МП Si-ФЭП широкомасштабного применения.

5. Заключение

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сформулировать следующее заключение. Замена перфорированного диэлектрического оксидного слоя (SiO_2 или TiO_2) двухслойного ТПР сплошным проводящим прозрачным слоем индий-оловянного оксида (ITO) позволит повысить эффективность и технологичность изготовления однопереходных монокристаллических кремниевых фотоэлектрических преобразователей. В случае Si-ФЭП с полированной фронтальной поверхностью и толщиной базового кристалла 180–200 мкм наиболее оптимальная интерференционная толщина слоя ITO, обеспечивающая коэффициент отражения ТПР ITO/Al в пределах $85 < R < 96\%$ для поступающей на тыльную поверхность Si-ФЭП фотоактивной компоненты солнечного излучения, составляет 0.25 мкм. При наличии со стороны фронтальной поверхности базового кристалла однопереходных Si-ФЭП текстуры типа инвертированных пирамид, ограниченных плоскостями типа (111), в силу специфики хода световых лучей внутри кристалла все излучение будет испытывать практически полное внутреннее отражение от границы раздела Si/ITO, и для минимизации потерь энергии фотоактивного излучения и сопротивления слоя ITO толщину слоя ITO следует экспериментально оптимизировать в пределах значений $1 < t_{ITO} < 2$ мкм независимо от толщины базового кристалла.

Повышение КПД перспективных для использования в условиях концентрированного солнечного излучения многопереходных кремниевых фотопреобразователей с вертикальными диодными ячейками может быть достигнуто за счет использования в составе этих ячеек вдоль их вертикальных границ рефлекторов ITO/Al с толщиной слоя ITO $1 < t_{ITO} < 2$ мкм.

По результатам исследований чувствительности МП Si-ФЭП с рефлекторами ITO/Al на границах вертикальных диодных ячеек к углу падения солнечного излучения на их фронтальную поверхность установлено, что характер хода зависимостей $U_{OC}^{norm}(\alpha)$ и $J_{SC}^{norm}(\alpha)$ для исследованных образцов в целом подобен характеру $U_{OC}^{norm}(\alpha)$ и $J_{SC}^{norm}(\alpha)$ для МП Si-ФЭП традиционной конструкции. Тот факт, что для исследованных ФЭП не удалось существенно улучшить характеристики угловых зависимостей выходных параметров, может быть обусловлен недостаточной толщиной слоев ITO и наличием

плохо отражающей поверхности контакта p^+ -Si:Al/ITO на вертикальной границе диодной ячейки.

Перспективным направлением дальнейшего совершенствования МП Si-ФЭП с рефлекторами ITO/Al на границах диодных ячеек является увеличение толщины наносимых слоев ITO до 1–2 мкм за счет соответствующей модернизации технологии формирования таких слоев.

Список литературы

- [1] J. Zhao, A. Wang, F. Yun, G. Zhang, D.M. Roche, S.R. Wenham, M.A. Green. *Progr. Photovolt.*, **5** (4), 269 (1997).
- [2] UNSW Annual Report 2005, pt 1, p. 25 (University of New South Wales). <http://www.pv.unsw.edu.au>
- [3] UNSW Annual Report 2006, p. 27 (University of New South Wales). <http://www.pv.unsw.edu.au>
- [4] V.R. Kopach, M.V. Kirichenko, S.V. Shramko, R.V. Zaitsev, I.T. Tymchuk, V.A. Antonova, A.M. Listratenko. *Func. Mater.*, **14** (4), 555 (2007).
- [5] M.A. Green, J. Zhao, A. Wang, S.R. Wenham. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **65**, 9 (2001).
- [6] A.W. Blakers, J. Smeltik. *Proc. 2nd World Conf. and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion* (Vienna, Austria, 1998) p. 2193.
- [7] P.J. Verlinden. In: *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*, ed. by T. Markvart, L. Castaner (Oxford, Kidlington, Elsevier Science Ltd., 2003) p. 436.
- [8] http://www.moserbaer.com/pv_technology.asp
- [9] E.G. Guk, V.B. Shuman, M.Z. Shwartz. *Proc. 14th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf.* (Barcelona, Spain, 1997) p. 154.
- [10] В.М. Андреев, В.А. Грилихес, В.Д. Румянцев. *Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения* (Л., Наука, 1989).
- [11] R.B.-H. Tahar, T. Ban, Y. Ohya, Y. Takaniishi. *J. Appl. Phys.*, **83**, 2631 (1998).
- [12] D.E. Morton, A. Dinca. <http://www.dentonvacuum.com>
- [13] <http://www.jobinyvon.com>
- [14] М.М. Колтун. *Оптика и метрология солнечных элементов* (М., Наука, 1985).
- [15] V.R. Kopach, M.V. Kirichenko, S.V. Shramko, R.V. Zaitsev. *Func. Mater.*, **15** (4), 604 (2008).
- [16] В.А. Антонова, В.Н. Борщев, В.Р. Копач, А.М. Листратенко, Н.И. Слипченко, И.Т. Тымчук. В сб.: *Радиотехника* (Харьков, 2004) вып. 139, с. 113.
- [17] К.Л. Чопра, С.Р. Дас. *Тонкопленочные солнечные элементы* (М., Мир, 1986) [Пер. с англ.: K.L. Chopra, S.R. Das. *Thin film solar cells* (N.Y., Plenum Press, 1983)].
- [18] А.М. Листратенко. В сб.: *Радиотехника* (Харьков, 2001) вып. 121, с. 121.
- [19] V.A. Antonova, V.N. Borshchov, V.R. Kopach, N.P. Klochko, A.M. Listratenko, N.I. Slipchenko, V.I. Shkalet. *Func. Mater.*, **10** (1), 168 (2003).
- [20] М.М. Колтун. *Селективные оптические поверхности преобразователей солнечной энергии* (М., Наука, 1979).
- [21] H.R. Philipp, E.A. Taft. *Phys. Rev.*, **120**, 37 (1960).
- [22] А. Фаренбрух, Р. Бьюб. *Солнечные элементы: Теория и эксперимент* (М., Энергоатомиздат, 1987) [Пер. с англ.: A.L. Fahrenbruch, R.H. Bube. *Fundamentals of solar cells. Photovoltaic solar energy conversion* (N.Y., Academic Press, 1983)].
- [23] В.А. Кизель. *Отражение света* (М., Наука, 1973).
- [24] V.R. Kopach, M.V. Kirichenko, S.V. Shramko, R.V. Zaitsev, S.A. Bondarenko. *Func. Mater.*, **15** (2), 253 (2008).
- [25] W. Keogh, A. Cuevas. *Proc. 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (Anaheim, USA, 1997) p. 199.
- [26] E. Kerschaver, R. Einhaus, J. Szlufcik, J. Nijs, R. Mertens. *Proc. 14th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf.* (Barcelona, Spain, 1997) p. 2438.

Редактор Л.В. Шаронова

Application of ITO/Al reflectors for increase of single-crystal silicon solar cells efficiency

V.R. Kopach, M.V. Kirichenko, G.S. Khrypunov, R.V. Zaitsev

National Technical University
„Kharkiv Polytechnical Institute“,
61002 Kharkiv, Ukraine

Abstract It is shown that to increase the efficiency and to improve manufacturability of one-junction single crystal silicon photovoltaic converters of solar energy it is necessary to use back-surface reflector on the base of conducting transparent indium-tin oxide (ITO) 0.25–2 μm thick. For the efficiency increase and reduction of sensitiveness to angle of light incidence on the photoreceiving surface of multi-junction photovoltaic converters with vertical diode cells on the base of single crystal silicon it is essential to create along the vertical borders of diode cells reflectors from ITO/Al with ITO layer thickness more than 1 μm. The experimental studies fulfilled on the multi-junction photovoltaic converters with ITO/Al reflectors on the borders of the diode cells shown that the technique of ITO layers preparation needed modernization to obtain ITO layer thickness close to the theoretical value.