

## НЕОДНОРОДНОСТИ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ АМОРФНОГО ГИДРИРОВАННОГО КРЕМНИЯ ПО ПЛОЩАДИ

В. П. Лелеченко, Ф. Э. Маому, Я. О. Ройзин

Одесский госуниверситет им. И. И. Мечникова

Солнечные батареи на основе аморфного гидрированного кремния (а -  $Si:H$ ) являются перспективными устройствами для широкомасштабного применения в качестве преобразователей световой энергии. Они существенно дешевле по сравнению с аналогичными преобразователями на основе кристаллического кремния. Возможно создание элементов большой площади на подложках из различного типа материалов. С помощью батарей на (а -  $Si:H$ ) достигнут коэффициент преобразования солнечной энергии выше 10%. Для эффективной работы параметры преобразователей должны быть однородны по площади. В настоящее время достаточно высокие коэффициенты преобразования солнечной энергии (до 11,5%) достигаются при площади батарей около  $1 \text{ см}^2$ . При увеличении площади батарей выше  $100 \text{ см}^2$  эти значения падают до 6-8% [3].

В настоящей работе исследованы неоднородности напряжения холостого хода  $U$  и тока короткого замыкания  $I_n$  по площади, для солнечных элементов на основе а -  $Si:H$ . Цель работы — классификация неоднородностей и выявление физических механизмов, приводящих к деградационным изменениям.

Солнечная батарея формировалась последовательным нанесением на стекло проводящего прозрачного слоя из оксида олова и слоев аморфного кремния  $p-i-n$  типов проводимости, соответственно. Аморфный кремний наносится в реакторе емкостного типа методом разложения силана в тлеющем ВЧ-разряде при температуре  $300^\circ\text{C}$ . В качестве источников легирующих примесей использовались стандартные добавки фосфина и диборана. Толщина  $i$ -слоя изменялась от 0,2 до 0,5 мкм.

Для контроля неоднородностей использовалась оригинальная система, в которой в одной точке измеряемой структуры совмещались лазерный и ртутный сканирующие зонды.

Установка для измерений изображена на рис. 1. В нее входит ртутный зонд, обеспечивающий контакт с поверхностью солнечного элемента со стороны  $i$ -слоя, устройство для крепления образца на

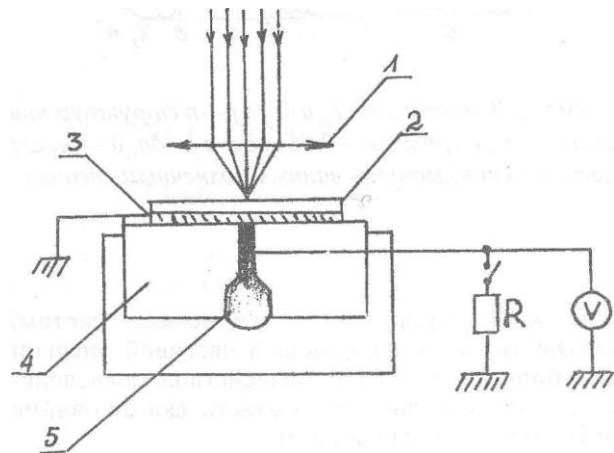


Рис. 1. Схема установки для исследования однородности  $p-i-n$  структур. 1 — линза, 2 — держатель образца, 3 — исследуемая структура, 4 — тефлоновая шайба, 5 — ртуть.

основание зонда; механический привод, передвигающий образец по поверхности основания со скоростью  $v = 40 \text{ мкм/с}$ . В качестве источника света использовался гелий-неоновый лазер ЛГИ-208А, совмещенный со ртутным зондом. В таком режиме исследовалась однородность  $U_{xx}$  и  $I_{KЗ}$  по площади. Для измерения спектральных характеристик фототовета солнечных элементов использовался свет галогеновой лампы, проходящий через монохроматор УМ-2. Для обеспечения локальности проводимых измерений лазерный луч фокусировался с помощью линзы и диафрагмы. Площадь светового пятна, попадающего на образец в области контакта со ртутью, составляла  $0,3 \text{ мм}^2$ . Площадь ртутного контакта составляла  $0,2 \text{ мм}^2$  со стабильностью не менее 2%.

Измерительные контакты формировались к ртути и полупрозрачному электроду. Измерение  $t/\nu$  и  $I$  проводились с помощью электрометрического вольтметра В7-30. Термо-радиационные деградационные воздействия осуществлялись путем облу-

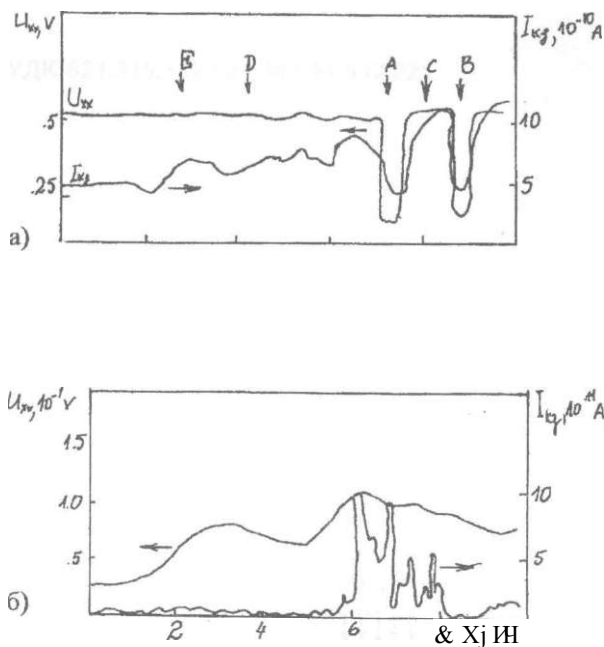


Рис. 2. Топограммы  $I_k$  и  $U_{xy}$   $p-i-n$  структур при освещении лазером с  $\lambda = 0,63$  мкм: а — до, б — после освещения концентрированным солнечным светом.

чения концентрированным солнечным светом. Плотность потока падающей световой энергии была порядка  $100 \text{ Вт/см}^2$ . Воздействию последовательно подвергалась вся область сканирования ртутным и лазерным зондом.

На рис. 2 представлены характерные записи напряжения холостого хода и тока короткого замыкания  $p-i-n$  элемента. Длина строки сканирования 10 мм. На зависимостях  $U_{xx}$  и  $I_{кз}$  можно выделить ряд особенностей. Прежде всего, это места локальных каналов утечки (точки А и В на рис. 2а), где напряжение холостого хода падает почти к нулевому значению. Ток короткого замыкания в этих местах значительно ниже среднего по образцу. На рисунке размеры этих неоднородностей определяются размерами зонда. Фронты зависимостей  $U_{xx}$  и  $I_{кз}$  соответствуют наездам ртутного контакта на дефектные места пленки. Измерения сопротивления дефектных участков (А и В) показывают, что регистрируемые значения малы по сравнению с однородными участками образцов, причем диодность  $I(U)$  характеристик практически отсутствует.

Второй особенностью в поведении  $U_{xx}$  и  $I_{кз}$  является то, что относительные флуктуации  $(\Delta U/U)_{xx}$  и  $(\Delta I/I)_{кз}$  значительно меньше флуктуации

Указанная закономерность, по нашему мнению, связана с различной концентрацией рекомбинационных центров в объеме пленки  $a-Si:H$ . Для исследования влияния концентрации дефектов в  $p$ -слое на работу солнечного элемента были проведены эксперименты по термо-

радиационному отжигу  $p-i-n$  структур с помощью концентрированного солнечного света. Мощность в пучке составляла  $100 \text{ Вт/см}^2$ . Время облучения 10 минут. После такого воздействия ток короткого замыкания уменьшался на два порядка, а напряжение холостого хода в среднем в три раза (рис. 2 б). Наблюдаемые особенности связываются нами с эффузией водорода из  $a-Si:H$  в результате термических и радиационных воздействий. Температура, до которой нагревалась поверхность образца, превышала  $300^\circ\text{C}$ . Как известно [1], при таких температурах возможна локальная эффузия водорода из аморфного гидрированного кремния, что приводит к резкому возрастанию числа оборванных связей, которые могут выступать как рекомбинационные центры, что влечет за собой уменьшение значений  $U_{xx}$  и  $I_{кз}$ . Так как  $I_{кз}$  значительно более чувствительно к числу рекомбинационных центров, чем  $U_{xx}$ , то большие флуктуации тока короткого замыкания по сравнению с флуктуациями напряжения холостого хода можно объяснить различной концентрацией центров рекомбинации в объеме пленки.

Исследования спектральных характеристик солнечного элемента в точках с повышенными и пониженными по сравнению со средним значением  $I_{кз}$  (точки С и Д на рис. 2 а) показали, что систематических сдвигов порога фотоэффекта в длинноволновой области не наблюдается. Кривые отличаются лишь степенью сжатия по оси тока (рис. 3, кривая 1 и 2). В то же время имеются отдельные точки с повышенной чувствительностью в длинноволновой области спектра (рис. 3, кривая 3).

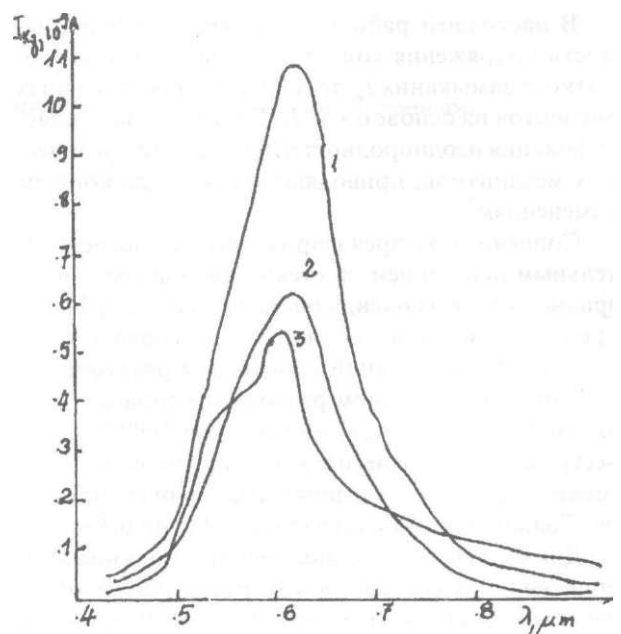


Рис. 3. Спектральные характеристики солнечного элемента (1, 2 и 3 соответственно точки С, Д и К на рисунке 1).

Таким образом, в *p-i-n* элементах на основе *a-Si:H* можно выделить три характерных типа неоднородностей: а) области локальных утечек, где  $U_{\text{xx}}$  и  $I_{\text{к}}$  значительно занижены по сравнению со средними значениями; б) неоднородности тока / флуктуации которого значительно превосходят флуктуации  $U^{\wedge}$ , в) точки с повышенной чувствительностью в длинноволновой части спектра.

Особо сильное паразитное влияние на работу солнечного элемента оказывают неоднородности, связанные с наличием областей локальной проводимости. Существование таких областей является характерной особенностью многокомпонентных соединений на основе кремния. В диэлектрических слоях двуокиси и нитрида кремния существуют локальные области с повышенной проводимостью [2; 4] на стенках пор, трещин и других подобных дефектов структуры. Наличие таких дефектов в структуре солнечного *a-Si:H* элемента приводит к резкому падению коэффициента преобразования, фактора и ухудшению диодности структур. В этом случае работа солнечного элемента эквивалентна подключению дополнительного нагрузочного сопротивления, численно равного сопротивлению канала утечки. Два других типа неоднородностей в *p-i-n* элементах на основе *a-Si:H* связаны с различием в микроструктуре и различными концентрациями атомов водорода в различных частях пленки *a-Si:H*. Характерные размеры области

с повышенной величиной  $I$  могут составлять несколько миллиметров, так что всегда можно выделить области с существенно различающимися коэффициентами преобразования. При работе солнечного элемента большой площади происходит интегральное усреднение его характеристик. При больших площадях флуктуации характеристик солнечного элемента существенно уменьшаются. В то же время наличие неоднородностей приводит к пониженным значениям коэффициента преобразования г]. Достижение максимально возможных г] реально лишь при обеспечении высокой однородности *p-i-n* структур по площади.

#### Литература

1. Аморфные полупроводники / Под ред. М. Бродски. 1982.
2. Ендиховский С. А., Ройзин Я. О., Свиридов В. Н., Цыбесков Л. В. Токовая деградация структур на основе *a-Si:H*. // ФТП. 1989. Т. 23, С. 444-448.
3. Yoshida T., Fujikate S., Shimabukuro N., Ishikawa Y., Sakai N. Open-circuit voltage of based solar cell. 20th IEEE photovoltaic specialists conference. LAS VEGAS. 1988.
4. Ya. O. Roizin. Failure phenomena due to hydrogen migration in amorphous films 1991. Journal of Non-Crystal-line Solids.