

Токовая неустойчивость в солнечных элементах на основе α -Si:H, возникающая после их засветки

© Э.Н. Воронков[†]

Московский энергетический институт,
111250 Москва, Россия

(Получена 9 ноября 2000 г. Принята к печати 15 ноября 2000 г.)

Показано, что засветка солнечных элементов аморфного кремния приводит к изменениям темнового тока. Характер релаксации тока после выключения освещения зависит от интенсивности и времени засветки. При определенных временах световой экспозиции возникает токовая неустойчивость в виде хаотических осцилляций, нарастающих со временем и затем резко исчезающих.

Наблюдаемый эффект объясняется тем, что при интенсивном освещении в пленке α -Si:H происходит изменение равновесия между различными типами дефектов и начинают доминировать дефекты, блокирующие существующие каналы утечки тока через барьер. В темноте происходит изменение установившегося на свету равновесия, и блокирующие дефекты со временем исчезают. В моменты, когда их концентрация приближается к значениям, определяющим порог протекания по каналам, возникают хаотические колебания, амплитуда которых нарастает вблизи порогового значения. После частичного или полного восстановления каналов осцилляции исчезают. Хаотический характер осцилляций объясняется случайным характером процессов изменения числа и конфигурации канала.

При изучении солнечных элементов на основе α -Si:H был обнаружен эффект, проявляющийся в том, что после выключения освещения наблюдается изменение темнового тока относительно значения, существовавшего до освещения. Со временем значение темнового тока стремится к некоторой постоянной величине. Время и характер релаксации тока к стационарному значению зависят от интенсивности и времени освещения. Особенность наблюдаемого эффекта заключалась в том, что при определенной световой экспозиции возникала токовая неустойчивость в виде хаотических осцилляций, нарастающих со временем и затем резко исчезающих.

Цель данной работы заключалась в объяснении наблюдаемого эффекта.

В качестве образцов использовались солнечные элементы на металлической фольге, изготовленные по технологии фирмы ECD (Troy USA), площадь образцов составляла 3 см². Световые и темновые характеристики типичны для элементов этого типа [1], КПД, измеренный с имитатором солнечного излучения в условиях AM1, составлял 8%. При измерениях в качестве источника света использовалась лампа накаливания с кварцевой колбой. Освещение осуществлялось через водяной фильтр. Освещенность образца при экспозиции составляла 5000 люкс. При первоначальной засветке использовались солнечные элементы, не подвергавшиеся интенсивному освещению.

При измерениях ток с образца (I) поступал на вход операционного усилителя, затем на аналогово-цифровой преобразователь и на компьютер. Результаты измерений в течение 300 с накапливались в виде массива экспериментальных точек (6000 точек). Затем массив записывался в файл, и данные вновь накапливались в течение следующего временного интервала. Время записи в файл, отделяющее последовательные серии точек, не превыша-

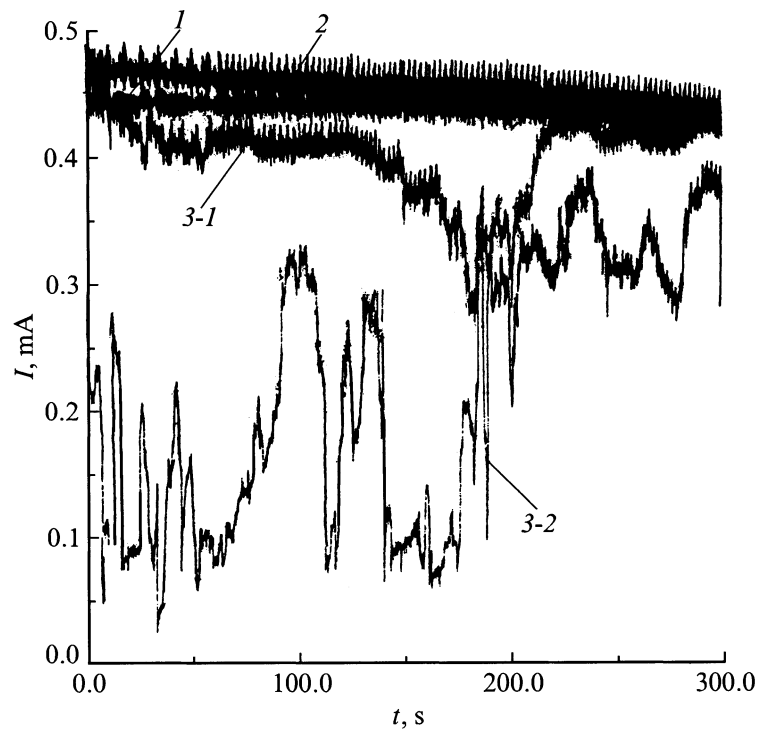
ло 5 с. Измерения переходного процесса прекращались после того, как значения тока устанавливались вблизи величины, имевшей место до экспозиции.

На рисунке приведены результаты измерений, демонстрирующие эффект. Все измерения выполнены в темноте при прямом смещении на образце 0.5 В. Кривая 1 представляет изменение тока I со временем t для случая, когда образец не подвергался засветке. Как видно, на протяжении всего периода измерений среднее значение тока остается постоянным (обозначим его I_0). Ток имеет небольшую шумовую составляющую.

Кривая 2 соответствует случаю, когда образец подвергался засветке в течение 2 мин. Засветка приводит к незначительному увеличению тока, при этом значительного увеличения уровня и изменения характера шума не происходит. Со временем ток плавно приближается к исходному значению.

Кривые 3-1 и 3-2 соответствуют случаю, когда образец подвергался засветке в течение 10 мин. Эти кривые построены на основе двух последовательных выборок: массива точек, полученного в течение первых 300 с, и массива точек, полученного в течение последующих 300 с (разрыв по времени между двумя массивами не превышает 5 с). Сравнение кривой 2 с кривыми 3-1 и 3-2 показывает, что, несмотря на незначительное, казалось бы, увеличение экспозиции, характер релаксации тока к стационарному значению изменился существенно. После выключения засветки на начальном участке примерно в течение первых 10 с ток изменяется так же, как и после засветки в течение 1 мин. Затем он уменьшается, причем скорость спада значительно выше, чем для кривой 2. После того, как значение тока становится меньше I_0 , появляется хаотически осциллирующая составляющая, причем амплитуда осцилляций нарастает со временем. Примерно через 200 с после выключения освещения наблюдается резкий бросок тока,

[†] E-mail: edward@b14s1nt.mpei.ac.ru



Влияние световой экспозиции на изменения тока через $p-i-n$ -структуру солнечного элемента на основе $a-Si:H$: 1 — до экспозиции; 2 — экспозиция 2 мин; (3-1) — экспозиция 10 мин, первая серия экспериментальных точек; (3-2) — экспозиция 10 мин, вторая серия экспериментальных точек.

его значение приближается к I_0 , и после нескольких осцилляций малой амплитуды ток перестает изменяться, установившись на уровне, существовавшем до засветки.

При больших временах засветки осциллирующая составляющая исчезала, при этом стационарное значение тока имело пониженное значение.

Отметим некоторые экспериментальные факты.

1) Наблюдаемые в экспериментах времена релаксации слишком велики для электронных процессов в объеме и близки к значениям, характеризующим дефектообразование в $a-Si:H$ [2].

2) Малые времена световой экспозиции на образце, не подвергавшемся ранее засветке (рис. 1, кривая 2), приводят к некоторому увеличению прямого тока через солнечный элемент.

3) Увеличение времени экспозиции сверх некоторого значения t_1 приводит к появлению на кривой релаксации тока (рисунок, кривые 3-1 и 3-2) хаотических осцилляций, при этом непосредственный переход к значению тока I_0 может происходить скачком.

4) При увеличении времени экспозиции сверх некоторого значения t_2 ($t_2 > t_1$) общее время участка с осцилляциями уменьшается, они становятся разрывными (шум типа телеграфного сигнала), и при больших временах экспозиции исчезают совсем. При этом значение тока становится меньше I_0 и стремится к некоторому постоянному значению с очень большой постоянной времени (сотни минут).

5) Значения t_1 и t_2 не являются фиксированными и имеют случайный разброс не только для разных образцов, но и для разных измерений.

6) Области неустойчивости тока может предшествовать гладкий участок как с повышенными, так и пониженными относительно I_0 значениями.

Влияние световой экспозиции на характер релаксации темнового тока наблюдалось и ранее в поликристаллических солнечных элементах [3] и было объяснено взаимодействием возбужденных светом носителей заряда с дефектами на межкристаллитных границах. Кривая релаксации темнового тока описывалась несколькими экспонентами с постоянными, характеризующими времена существования различных фотовозбужденных дефектов. Кривые были монотонными и хорошо воспроизводились от эксперимента к эксперименту, однако могли и различаться для различных образцов. Особенность солнечных элементов на основе $a-Si:H$ состоит в том, что наряду с медленным монотонным изменением тока в релаксационном процессе возникает сравнительно быстро хаотически осциллирующая составляющая. Считаем, что в нашем случае, как и в случае, рассмотренном в [3], релаксация обратного тока определяется изменением при засветке равновесия между дефектами различного типа.

Объясним возникновение крупномасштабных хаотических осцилляций, которые не наблюдались в [3]. Одна из особенностей солнечных элементов большой площади из аморфного кремния заключается в том, что они имеют

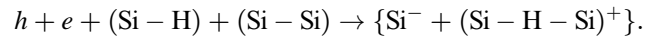
значительную шунтирующую барьер проводимость по каналам с повышенным темпом рекомбинации, которые и контролируют темновой ток. Засветка приводит к уменьшению тока и, следовательно, к уменьшению числа шунтирующих каналов. Каналы образованы некоторыми перекрывающимися i -слоем кластерами дефектов, обладающими большим сечением захвата как электронов, так и дырок, т.е. выступающими как эффективные центры рекомбинации. При засветке происходит интенсивная генерация электронно-дырочных пар, стимулирующих реакции между дефектами и сдвигающими равновесие таким образом, что число эффективных центров рекомбинации уменьшается, соответственно уменьшается число каналов и ток утечки. После выключения освещения происходят процессы в направлении восстановления первоначального равновесия, при этом концентрация эффективных центров рекомбинации возрастает, возникают условия для их кластеризации и образования каналов. Включение канала происходит скачком, когда концентрация центров рекомбинации в кластере увеличивается до некоторого критического значения [4]. Поскольку шунтирующие барьер кластеры имеют разную концентрацию и разную плотность дефектов, время их включения имеет значительный разброс относительно некоторого характеристического времени, которому соответствует определенная критическая концентрация рекомбинационных дефектов.

При временах засветки, больших некоторого критического значения t_2 , основная часть каналов заблокирована, появление и исчезновение относительно небольшого их числа не будет оказывать заметного влияния на ток. При временах засветки, меньших t_2 , число дефектов, блокирующих имеющиеся каналы, мало, и условия для исчезновения сквозного кластера не соблюдаются (концентрация дефектов меньше критической, необходимой для блокировки каналов). Приближение концентрации создающих канал дефектов к критической уменьшает вероятность появления сквозного тока, причем именно вблизи критической концентрации и соответствующего ей момента времени увеличивается дисперсия вероятности исчезновения и возникновения каналов, поэтому амплитуда колебаний тока становится максимальной [4,5].

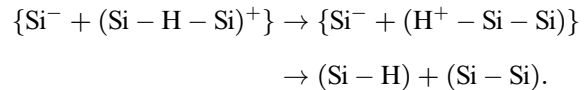
В $a\text{-Si:H}$ спектр метастабильных дефектов весьма широк [2], изучение кинетики их образования далеко от завершения, и тем не менее установлено, что основными типами метастабильных дефектов в $a\text{-Si:H}$ являются оборванные связи кремния (DB), значительная часть которых пассивирована водородом (DBH). Кроме того, существуют дефекты, являющиеся сближенными парами переменной валентности (IVAP), образующимися при захвате электрона и дырки оборванными связями и являющимися эффективными центрами рекомбинации.

Генерация светом электронов и дырок и последующий захват их дефектами приводит к нарушению равновесия, при этом основную роль в преобразовании DB в DBH и IVAP играют атомы возникающего при засветке метастабильного водорода (MH) [6]. Наиболее вероятно, что

за возникновение каналов ответственны IVAP-центры. В пользу этого говорит их структура, способствующая кластерообразованию, отсутствие барьера для их образования [2] и то, что они являются эффективными центрами рекомбинации. Генерация этих дефектов может происходить по следующей схеме:



При распаде на промежуточном этапе активную роль играет MH, что снижает энергию реакции:



Концентрация метастабильного водорода зависит от качества материала, интенсивности и времени освещения. Согласно [5], для материала "приборного" качества при интенсивностях засветки, близких к нашим, должно пройти примерно 100 с, для того чтобы концентрация MH достигла значений, способных оказывать влияние на дефектообразование (время t_1). В течение времени $t < t_1$ в $a\text{-Si:H}$ под действием света возможно формирование новых дефектов (DB, DBH, IVAP), однако их распад с участием MH маловероятен, поскольку возрастающая со временем концентрация MH мала на начальном этапе. Поэтому при небольших экспозициях может наблюдаться возрастание шунтирующего действия каналов за счет увеличения под действием света DB и генерируемых ими IVAP (рисунок, кривая 2). При увеличении времени экспозиции возрастает концентрация MH и одновременно с генерацией дефектов происходит их распад. При этом соотношение между водородсодержащими дефектами сдвигается в сторону увеличения концентрации DBH и уменьшения концентрации IVAP. Соответственно количество каналов уменьшается и ток утечки падает. После выключения освещения благодаря оставшемуся в образце метастабильному водороду происходит восстановление существовавшего до освещения равновесия. При этом скорость восстановления равновесия пропорциональна концентрации MH. Если в i -области солнечного элемента метастабильный водород отсутствует или его концентрация мала, то после выключения освещения каналы не восстанавливаются (или восстанавливаются медленно).

В пользу рассмотренного механизма говорят и расчеты, выполненные в [5], согласно которым времена засветки, при которых MH начинает играть заметную роль в дефектообразовании, примерно соответствуют временам, наблюдаемым в эксперименте. В [5] показано, что эти времена весьма чувствительны к начальной концентрации дефектов. Таким образом, рассмотренный в работе эффект может быть использован как для исследования кинетики образования и исчезновения фотоиндуцированных дефектов в $a\text{-Si:H}$, так и для оценки качества материала i -области солнечных элементов на основе $a\text{-Si:H}$ и прогнозирования их возможной деградации.

Список литературы

- [1] А. Фаренбрех, Р. Бьюб. *Солнечные элементы. Теория и эксперимент* (М., Энергоатомиздат, 1987) [A.L. Fahrenbruch, R.H. Bube. *Fundamentals of solar cells. Photovoltaic solar energy conversion* (N.Y., 1983)].
- [2] Н. Yang, G. Lukovsky. *J. Appl. Phys.*, **37**, 1082 (1998).
- [3] Э.Н. Воронков, А.Е. Шаронов, В.В. Колобаев. *ФТП*, **33**, 481 (1999).
- [4] Б.И. Шкловский, А.Л. Эфрос. *Электронные свойства легированных полупроводников* (М., Наука, 1979).
- [5] В.Г. Голубев, В.Ю. Давыдов, А.В. Медведев, А.Б. Певцов. *ФТТ*, **39** (8), 1335 (1997).
- [6] К. Morigaki, Н. Hikita. *Sol. St. Commun.*, **114**, 69 (2000).

Редактор Л.В. Шаронова

A current instability in α -Si:H solar cells occurring as a result of the light exposure

E.N. Voronkov

Moscow Power Engineering Institute,
111250 Moscow, Russia