

Оптоэлектронные образы поликристаллических тонкопленочных солнечных элементов на основе CuInSe_2 и CuInGaSe_2 , полученные лазерным сканированием

© Г.А. Медведкин[†], Л. Стольт*, Й. Веннерберг*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

* Уппсала университет, Солнечный центр им. Ангстрёма,
п/я 534, SE-75121, Уппсала, Швеция

(Получена 1 марта 1999 г. Принята к печати 2 марта 1999 г.)

Методика лазерного сканирования была использована для получения двухмерных и трехмерных оптоэлектронных образов поликристаллических солнечных элементов на основе тонких пленок CuInSe_2 и CuInGaSe_2 . Полученные с помощью тока, индуцированного лазерным лучом, топограммы обнаруживают микрообласти с пониженной фотовольтаической эффективностью и показывают детальное распределение скрытых неоднородностей по всей активной поверхности солнечного элемента. Градация микродефектов по силе и размеру была достигнута путем постэкспериментального графического и цветового моделирования полученных трехмерных образов.

Введение

Для поликристаллических оптоэлектронных приборов анализ однородности представляет важную задачу, поскольку пленки состоят из большого числа зерен и фотоответ заведомо неоднороден вблизи каждого кристаллита. Полное освещение солнечного элемента дает только интегральные выходные характеристики и усредненный фотоответ уменьшается за счет распределенных макро- и микродефектов. Лазерное сканирование поверхности обеспечивает информацию в каждой точке прибора и может дать нам также подробное распределение фотовольтаической эффективности по всей приемной площади. Целью настоящей работы является исследование невидимых дефектов и неоднородностей солнечных элементов в микро- и мини-масштабе.

Экспериментальная часть

Высокоэффективные поликристаллические тонкопленочные солнечные элементы с приборной структурой $\text{Mo/Cu(In,Ga)Se}_2/\text{CdS/ZnO/ZnO:Al}$ были изготовлены на карбонатно-натриево-кальциевом стекле. Для исследования были использованы образцы солнечных элементов с эффективностью 12–13% и с материалами-поглотителями CuInSe_2 (CIS) и $\text{CuIn}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{Se}_2$ (CIGS).

Мы использовали лазерный сканнер, обеспечивающий измерение фотоответа (режимы V_{oc} I_{sc} V_R) и получение матрицы экспериментальных данных для постэкспериментального построения двух- и трехмерных образцов этих элементов. Установка состояла из двух He–Ne-лазеров ($\lambda = 632.8$ и 1152 нм), оптического фокусирующего тракта, зеркальной отклоняющей системы и усиливающей электронной схемы, предназначенной для детектирования фазово-модулированного или постоянного

оптического сигнала. Фокусирующая и поляризационная оптика сжимала зондирующий луч вплоть до диаметра 50–80 мкм, сканируемая площадь с минимальным оптическим искажением имела размеры (30×30) мм. Красный и инфракрасный лазеры возбуждали объемы в солнечном элементе с различной глубиной и поэтому доставляли нам информацию как от приповерхностного слоя, так и от слоя вдали от гетерограницы CdS/CIS (CIGS). Поскольку кристаллиты и их грани ориентированы под различными углами в пленках, использованная определенная линейная поляризация падающего пучка создает более контрастную картину распределения микродефектов. Персональный компьютер управлял сканированием и сбором данных с помощью программы "Solscan", дальнейшая обработка и графическое моделирование было сделано с использованием MAC компьютера и программы MATLAB или PC с программами ORIGIN и EXCEL.

1. Результаты и обсуждение

Сеточная топограмма, полученная в красном свете для активной плоскости CIGS солнечного элемента, представлена на рис. 1. Скрытые микродефекты размером от 40 до 400 мкм, как оказалось, существуют на одной активной полосе в большем количестве, чем на другой. Таким образом, моделирующая топограмма показывает распределение, размер и форму фотоактивных дефектов на каждой приемной площадке, вносящей индивидуальный вклад в общий выходной сигнал солнечного элемента.

Трехмерное оптоэлектронное изображение поликристаллического тонкопленочного солнечного элемента дает возможность продемонстрировать совершенство и недостатки прибора более отчетливо. На рис. 2 показаны 3D оптоэлектронные образцы CIGS элемента соответственно в красном и инфракрасном свете. Ряд

[†] E-mail: gen@medv.ioffe.rssi.ru

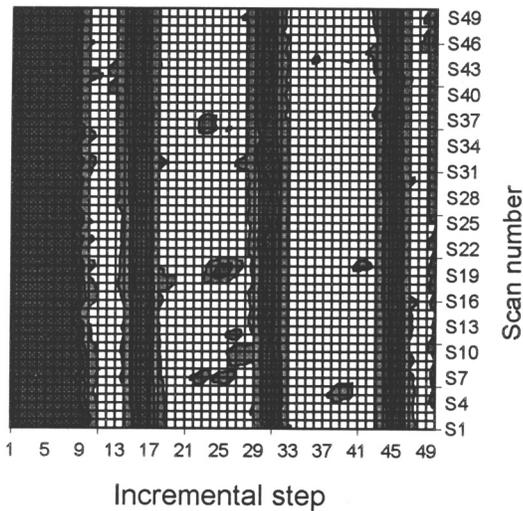


Рис. 1. Топограмма приемной плоскости солнечного элемента на CIGS в красном свете. Темные области соответствуют пониженному фотоответу, светлые области — максимальному фотоответу. Вертикальные полосы соответствуют токовому коллектору из Al сетки, темные пятна — дефекты.

дефектов размером от 10 до 100 мкм надежно детектируется сканирующим пучком красного лазера (см. рис. 2 (слева)). Эти фотоактивные дефекты распределены в верхнем слое пленки-поглотителя. В то же время луч инфракрасного лазера не видит эти дефекты, так как несет информацию об объемных свойствах пленки-поглотителя. В случае широкозонного полупроводника CIGS фотогенерация происходит не только в объеме пленки, но также на заднем Mo-контакте. Изученные CIGS солнечные элементы имеют плавное распределение инфракрасного фотоответа, что указывает на высокую объемную

однородность пленки-поглотителя. Отсутствие отрицательного сигнала по всей активной площади подтверждает, что на заднем контакте нет никакой генерации.

Два типа CIS солнечных элементов, обладающих $I-V$ -характеристиками с "красным" перегибом на прямой ветви и без него, выявляют различия в их оптоэлектронных образцах. На рис. 3 показаны более сильные флуктуации фотоответа по всей чувствительной площади солнечных элементов с перегибными $I-V$ -характеристиками. Структуры с химически осажденным CdS обладают эффектом перегибания из-за низкой концентрации свободных электронов и высокой концентрации ловушечных состояний в слое CdS [3,4], и поэтому концентрация свободных электронов в CdS должна чувствовать модуляцию тока вследствие фотогенерации. Таким образом, влияние концентрации легирующего уровня в буферном слое CdS проявляется как на $I-V$ -кривых, так и при лазерном сканировании.

Продольные неоднородности в CIS и CIGS солнечных элементах были также найдены при использовании красного и (или) инфракрасного лазерного возбуждения [5]. Такие неоднородности характерны для объема пленки-поглотителя, они проявляются в миллиметровом и сантиметровом масштабе и оказываются вытянутыми вдоль сеточных полосок.

Наличие электронных ловушек или метастабильных состояний в слоях CdS и соединениях с упорядоченными вакансиями, через которые интенсивно идет рекомбинация, обычно вызывает уменьшение общего фототока. Управляя балансом между процессами генерации и рекомбинации путем изменения фотогенерации неравновесных носителей заряда, можно насытить или освободить рекомбинационные каналы и, следовательно, выявить области с повышенной концентрацией рекомбинационных центров. Мы использовали эту особенность, чтобы обнаружить локальные неоднородности в сол-

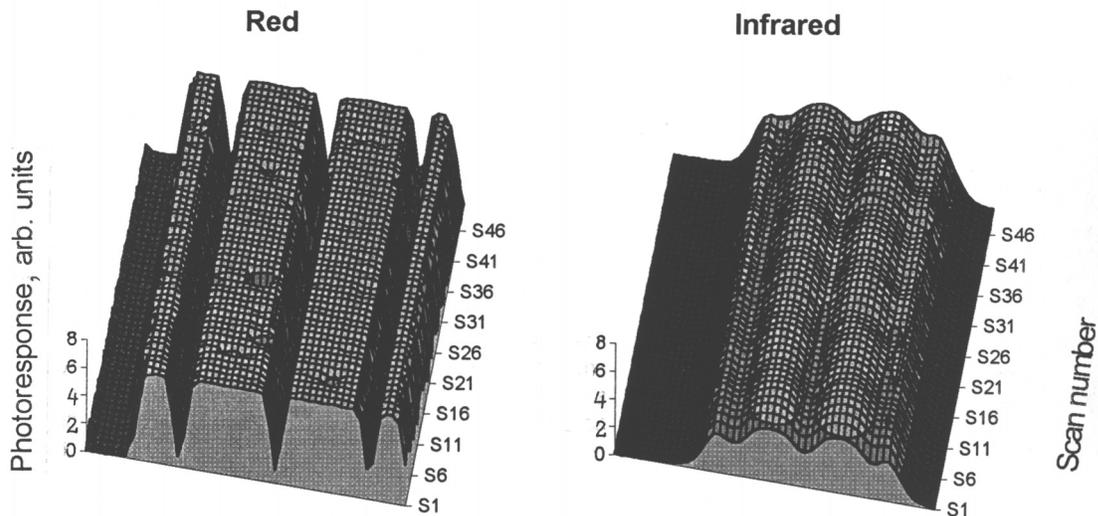


Рис. 2. 3D оптоэлектронные образцы CIGS солнечного элемента в красном и инфракрасном свете.

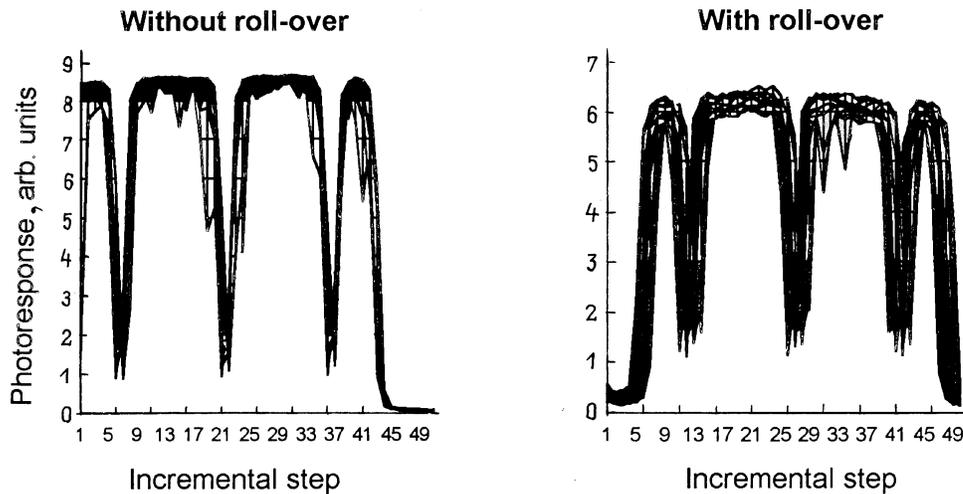


Рис. 3. Поперечное мультисканирование CIS солнечного элемента с "хорошей" и "перекрученной" $I-V$ -характеристиками.

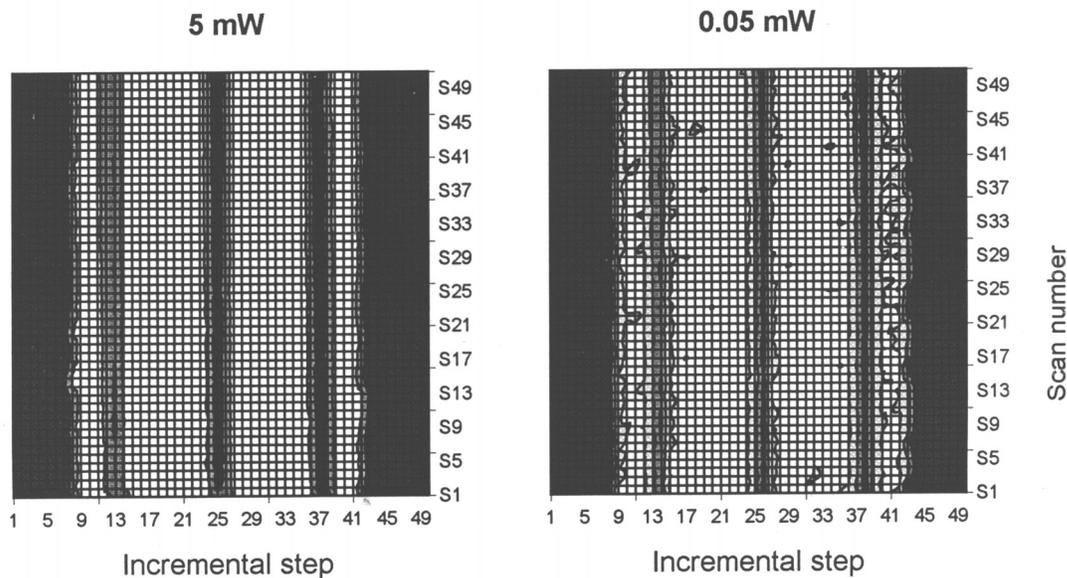


Рис. 4. Топограмма фотоактивных микродефектов в CIS солнечных элементах в красном свете. Рекомбинационные каналы насыщены при высоком уровне освещения (слева) и не насыщены при низком уровне освещения (справа).

нечных элементах CIS и SIGS. Эксперименты с фазово-модулированным сигналом позволяют использовать широкий диапазон мощности монохроматического света, эквивалентного мощности солнечного света (0.5–600 солнц), для выявления локальных неоднородностей с помощью контрастной картины. На рис. 4 показана сеточная топограмма в красном свете: области с повышенной скоростью рекомбинации видны при низком уровне освещения и пропадают, когда световая мощность возрастает, а рекомбинационные каналы насыщаются. Такие дефекты определяют снижение фотоответа в определенных спектральных диапазонах, соответствующих энергии залегания уровней. Как сообщалось ранее [6–8],

сравнение оптоэлектронного образца (после лазерного сканирования) и наблюдаемой в оптический микроскоп обычной картины поверхности не дает удовлетворительного согласия при сопоставлении распределения неоднородностей, таких как проколы (или подобные "механические" микродефекты) в солнечном элементе. Мы подтверждаем это положение нашими собственными микрофотографиями, сделанными с помощью оптического микроскопа. Поэтому наблюдаемые с помощью тока, индуцированного лазерным лучом, микродефекты могут быть связаны с областями пониженного напряжения холостого хода вследствие повышенной концентрации рекомбинационных центров.

Заключение

Фотоактивные микродефекты размером от 10 до 100 мкм, так же как протяженные неоднородности в миллиметровом и сантиметровом масштабе, были выявлены и разделены по силе и размеру с помощью двумерных и трехмерных оптоэлектронных образов, полученных методом красного и инфракрасного лазерного сканирования тонкопленочных солнечных элементов.

Список литературы

- [1] L. Stolt. *Proc. 9th Int. Photovoltaic Science and Engineering Conf.* (Miyazaki, Japan, 1996) v. 9, p.135.
- [2] J. Hedström, H. Ohlsén, M. Bodegård, A. Kylner, L. Stolt, D. Hariskos, M. Ruckh, H.W. Schock. *Proc. 23rd IEEE Photovoltaic Spec. Conf.* (Louisville, 1993) p. 364.
- [3] J. Hou, S.J. Fonash, J. Kessler. *Proc. 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (Washington D.C., 1996).
- [4] A. Kylner, J. Lindgren, L. Stolt. *J. Electrochem. Soc.*, **143**, 2662 (1996).
- [5] G.A. Medvedkin, J. Wennerberg. *Proc. Int. Conf. POLYSE'98* (Schwabisch Gmund, Germany, 1998) O4.
- [6] I.L. Eisgruber, J.R. Sites. *Progress in Photovolt., Res. Appl.* (UK) **4**, N 1, 63 (1996).
- [7] I.L. Eisgruber, R.J. Matson, J.R. Sites, K.A. Emery. *Proc. 1st World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion* (Hawaii, USA, 1994) v. 1, p. 283.
- [8] R.J. Matson, K.A. Emery, I.L. Eisgruber, L.L. Kazmerski. *Proc. 12th Europ. Photovoltaic Solar Conf.* (Bedford, UK, 1994) p. 1222.

Редактор В.В. Чалдышев

Laser scanning obtained optoelectronic images of polycrystalline thin-film solar cells based on CuInSe_2 and CuInGaSe_2

G.A. Medvedkin

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St.Petersburg, Russia