

Оценка эффективности преобразования тонкопленочных однопереходных $a\text{-Si:H}$ и тандема $\mu\text{-Si:H} + a\text{-Si:H}$ солнечных элементов из анализа экспериментальных темновых и нагрузочных $I-V$ -характеристик

© А.А. Андреев, В.М. Андреев, В.С. Калиновский[¶], П.В. Покровский, Е.И. Теруков

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

(Получена 28 декабря 2011 г. Принята к печати 11 января 2012 г.)

Целью работы являлось применение к такому нестандартному полупроводниковому материалу, как аморфный кремний, метода определения эффективности, (кпд) наногетероструктурных многопереходных $A^{III}B^V$ солнечных элементов из анализа темновых вольт-амперных характеристик. Исследовались $a\text{-Si:H}$ и $a\text{-Si:H}/\mu\text{-Si:H}$ структуры, без светорассеивающего подслоя и антиотражающего покрытия. Измерения темновых вольт-амперных характеристик показали, что зависимость тока от напряжения содержит несколько экспоненциальных участков. Расчеты эффективности преобразования оптического излучения СЭ были выполнены для каждого участка темновой вольт-амперной характеристики. Это позволило получить зависимость потенциальной эффективности солнечного элемента от плотности тока генерации или потока фотонов. Наблюдаемое соответствие данных из экспериментальных характеристик и расчетов можно считать удовлетворительным и приемлемым, а методика измерения и анализа темновых вольт-амперных характеристик, предложенная и апробированная для СЭ на основе кристаллических соединений $A^{III}B^V$, приобретает универсальный характер. Проведенный анализ характеристик $p-i-n$ -структур из аморфного кремния и основанный на этом расчет потенциальных эффективностей расширяют наше понимание этого класса приборов, позволяют улучшить технологию и эффективность фотопреобразования таких СЭ.

1. Введение

Несмотря на большой объем проведенных ранее исследований солнечных элементов (СЭ) на аморфном кремнии, их темновые вольт-амперные характеристики (ВАХ) изучены недостаточно. Имеются отдельные публикации [1,2], в которых приводится общий вид ВАХ какого-либо конкретного элемента и их простейшее описание, однако систематического характера такие исследования не носят. Также нет попыток связать особенности темновых ВАХ структур на основе аморфного полупроводника с эффективностью (кпд) СЭ на основе этих структур. В настоящей работе ставятся три задачи. Первая — измерения прямых темновых ВАХ для серии однопереходных элементов на аморфном кремнии $a\text{-Si:H}$ и тандеме $\mu\text{-Si:H} + a\text{-Si:H}$. Вторая — анализ прямых темновых ВАХ, определение доминирующих механизмов токопрохождения. Третья — на основе полученных данных оценить максимально достижимую (потенциальную) эффективность фотопреобразования элементов по параметрам: предэкспоненциальному множителю J_{0i} и диодному коэффициенту A , фактору качества $p-n$ -перехода, найденным из экспериментальных прямых темновых ВАХ. Для этой цели используется методика расчета на базе уравнений, связывающих эффективность η и ток фотогенерации J_g с параметрами A и J_{0i} темновых ВАХ, впервые предложенная для фотопреобразователей на основе материалов $A^{III}B^V$ в работах [3,4]. Результаты этих расчетов сравниваются с

эффективностями, определенными из измерений световых ВАХ СЭ на основе аморфного кремния $a\text{-Si:H}$ и тандема $a\text{-Si:H} + \mu\text{-Si:H}$.

2. Технология приготовления образцов

Исследованные $p-i-n$ -структуры на аморфном кремнии получались путем последовательного осаждения на стеклянные и кварцевые подложки с предварительно нанесенным токопроводящим контактным слоем оксида индия—олова (ИТО) трех слоев: легированного бором в p -тип, собственного i -слоя и слоя n -типа, легированного фосфором. Далее наносился контактный слой алюминия. Нанесение кремниевых слоев осуществлялось в плазме тлеющего разряда силана (SiH_4), разбавленного водородом до 6%. Для легирования в p - и n -тип в силан добавлялись газы: диборан B_2H_6 и фосфин PH_3 соответственно. Температура подложки равнялась 300°C . Весь процесс контролировался *in situ* методом оптической интерферометрии, что позволило определять как толщину слоев, так и в определенной степени контролировать их качество по оценке относительной величины показателя преломления осаждаемой пленки. Толщина p -слоя составляла не более 10 нм, i -слоя 450 нм. Процесс получения $p-i-n$ структур на аморфном кремнии многократно и детально описан в литературе, и поэтому здесь мы ограничиваемся самым кратким описанием. Структура на основе $\mu\text{-Si:H}$ отличалась прежде всего технологией получения i -слоя. В этом случае увеличивалась в 2 и более раз мощность плазменного разряда,

[¶] E-mail: vitak.sopt@mail.ioffe.ru

и силан подвергался разбавлению водородом от 7–8 до 20 ат% в наивысшем пределе. Разбавление водородом и увеличение мощности плазменного разряда переводило режим роста пленки в режим „рост–травление“, что способствовало формированию нанокристаллов кремния размером 10–30 нм, внедренных в аморфную матрицу. Микроструктура такого материала контролировалась методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения. Для облегчения процесса получения требуемой микроструктуры и управления им применялось магнитное поле, набранное из составленных в плоскости малых (0.5×0.5 см) постоянных магнитов переменного знака и расположенных вне зоны разряда за анодным электродом. Полученный в условиях сильного разбавления водородом микрокристаллический кремний μc -Si:H имеет ширину зоны на 0.2–0.3 эВ больше, чем у α -Si:H [5,6]. Это обстоятельство открывает перспективу создания двойной структуры — тандема, образованного двумя последовательно сформированными p - i - n -структурами на основе μc -Si:H+ на α -Si:H, связанными электрически посредством сильно легированного n^{++} - p^{++} -туннельного перехода, выполняющего роль внутреннего омического контакта. При этом μc -слой, будучи более широкозонным материалом, позволяет надеяться на расширение области спектральной чувствительности тандемного элемента и соответственно на увеличение фотоэда и эффективности. Однако весь выигрыш в эффективности может быть потерян, если омическое сопротивление соединительного n^{++} - p^{++} -туннельного контакта будет велико. В основном потери будут иметь место в фототоке и факторе формы (*fill*-факторе).

В работе изучались темновые и световые ВАХ нескольких элементов на α -Si:H и тандеме μc -Si:H + α -Si:H. Еще раз подчеркнем, что в работе не преследовались цели получения элементов с максимальной эффективностью. В среднем значения эффективности исследуемых элементов α -Si:H находились в диапазоне 4–6%.

3. Экспериментальные результаты

Темновые ВАХ измерялись прямым контактным методом на установке с автоматической записью результатов. Внешнее смещение варьировалось от 0 до 3 В, что позволяло в случае отсутствия пробоя изучить особенности ВАХ в области третьего участка темновой ВАХ, или, другими словами, в области „суперинжекции“, т.е. при условии, когда диффузионный перенос уже исчерпан и ток контролируется другими процессами. При экспоненциальной аппроксимации этого участка диодный фактор всегда был больше двух ($A > 2$), и аппроксимация этого участка в целом последовательным омическим сопротивлением R_s не является корректной в широком диапазоне внешних смещений, однако на начальном участке перехода от „рекомбинационно-диффузионного“ процесса к „суперинжекции“ (в пределах до 1.5 В)

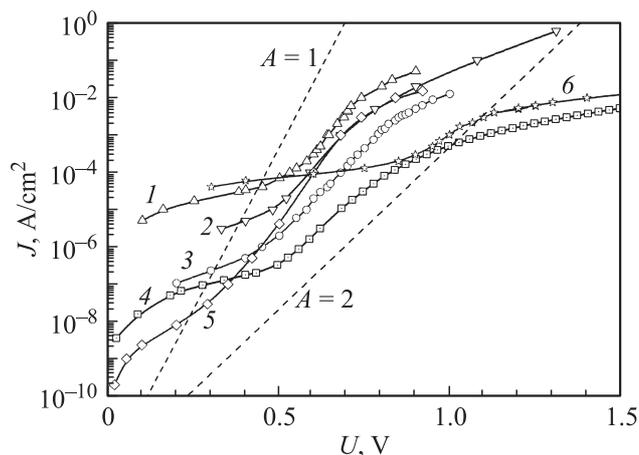


Рис. 1. Экспериментальные прямые темновые вольт-амперные характеристики СЭ α -Si:H (кривые 1–5) и тандема μc -Si:H + α -Si:H (кривая 6), измеренные при комнатной температуре.

представляется вполне допустимой. Для основной группы исследованных p - i - n - α -Si:H структур напряжение прямого смещения выбиралось в пределах 0–1.5 В.

Световые (нагрузочные) ВАХ измерялись на имитаторе солнечного излучения, работающем в „режиме постоянного тока“. Спектр лампы накаливания типа КГМ корректировался светофильтрами. Эта система удобна в работе и позволяет проводить измерения в выделенных спектральных областях, однако достигаемая в ней плотность потока фотонов ниже стандартного значения AM1.5, и результаты требуют корректирующего коэффициента. Этот коэффициент определялся путем сравнения данных, полученных на имитаторе, с данными на открытом солнце в зените в июне–июле, ~ 1000 Вт/м².

Экспериментальные прямые темновые ВАХ исследованных α -Si:H образцов: № 187 — кривая 2 на рис. 1, № 191 — кривая 4 на рис. 1 и кривая 3 на рис. 2, № 247 — кривые 1 на рис. 1 и 2, № 2916 — кривая 3 на рис. 1, № 5320 — кривая 5 на рис. 1; а также тандемная структура № 250 — кривые 6 и 5, приведенные на рис. 1 и 2 соответственно. Для ориентировочной оценки на рис. 1 пунктиром даны расчетные экспоненты с диодными коэффициентами $A = 2$ и 1. Видно, что темновые ВАХ всех представленных образцов состоят, как минимум, из 3 четко выраженных участков-сегментов. В пределах каждого выделенного сегмента ВАХ экспериментальные зависимости представляют собой экспоненциальные J - V -характеристики вида $J_0 \exp(eV/AkT)$ со значениями диодного коэффициента A (фактора качества диода), меняющимися в широких пределах. В основном в исследованных темновых ВАХ α -Si:H СЭ в диапазоне напряжений смещения от 0.55 до 0.75 В, присутствует некий „срединный“ участок, для которого характерно значение диодного коэффициента $A = 2$ –1, что свидетельствует о смешанном рекомбинационном

(Саа–Нойс–Шокли) и диффузионном (Шокли) [7,8] механизмах переносе тока в ОПЗ исследованных $p-i-n$ -переходов. На рис. 2 представлен детальный фитинг экспериментальных ВАХ двух наиболее характерных образцов СЭ $a\text{-Si} : \text{H}$ и тандема $\mu\text{c-Si} : \text{H} + a\text{-Si} : \text{H}$. Видно, что для образца СЭ $a\text{-Si} : \text{H}$ № 191, представленного кривой 3, на „срединном“ участке рекомбинационный механизм протекания тока $A = 2$ является определяющим, а в случае образца № 247, представленного кривой 1, наблюдается с ростом прямого напряжения смещения плавный переход от рекомбинационного механизма переноса тока к чисто диффузионному с $A = 1$. Экспериментальная темновая ВАХ прямой ветви тандема $\mu\text{c-Si} : \text{H} + a\text{-Si} : \text{H}$ (образец № 250, кривая 6 на рис. 1 и кривая 3 на рис. 2) имеет следующие особенности: „срединный“ участок переместился по шкале напряжений в область более высоких напряжений, примерно на величину относительного сдвига напряжения холостого хода тандема V_{OC} до 1.4 В, а величина диодного коэффициента равна удвоенному значению коэффициента „рекомбинационного“ участка однопереходного $a\text{-Si} : \text{H}$ элемента, т.е. $A = 4$ (рис. 2). Исходя из модели, предложенной в работах [3,4], это соответствует тому, что диодный коэффициент многопереходного СЭ есть арифме-

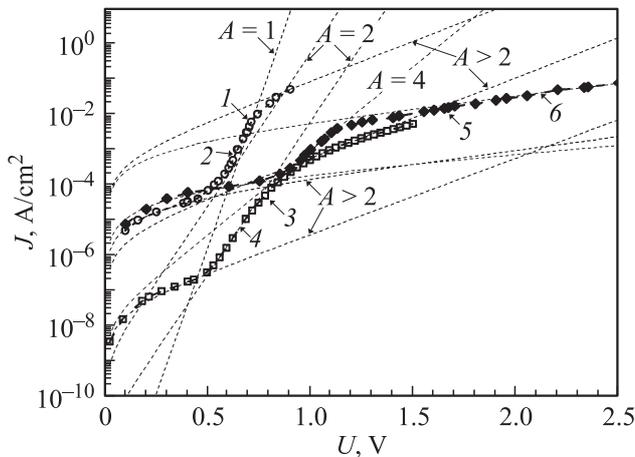


Рис. 2. Экспериментальные прямые темновые вольт-амперные характеристики двух СЭ (образцы № 191 и 247) на основе $a\text{-Si} : \text{H}$ и тандема $\mu\text{c-Si} : \text{H} + a\text{-Si} : \text{H}$ (образец № 250): кривые 1, 3 и 5 — эксперимент, комнатная температура; кривые 2, 4 и 6 — расчет (фитинг). Кривая 1 — содержит 4 экспоненциальных участка: „туннельно-ловушечный“ с $A > 2$, $J_{0(A>2)} = 3.0 \cdot 10^{-5} \text{ A/cm}^2$; „рекомбинационный“ с $A = 2$, $J_{0(A=2)} = 1.2 \cdot 10^{-9} \text{ A/cm}^2$; „диффузионный“ с $A = 1$, $J_{0(A=1)} = 7.6 \cdot 10^{-15} \text{ A/cm}^2$ и „суперинжекции“ с $A > 2$, $J_{0(A>2)} = 4.5 \cdot 10^{-4} \text{ A/cm}^2$. Кривая 4 содержит 3 экспоненциальных участка: „туннельно-ловушечный“ с $A > 2$, $J_{0(A>2)} = 2.7 \cdot 10^{-8} \text{ A/cm}^2$; „рекомбинационный“ с $A = 2$, $J_{0(A=2)} = 1.3 \cdot 10^{-11} \text{ A/cm}^2$ и „суперинжекции“ с $A > 2$, $J_{0(A>2)} = 3.0 \cdot 10^{-6} \text{ A/cm}^2$. Кривая 5 содержит 3 экспоненциальных участка: туннельно-ловушечный с $A > 2$, $J_{0(A>2)} = 2.7 \cdot 10^{-8} \text{ A/cm}^2$; „рекомбинационный“ с $A = 4$, $J_{0(A=4)} = 1.3 \cdot 10^{-11} \text{ A/cm}^2$ и „суперинжекции“ $A > 2$, $J_{0(A>2)} = 3.0 \cdot 10^{-6} \text{ A/cm}^2$.

тическая сумма коэффициентов ($A = A_1 + A_2 + \dots + A_n$), а предэкспоненциальный множитель (J_0) есть среднегеометрическое $J_0 = \sqrt[n]{J_{01} \cdot J_{02} \cdot \dots \cdot J_{0n}}$, предэкспоненциальных множителей всех составляющих его фотоактивных переходов. Таким образом, в нашем случае в „срединном“ участке тандема $\mu\text{c-Si} : \text{H} + a\text{-Si} : \text{H}$ мы имеем доминирующий „рекомбинационный“ механизм протекания токов в ОПЗ из составляющих его фотоактивных $p-i-n$ -диодов, $A = 4$ и $J_0 = 1.6 \cdot 10^{-8} \text{ A/cm}^2$. Исходя из значений $J_{0r} = 1 \cdot 10^{-8} - 2 \cdot 10^{-11} \text{ A/cm}^2$, полученных из фитинга экспериментальных темновых ВАХ $a\text{-Si} : \text{H}$ СЭ, можем оценить предэкспоненциальный множитель для $\mu\text{c-Si} : \text{H}$ фотоактивного перехода, входящего в исследованный тандем $\mu\text{c-Si} : \text{H} + a\text{-Si} : \text{H}$, т.е. $J_{0\mu\text{c}} \approx 1 \cdot 10^{-5} - 2.5 \cdot 10^{-7} \text{ A/cm}^2$.

Из сопоставления ВАХ для всей совокупности образцов следует, что все кривые имеют качественно одинаковый характер и различаются лишь конкретными параметрами участков-сегментов: A и J_0 . Общий вид кривых в целом соответствует „классической“ ВАХ для $p-n$ -перехода [9]. ВАХ содержит три четко выраженных участка. Начальный — „туннельно-ловушечный“, имеющий место при малых напряжениях до 0.3–0.4 В, характеризуется показателем экспоненты $\exp(eV/kT)$, диодным коэффициентом $A > 2$ и предэкспоненциальным множителем J_{0i} в диапазоне $5 \cdot 10^{-5} - 1.6 \cdot 10^{-9} \text{ A/cm}^2$. Основной — „срединный“, в диапазоне напряжений 0.45–0.85 В имеет значение A в пределах 2.0–1.0, J_{0r} в диапазоне $5 \cdot 10^{-9} - 1.6 \cdot 10^{-11} \text{ A/cm}^2$. Третий участок, наблюдаемый при напряжениях смещения больше 0.8 В, показывает $A > 2$, J_{0i} в диапазоне $5 \cdot 10^{-4} - 2.6 \cdot 10^{-6} \text{ A/cm}^2$. „Срединный“ участок в самом общем случае в соответствии со значением диодного коэффициента $A \approx 2-1$ интерпретируется как результат „рекомбинационного“ процесса, дополненного „диффузионным“ вкладом. Для некоторых образцов, № 5320, 187, 247, этот участок может быть уверенно подразделен на два: в нижнем диапазоне смещений наблюдается четко выраженная „рекомбинационная“ компонента, тогда как с ростом напряжения смещения имеет место переход к чисто „диффузионному“ механизму (Шокли) с диодным коэффициентом $A = 1$. Третий участок ($U_c > 0.8 \text{ В}$ и $A > 2$) в некоторых работах [10] принято определять как область „суперинжекции“, и мы примем эту терминологию. Увеличение параметра $A > 2$ может быть обусловлено различными механизмами. Среди них — ограничение тока не скомпенсированным в области $p-n$ -перехода пространственным зарядом впрыснутых электронов и дырок [10], эмиссионно-туннельными процессами в контактных областях [11] и при еще более высоких напряжениях, создающих напряженность поля $E \approx 10^6 \text{ В/см}$ — „туннельно-полевые прыжковые“ явлениями типа многоступенчатого туннелирования (Фаулера–Нордгейма) [8]. Так как солнечный элемент на основе аморфных материалов работает при напряжениях около 1 В, детальная физическая сущность этих процессов не является принципиальной для вычислений эффек-

Таблица 1.

Структура	Механизм токопрохождения								R_s , (Ом/ exp)
	туннельно-ловушечный			рекомбинационный			эмиссионно-туннельный		
	J_{0r} , A/cm ²	A	U_1 , В	J_{0r} , A/cm ²	A	U_2 , В	J_{0i} , A/cm ²	A	Ом · см ²
α -Si : H образец № 191	$2.1 \cdot 10^{-8}$	> 2	0.45	$2 \cdot 10^{-11}$	2	0.83	$2.6 \cdot 10^{-6}$	> 2	7.5/0.1
α -Si : H образец № 246	$8 \cdot 10^{-7}$	> 2	0.5	$5.3 \cdot 10^{-11}$	2	0.85	$2 \cdot 10^{-5}$	> 2	1/0.1
α -Si : H образец № 2916	$4 \cdot 10^{-7}$	> 2	0.45	$1 \cdot 10^{-10}$	2	0.85	$8.6 \cdot 10^{-5}$	> 2	5/0.1
α -Si : H + μ -Si : H образец № 250	$9 \cdot 10^{-5}$	> 2	0.9	$1.6 \cdot 10^{-8}$	4	1.1	$3.2 \cdot 10^{-4}$	> 2	1/0.01

Таблица 2.

Образец	Механизм токопрохождения										R_s , (Ом/ exp)
	туннельно-ловушечный		U_1	рекомбинационный		диффузионный		U_2	эмиссионно-туннельный		
	J_{0r} , A/cm ²	A	В	J_{0r} , A/cm ²	A	J_{0d} , A/cm ²	A	В	J_{0i} , A/cm ²	A	Ом · см ²
α -Si : H, № 5320	$6 \cdot 10^{-9}$	> 2	0.3	$9.6 \cdot 10^{-11}$	2	$3.6 \cdot 10^{-15}$	1	0.8	$2.5 \cdot 10^{-3}$	> 2	1/0.1
α -Si : H, № 187	$7 \cdot 10^{-6}$	> 2	0.4	$4 \cdot 10^{-10}$	2	$2.3 \cdot 10^{-15}$	1	0.85	$5.6 \cdot 10^{-6}$	> 2	1/0.1
α -Si : H, № 247	$3 \cdot 10^{-5}$	> 2	0.45	$1.2 \cdot 10^{-9}$	2	$7.6 \cdot 10^{-15}$	1	0.8	$4.5 \cdot 10^{-4}$	> 2	3.5/0.1

тивности фотоэлектрического преобразования. Третий участок ВАХ, скорее, важен как указатель на то, что скорость нарастания тока начинает падать. Этот процесс эквивалентен увеличению сопротивления в цепи тока, хотя реально физический процесс намного сложнее. В свете сказанного, на начальной части третьего участка, в пределах 1–1.5 В сложные физические процессы в этой области могут быть имитированы просто эквивалентным омическим сопротивлением R_s , величина которого подбирается из фитинга путем согласования расчетных кривых ВАХ с экспериментальными характеристиками (рис. 2). К данному выше общему описанию темновых ВАХ важно сделать небольшой комментарий. Важно подчеркнуть, что во всех исследованных образцах наблюдается „рекомбинационно-диффузионный“ процесс. Это свидетельствует о достаточно высоком качестве материала элементов. Для аморфного кремния, изготовленного при неоптимизированной технологии, а также, например, сплавов аморфного кремния с углеродом и некоторыми другими материалами качество p – n -перехода, как правило, падает и „рекомбинационно-диффузионная“ компонента ВАХ может не наблюдаться вообще. Транспорт в таких материалах рассмотрен в работе [12].

Результаты детальной обработки экспериментальных прямых темновых ВАХ как суммы участков, соответствующих различным механизмам транспорта носителей заряда в ОПЗ при различных напряжениях смещения,

даны в табл. 1 и 2. Табл. 1 характеризует параметры исследованных структур с доминирующим рекомбинационным механизмом прохождения тока в ОПЗ p – i – n -перехода в „среднем“ участке темновых ВАХ.

В табл. 2 суммированы параметры p – i – n -структур со смешанными механизмами токопрохождения на сере-

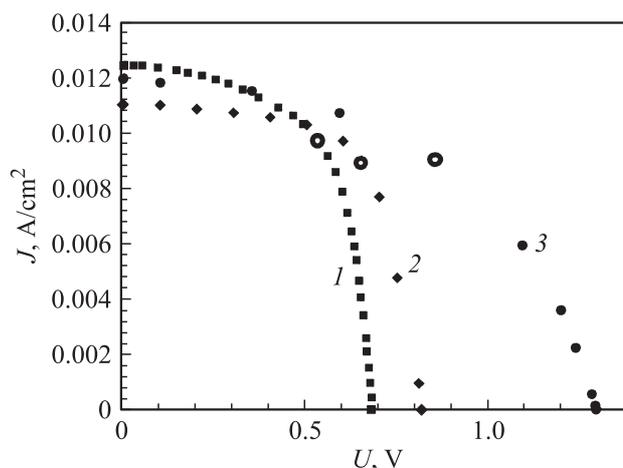


Рис. 3. Экспериментальные световые характеристики СЭ α -Si : H (кривые 1, 2) и тандема μ c-Si : H + α -Si : H (кривая 3), измеренные при комнатной температуре и солнечном излучении AM1.5. На нагрузочных кривых большим диаметром выделены точки, соответствующие оптимальной нагрузке, т.е. максимальной эффективности, используемые далее на рис. 4, 5 и 6.

динном участке ВАХ (рис. 1 и 2): „рекомбинационным“ в начале и „диффузионным“ при больших напряжениях смещения с плавным переходом между этими механизмами токопрохождения.

В таблицах в последней колонке приведены через дробь значения последовательного омического сопротивления R_s СЭ, полученные из фитинга экспериментальных темновых ВАХ (рис. 1) и использованные при расчете зависимостей ток генерации (J_g) — эффективность (η), где в числителе начальная часть обла-

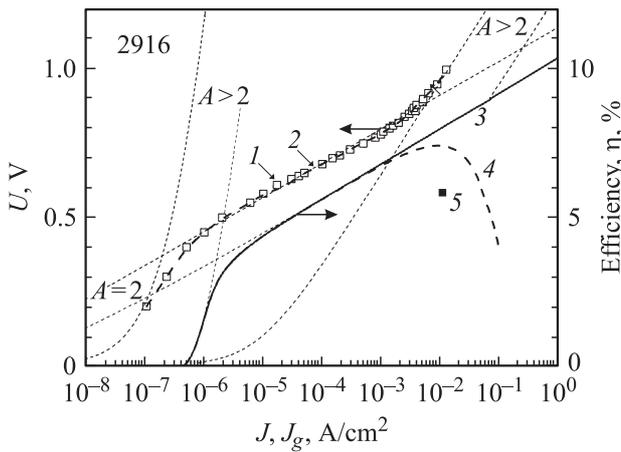


Рис. 4. Экспериментальные и расчетные характеристики СЭ $a\text{-Si:H}$ (образец № 2916): прямая темновая ВАХ, ($J-V$): 1 — эксперимент, 2 — расчет; ток генерации (J_g)–эффективность (η) СЭ: 3, 4 — расчет ($R_s = 0, R_s \approx 5 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$), 5 — эксперимент, АМ1.5. Участки характеристик: $A > 2, J_{0(A>2)} = 4.1 \cdot 10^{-7} \text{ А/см}^2$; $A = 2, J_{0(A=2)} = 1.15 \cdot 10^{-10} \text{ А/см}^2$; $A > 2, J_{0(A>2)} = 8.6 \cdot 10^{-6} \text{ А/см}^2$.

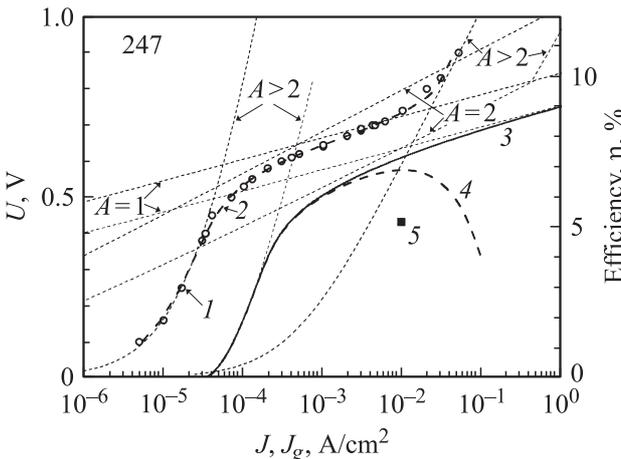


Рис. 5. Экспериментальные и расчетные характеристики СЭ $a\text{-Si:H}$ (образец № 247): прямая темновая ВАХ, ($J-V$): 1 — эксперимент, 2 — расчет; ток генерации (J_g)–эффективность (η) СЭ: 3, 4 — расчет ($R_s = 0, R_s = 3.5 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$), 5 — эксперимент, АМ1.5. Участки характеристик: $A > 2, J_{0(A>2)} = 3.0 \cdot 10^{-5} \text{ А/см}^2$; $A = 2, J_{0(A=2)} = 1.2 \cdot 10^{-9} \text{ А/см}^2$; $A = 1, J_{0(A=1)} = 7.6 \cdot 10^{-15} \text{ А/см}^2$; $A > 2, J_{0(A>2)} = 4.5 \cdot 10^{-4} \text{ А/см}^2$.

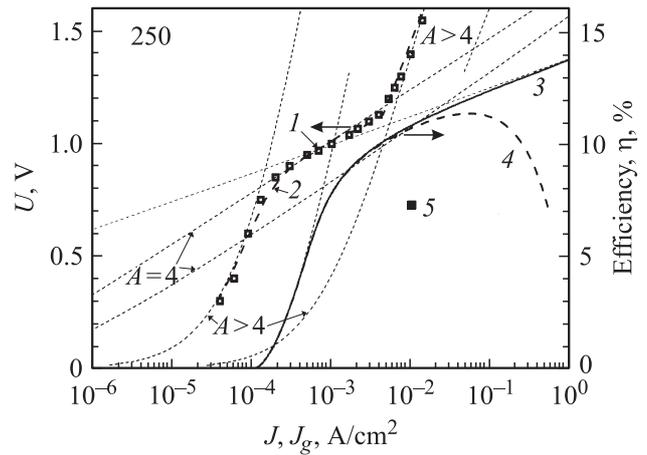


Рис. 6. Экспериментальные и расчетные характеристики тандема $\mu\text{c-Si:H} + a\text{-Si:H}$ (образец № 250): прямая темновая ВАХ ($J-V$): 1 — эксперимент, 2 — расчет; ток генерации (J_g)–эффективность (η) тандема: 3, 4 — расчет ($R_s = 0, R_s = 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$), 5 — эксперимент, АМ1.5. Участки характеристик: $A > 4, J_{0(A>4)} = 1.0 \cdot 10^{-4} \text{ А/см}^2$; $A = 4, J_{0(A=4)} = 1.4 \cdot 10^{-8} \text{ А/см}^2$; $A > 4, J_{0(A>4)} = 3.2 \cdot 10^{-4} \text{ А/см}^2$.

сти „суперинжекции“ имитирована просто эквивалентным омическим сопротивлением, а в знаменателе — экспонентой с $A > 2$. На рис. 3 представлены световые ВАХ исследованных образцов СЭ. Значения эффективностей в точке оптимальной нагрузки, полученные стандартным путем и использованные при сравнении с расчетными значениями, представлены на рис. 4, 5 и 6. Как видно из рис. 4, 5 и 6, экспериментальные значения эффективности (точки — 5) расположены ниже расчетных потенциальных (кривые 3 и 4). Как было отмечено ранее, это ожидаемый результат, так как в расчете не учитываются потери на отражение света и некоторые другие аспекты постростовой технологии.

4. Оценка параметров фотопреобразования из темновых ВАХ

Как показано в работах по СЭ на основе $A^{III}B^V$, темновые ВАХ могут быть весьма информативны в оценке и прогнозе параметров таких фотопреобразователей [3,4]. Мы вводим в рассмотрение для последующего анализа единую функциональную зависимость прямой ветви темновой ВАХ, включающую все экспериментально наблюдаемые участки ВАХ, которые идентифицируются как сегменты единой кривой. Полная ВАХ получена путем сложения компонент, соответствующих разным участкам ВАХ:

$$J = J_{0r}(\exp(V_{\phi}/A_r \varepsilon) - 1) + J_{0r}(\exp(V_{\phi}/A_r \varepsilon) - 1) + J_{0d}(\exp(V_{\phi}/A_d \varepsilon) - 1), \quad (1)$$

где $\varepsilon = kT/q$.

Темновую безрезистивную J - V_ϕ -характеристику (1) можно аппроксимировать 3 сегментами, на каждом из которых зависимость напряжения в ОПЗ от темнового тока имеет вид [3]

$$V_\phi = A\varepsilon \cdot \ln(J/J_0 + 1). \quad (2)$$

Такая „сегментная аппроксимация“ позволяет, используя математическое усреднение значений ВАХ в зонах сшивания различных сегментов, получить сглаживание рассчитанной функциональной ВАХ. Как показывает опыт работы с такой расчетной кривой, она оказывается крайне полезной в аналитической обработке данных и становится просто необходимой в работе с многосегментными структурами (тандем, триплет и т.д.). В общем случае в области сшивки сегментов ВАХ „вольтовая“ и „токовая“ границы между соседними сегментами будут:

$$\begin{cases} V_{n(n+1)} = \frac{A_n A_{(n+1)}}{A_n - A_{(n+1)}} \varepsilon \cdot \ln(J_{0n}/J_{0(n+1)}) \\ J_{n(n+1)} = \frac{J_{0n}^{A_n/(A_n - A_{(n+1)})}}{J_{0(n+1)}^{A_{(n+1)}/(A_n - A_{(n+1)})}} \end{cases}, \quad (3)$$

где n и $(n + 1)$ — индексы соседних сегментов.

Световая (нагрузочная) ВАХ (для упрощения записи ограничимся только одним сегментом) получается из соответствующего сегмента темновой и имеет вид $J = J_g - j$:

$$\begin{cases} V_\phi = A\varepsilon \ln\left(\frac{J_g - j}{J_0}\right) \\ j = J_g - J_0 \exp\left(\frac{V_\phi}{A\varepsilon}\right) \end{cases}, \quad (4)$$

где $\varepsilon = kT/q$.

Для разомкнутой цепи (режима холостого хода) $j = 0$ и $V = V_{oc}$. Тогда из (4) следует уравнение

$$J_g = J_0 \exp\left(\frac{V_{oc}}{A\varepsilon}\right), \quad (5)$$

которое имеет тот же преэкспоненциальный множитель, что и соответствующий сегмент темновой ВАХ, и совпадает по форме с выражением для темновой ВАХ. То же верно и для непрерывной функции сопряженных сегментов.

Далее для оценки параметров фотопреобразования необходимо установить корреляцию между эффективностью (кпд) солнечного элемента и током генерации. Полный набор уравнений, описывающих эту корреляцию, дан в [4], а также в более краткой форме в [3], и поэтому представляется нецелесообразным приводить эту длинную запись в данной работе. Ограничимся лишь изложением физической стороны этого анализа. Производная от мощности ($J \cdot V_\phi$) из уравнений (4) в точке оптимальной нагрузки равна нулю. Решение трансцендентного уравнения дает выражение:

$$\begin{cases} V_{oc} = V_m + E \ln\left(1 + \frac{V_m}{E}\right) \\ \left(1 + \frac{V_m}{E}\right) \exp\left(\frac{V_m}{E}\right) = \exp\left(\frac{E_{oc}}{E}\right) \end{cases}, \quad (6)$$

где $E \equiv A\varepsilon$. Используя преобразования, сделанные в [3,4], найдем максимально генерируемую элементом мощность в точке оптимальной нагрузки:

$$P_m = J_g \cdot V_m^2 / (V_m + E). \quad (7)$$

Тогда эффективность

$$\eta = J_m V_m / P_{inc} = \frac{J_g}{P_{inc}} \cdot \frac{V_m^2}{V_m + E} = \frac{V_\eta}{V_{conv}}. \quad (8)$$

Так как отношение падающей мощности (P_{inc}) к току генерации при фиксированном спектре солнечного излучения $\frac{P_{inc}}{J_g} = V_{conv}$ не зависит от интенсивности излучения, полная зависимость эффективности η от тока генерации J_g пропорционального концентрации солнечного излучения и может быть выражена через параметр V_η , определяемый как „эффективное“ напряжение [3,4], равное

$$V_\eta \equiv \frac{V_m^2}{V_m + E}. \quad (9)$$

Используя это соотношение (9), можно выразить J_g через V_η и получить полное выражение зависимости $J_g(\propto C) - V_\eta(\propto \eta)$ для всей совокупности сегментов ВАХ фотоэлектрического преобразователя. Влияние последовательного сопротивления всей структуры R_s (контактное и туннельного перехода) учитывается введением корректирующего уравнения $V_{\eta o} = V_\eta + R_s$. Расчеты выполняются по специальной программе на основе выражений, приведенных в статье, и данных, полученных из фитинга экспериментальных темновых ВАХ СЭ.

Результаты этих вычислений для образцов a -Si:H № 247 и 2916 и тандема μc -Si:H + a -Si:H (образец № 250) представлены на рис. 4, 5 и 6, где совмещены характеристики: темновые вольт-амперные, $J - V$, и ток генерации-эффективность, $J_g - \eta$. Из рисунков видно, что кривые (3 и 4) $J_g - \eta$ характеристик состоят из тех же участков-сегментов, что и темновые $J - V$ (кривые 1, 2). Видно, что в рабочем диапазоне плотности тока генерации фактором, ограничивающим значения потенциальной эффективности исследованных образцов СЭ (кривые 3), является „рекомбинационный“ механизм токопрохождения ($A = 2$ для СЭ a -Si:H и $A = 4$ для тандема). Этим объясняются несколько большие экспериментальные и расчетные значения эффективности, полученные на образце № 2916 по сравнению с образцом № 247, так как у него меньше на порядок значение предэкспоненциального множителя J_{0r} и, естественно, большее значение напряжения холостого хода. В исследованных СЭ на величину эффективности η , с ростом плотности тока J_g или освещенности, существенным становится влияние последовательного сопротивления R_s солнечного элемента (см. рис. 4, 5 и 6, кривые 4) и области „суперинжекции“. Но для выяснения корреляции между природой экстремумы в области „суперинжекции“ и параметрами СЭ потребуется провести специальные исследования.

Таким образом, использованная методика расчета, построенная на параметрах, полученных из анализа экспериментальных темновых ВАХ, демонстрирует предельные возможности ростовой технологии и указывает на то, что не все возможности повышения КПД СЭ на аморфных материалах исчерпаны.

5. Заключение

Впервые для $p-i-n$ -структур на основе аморфного гидрогенизированного кремния продемонстрирована фундаментальная роль темновых ВАХ в оценке эффективности фотопреобразования СЭ $a\text{-Si:H}$. Анализ темновых ВАХ позволяет эффективно контролировать и совершенствовать технологический процесс получения $a\text{-Si:H}$ $p-i-n$ -структур. Особенно это важно для многопереходных солнечных элементов (тандем, триплет), для которых качество фотоактивных $p-i-n$ -переходов, баланс токов и сопротивлений отдельных элементов, а также другие их параметры, зависящие от постростовых технологий, представляют собой сложную физическую картину, которую трудно объяснить и оптимизировать без понимания преобладающих механизмов токопрохождения в ОПЗ аморфных $p-i-n$ -структур, полученных из анализа темновых ВАХ.

В работе выполнены измерения темновых ВАХ достаточно широкой группы $a\text{-Si:H}$ солнечных элементов, изготовленных в разное время и с некоторыми различиями в параметрах ростовой технологии. Тем не менее солнечные элементы показывают сходство формы кривых темновых ВАХ и их характерных участков-сегментов и позволяют выделить общие закономерности в механизмах токопрохождения.

Представляется принципиально важным наличие во всех случаях общих участков темновой ВАХ: „туннельно-ловушечных“ и „эмиссионно-туннельных“ со значением фактора качества диода $A > 2$; „рекомбинационных“ с $A = 2$ и „диффузионных“ с $A = 1$. Элементы с такими механизмами прохождения тока через $p-n$ -переход имеют КПД около или несколько больше 5%. Этот результат характерен для элементов с простейшей структурой, не имеющей антиотражающих и светорассеивающих встроенных слоев.

В работе данные по тандему носят первичный оценочный характер, однако создание отработанной технологии тандемов и триплетов на основе $p-i-n$ -структур $\mu\text{-Si:H} + a\text{-Si:H}$ — перспективный путь повышения эффективности фотопреобразователей на основе аморфных материалов.

В исследованных СЭ на основе $a\text{-Si:H}$ при преобразовании неконцентрированного солнечного излучения (AM1.5) доминирующее влияние оказывает „рекомбинационный“ механизм токопрохождения в ОПЗ $p-i-n$ -переходов. Методика анализа экспериментальных темновых ВАХ, ранее предложенная и апробированная для многопереходных СЭ на основе кристаллических

соединений $A^{III}B^V$, применима и для $p-i-n$ -структур на основе аморфного гидрогенизированного кремния и приобретает универсальный характер.

Несмотря на относительно невысокие значения КПД, аморфный кремний представляется в силу своих особых свойств (экологичность, малый вес тонких пленок и соответственно малое потребление материала, а также возможность применения на гибких подложках) исключительно перспективным для различных областей фотоэнергетики, а в определенных нишах приложений ему просто нет замены, поэтому исследования этого материала необходимо активно продолжать.

Работа частично выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, госконтракт № 16.516.11.6053 и ФЦП, госконтракты № 16.513.11.3084 и № 16.526.12.6017.

Список литературы

- [1] A. Mitiga, P. Fiorini, M. Falconieri, F. Evangelisti. *J. Appl. Physics*, **66** (6), 2667 (1989).
- [2] T.J. McMahon, B.G. Yacobi, A. Madan. *J. Non-Cryst. Solids*, **66**, 375 (1984).
- [3] V.S. Kalinovskiy, V.M. Andreev. *Proc. 25th Europ. Photovolt. Solar Energy Conf. and 5th World Conf. on Photovolt. Energy Conversion*, (Valencia, Spain, 2010, p. 979).
- [4] В.М. Андреев, В.В. Евстропов, В.С. Калиновский, В.М. Лантратов, В.П. Хвостиков. *ФТП*, **43** (5), 671 (2009).
- [5] А.А. Андреев, А.В. Андрианов, В.У. Авербух. R. Mavljanov, S.B. Aldabergeniva, M.Albrecht, H.P. Strunk. *J. Solid State Phenomena*. **51–52**, 249 (1996). Scitec Publications, Switzerland.
- [6] A. Roth. F.J. Comes, W. Beyer. *Proc. 11th Energy Conversion Photovoltaic Solar Energy Conf.*, Montreux, Switzerland, 1992, p. 594.
- [7] W. Shockley, H.J. Queisser. *J. Appl. Phys.*, **32** 510 (1961).
- [8] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов*, ч. 1, 2. Пер. с англ. (М., Мир, 1984) с. 110.
- [9] А. Фаренбрух, Р. Бьюб. *Солнечные элементы: Теория и эксперимент*. Пер. с англ. под ред. М.М. Колтуна (М., Энергоатомиздат, 1987) с. 280.
- [10] М. Ламперт, П. Марк. *Инжекционные токи в твердых телах*. Пер. с англ. (М., Мир, 1973) с. 244.
- [11] Б.Л. Шарма, Р.К. Пурохит. *Полупроводниковые гетеропереходы*, (М., Сов. радио, 1979).
- [12] А.А. Андреев. *ФТП*, **42** (11), 1363 (2008).

Редактор Л.В. Беляков

**Efficiency of sunlight conversion
by thin-film solar cells based on $a\text{-Si:H}$
single-junction and ($a\text{-Si:H} + \mu\text{c-Si:H}$)
tandems obtained from the analysis
of experimental dark and load $I-V$
characteristics**

A.A. Andreev, V.M. Andreev, V.S. Kalinovsky,
P.V. Pokrovsky, E.I. Terukov

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

Abstract The aim of this work was to check the feasibility of applying the method for estimating the efficiency of solar cells based on $A^{III}B^V$ materials by analysing the forward dark $I-V$ characteristics that was elaborated earlier to such a nonstandard material as $a\text{-Si:H}$. The $a\text{-Si:H}$ and $a\text{-Si:H} + \mu\text{c-Si:H}$ structures without a light-scattering sublayer and anti-reflective coating have been investigated. Experiments at room temperature have shown that the $I-V$ dependence contains several well-pronounced exponential portions. Calculations of the solar cell efficiency and the photogenerated current were performed for each portion of the forward dark $I-V$ characteristic. This made it possible to obtain the complete dependence of the cell light conversion efficiency from the photogeneration current or the photon flux density. The observed agreement between the experimental and calculated data may be considered satisfactory and acceptable, and the procedures for measurements and for analysis of the dark $I-V$ characteristics proposed and approved for solar cells based on crystalline $A^{III}B^V$ compounds acquire an universal character. The carried out analysis of the amorphous silicon $p-i-n$ -structure characteristics and the calculations of potential efficiencies based on it widen our understanding of this class of devices and allow us to improve the technology and to increase the conversion efficiency of such solar cells.