

ЭФФЕКТЫ ПАССИВАЦИИ И ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В КРЕМНИЕВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ С ОПТИЧЕСКИМИ ПОКРЫТИЯМИ

© М.Я.Бакиров

Сектор радиационных исследований Академии наук Азербайджана,
370073 Баку, Азербайджан
(Получена 11 января 1994 г. Принята к печати 3 июля 1995 г.)

При нанесении на поверхность кремниевых солнечных элементов покрытий Nd_2O_3 и $\text{ZnS}+\text{Nd}_2\text{O}_3$ происходит увеличение фототока, на 10 и 30% соответственно превышающее ожидаемое за счет эффекта просветления. В первом случае имеют место эффекты просветления и пассивации поверхностных центров, а во втором случае — эффекты просветления и фотолюминесценции.

Одним из путей повышения эффективности солнечных элементов является покрытие светочувствительной поверхности просветляющими слоями $[1-4]$. При этом уменьшается коэффициент отражения светового потока, падающего на поверхность элемента, и увеличивается интегральный коэффициент собственного теплового излучения поверхности. Кроме того, просветляющие покрытия защищают элементы от повреждений, вызванных радиацией в Космосе и неблагоприятными атмосферными воздействиями на Земле.

В результате повышения эффективности улучшаются эксплуатационные характеристики и увеличиваются сроки службы солнечных элементов.

В настоящее время в качестве просветляющего слоя для кремниевых солнечных элементов используется широкий класс материалов (MgF , SiO_2 , Si_3N_5 , Tn_2O_5 , TiO_2 и др.) В зависимости от природы слоев покрытий в элементах происходят различные эффекты (интерференция света, накопление объемных зарядов, пассивация поверхностных состояний, фотолюминесценция и др.). Цель данной работы — исследовать эффекты пассивации и фотолюминесценции в кремниевых солнечных элементах с оптическими покрытиями.

Элементы были изготовлены путем диффузии фосфора в *p*-кремний с удельным сопротивлением 2 Ом · см. При условии освещения от источника АМ-1 фототок короткого замыкания в них составлял $22 \div 25 \text{ мА/см}^2$, а фотонапряжение холостого хода — $0.50 \div 0.55 \text{ В}$, кпд составлял $9.5 \div 10\%$.

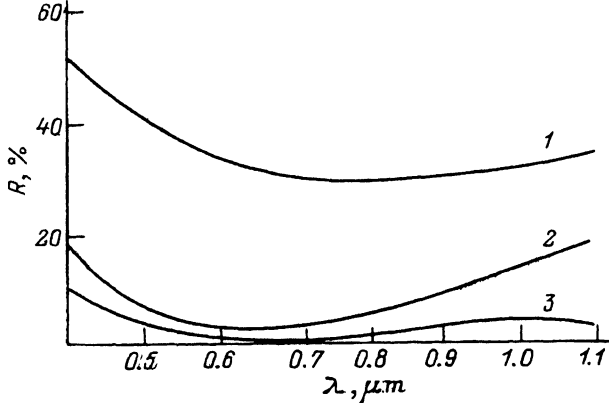


Рис. 1. Спектральные зависимости коэффициента отражения света (R) от чистой поверхности кремния (1) и слоев Nd_2O_3 (2), $\text{ZnS} + \text{Nd}_2\text{O}_3$ (3) на поверхности кремния.

Для исследования эффекта пассивации поверхностных зарядов в качестве покрытия нами использовались слои Nd_2O_3 . Выбор Nd_2O_3 обусловлен тем, что пленки окислов редкоземельных элементов обладают высокой прозрачностью в рабочем диапазоне кремниевых солнечных элементов ($0.4 \div 1.2$ мкм). Их коэффициенты прозрачности для различных длин волн составляют $85 \div 98\%$ [5].

Исследование показало, что после нанесения на поверхность солнечного элемента тонкого (70 нм) слоя Nd_2O_3 (показатель преломления $n = 1.5$) фототок увеличивается более чем на 40%. Такие элементы при освещении от АМ-1 генерируют фототок $33 \div 35$ мА/см². Наблюдаемое увеличение фототока в них на 10% больше, чем ожидаемое за счет эффекта интерференции света. Кремний, обладая довольно высоким показателем преломления ($n = 3.7$), в области длин волн $0.5 \div 1.1$ мкм, отражает около 30% светового потока, падающего на поверхность (рис. 1). После нанесения на поверхность кремния тонкого слоя Nd_2O_3 отражение света резко уменьшается, но при этом за счет интерференции можно было ожидать увеличения фототока на $25 \div 30\%$. Тем не менее реальное увеличение фототока в элементах после нанесения на поверхность тонкого слоя Nd_2O_3 составляет более чем 40%.

Измерение спектрального распределения чувствительности показало, что после нанесения на поверхность элементов слоя Nd_2O_3 повышение чувствительности в основном наблюдается на коротковолновом участке спектра (рис. 2). Это дало нам основание предположить, что наблюдаемое увеличение фототока обусловлено эффектами интерференции света и пассивации поверхностных заряженных дефектов. Методом электроотражения света было определено, что на химически травленной поверхности кремния имеются около 10^{17} см⁻² заряженных центров.

Эти центры способны захватывать неравновесные носители, генерированные светом. Нанесение на поверхность кремния тонкого слоя Nd_2O_3 , обладающего высоким коэффициентом пропускания (95%), с одной стороны — уменьшает отражение света, а с другой — пассивирует поверхностные заряженные центры и уменьшает скорость поверхност-

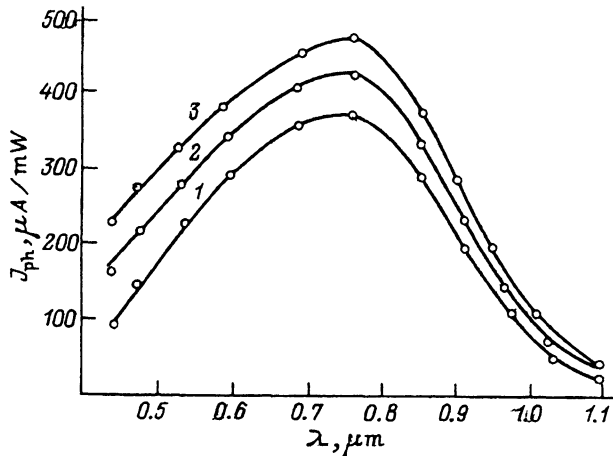


Рис. 2. Спектральные характеристики токовой чувствительности (J_{ph}) кремниевых солнечных элементов без покрытия (1), с покрытиями из Nd_2O_3 (2) и $\text{ZnS} + \text{Nd}_2\text{O}_3$ (3).

ной рекомбинации. Для доказательства последнего нами определялась скорость поверхностной рекомбинации в элементах без оптического покрытия и с покрытием из Nd_2O_3 . Установлено, что в элементах без покрытия скорость поверхностной рекомбинации составляет $s = 1240$ см/с, а в элементах с покрытием из Nd_2O_3 $s = 960$ см/с.

Таким образом, мы пришли к заключению, что увеличение фототока более чем на 40% в кремниевых солнечных элементах с покрытием из Nd_2O_3 обусловлено эффектами интерференции света и пассивации поверхностных заряженных центров.

Для исследования эффекта фотолуминесценции в качестве оптического покрытия нами использовался двойной слой $\text{ZnS} + \text{Nd}_2\text{O}_3$. Выбор двойного слоя $\text{ZnS} + \text{Nd}_2\text{O}_3$ обусловлен тем, что для полупроводника с большим показателем преломления, каковым является кремний, с помощью однослойных покрытий добиваются низкого отражения на узком участке спектра и при изменении длины волны коэффициент отражения света быстро возрастает. Получить низкое отражение в широкой области спектральной чувствительности и тем самым максимально увеличить КПД элементов можно с помощью двухслойных покрытий. Наиболее широкую область низкого отражения удастся получить, если показатель преломления двухслойных покрытий постепенно уменьшается от значения, соответствующего кремнию, к значению, соответствующему воздуху или защитному стеклу [2]. С этой точки зрения ZnS ($n = 2.5$) и Nd_2O_3 ($n = 1.5$) являются наиболее подходящей парой слоев покрытия. Учитывая это, на светочувствительную поверхность кремниевых солнечных элементов наносили сначала слой ZnS (70 нм), а затем слой Nd_2O_3 (50 нм).

Измерения показали, что после нанесения на поверхность элементов двойного слоя $\text{ZnS} + \text{Nd}_2\text{O}_3$ фототок увеличивается на 60%. Эти элементы при освещении от АМ-1 дают фототок около 40 мА/см². Наблюдаемое увеличение фототока в них на 30% больше, чем ожидаемое за счет эффекта интерференции света. Хотя при нанесении на поверхность кремния двойного слоя $\text{ZnS} + \text{Nd}_2\text{O}_3$ отражение света довольно

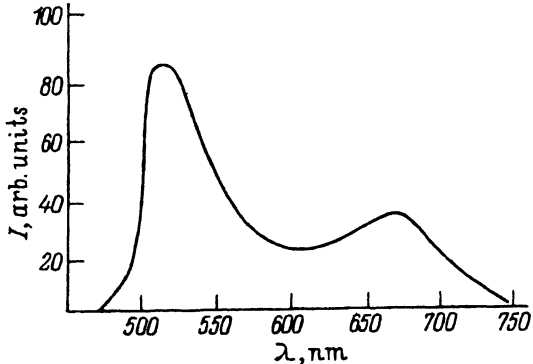


Рис. 3. Спектр интенсивности фотолюминесценции (I) ZnS.

резко уменьшается в широком диапазоне ($0.5 \div 1.1$ мкм) (рис. 1), но увеличение фототока больше чем на 30% невозможно объяснить только эффектом интерференции.

Измерение спектральных характеристик показало, что после покрытия поверхности элементов двойным слоем ZnS + Nd₂O₃ фоточувствительность повышается главным образом на коротковолновом участке спектра (рис. 2). Это дало основание предположить, что наблюдаемое увеличение фототока в кремниевых солнечных элементах с покрытием из ZnS + Nd₂O₃ обусловлено эффектами интерференции света и фотолюминесценции. Дело в том, что ZnS является весьма эффективным люминофором и при наличии в нем активирующих примесей обладает довольно высоким квантовым выходом фотолюминесценции. Мы измерили фотолюминесценцию слоев ZnS. При этом обнаружили, что коротковолновое излучение ($\lambda = 440$ нм), поглощенное люминофором ZnS, переизлучается в виде света с большой длиной волны ($\lambda_1 = 520$ нм и $\lambda_2 = 670$ нм) (рис. 3). Это излучение поглощается вблизи p - n -перехода и создает дополнительные фотоносители. Измерение квантового выхода (отношения числа излученных фотонов к числу поглощенных) в тонких пленках ZnS показало, что при низких концентрациях активирующих примесей (Ag) его величина составляет 80%.

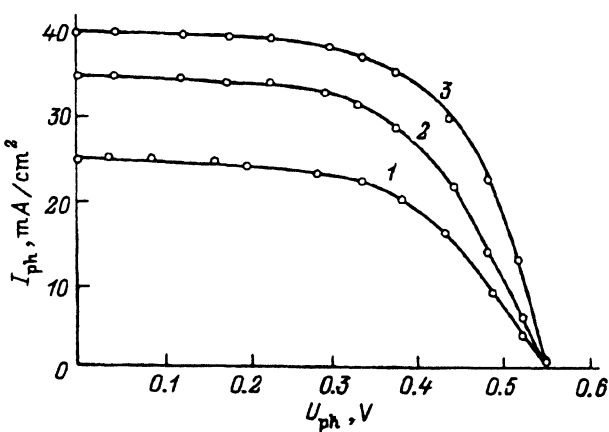


Рис. 4. Нагрузочные вольт-амперные характеристики при освещении от AM-1 ($U_{ph} - I_{ph}$ -характеристики) кремниевых солнечных элементов без покрытия (1), с покрытиями из Nd₂O₃ (2) и ZnS + Nd₂O₃ (3).

Известно, что эффективность систем люминофор-солнечный элемент зависит от потерь, связанных с отражением света от освещаемой поверхности люминофора и от потерь света, вызываемых его отражением от нижней поверхности люминофора при несогласованных значениях показателя преломления люминофора и материала солнечного элемента. Наличие слоя Nd_2O_3 , обладающего высоким коэффициентом пропускания, резко уменьшает отражение от поверхности, а согласованность по показателю преломления ZnS и кремния уменьшает отражение от нижней поверхности. Следовательно, ZnS можно рассматривать как эффективное покрытие для кремния, преобразующее коротковолновое солнечное излучение в длинноволновое.

Таким образом, мы пришли к заключению, что увеличение фототока на 60% в кремниевых солнечных элементах с покрытием из $\text{ZnS} + \text{Nd}_2\text{O}_3$ обусловлено эффектами интерференции света и фотолюминесценции.

Следует отметить, что характерной особенностью кремниевых солнечных элементов с оптическими покрытиями Nd_2O_3 и $\text{ZnS} + \text{Nd}_2\text{O}_3$ является то, что в них напряжение холостого хода U_{xx} не зависит от природы покрытий. Для всех элементов в условиях освещения от АМ-1 $U_{xx} = 0.55 \text{ В}$ (рис. 4). Можно было бы ожидать повышения U_{xx} после покрытия поверхности просветляющим слоем за счет роста тока короткого замыкания $I_{кз}$ ($U_{xx} = (\beta kT/q) \ln(I_{кз}/I_0)$). Однако такого не наблюдается. Дело в том, что в реальных солнечных элементах U_{xx} определяется в основном величиной обратного тока через $p-n$ -переход I_0 . Покрытие на поверхности не изменяет механизма обратного тока, и рост фототока мало сказывается на значении U_{xx} .

В заключение необходимо отметить, что путем использования однослойного покрытия Nd_2O_3 и двухслойного покрытия $\text{ZnS} + \text{Nd}_2\text{O}_3$ можно повысить КПД кремниевых солнечных элементов на 4 ÷ 5%.

Список литературы

- [1] М.М. Колтун. *Селективные оптические поверхности преобразователей солнечной энергии* (М., Наука, 1979) с. 215.
- [2] М.М. Колтун. *Оптика и метрология солнечных элементов* (М., Наука, 1985) с. 279.
- [3] Г.Б. Абдуллаев, М.Я. Бакиров, Н.А. Сафаров. *Гелиотехника*, вып. 5, 11 (1982).
- [4] Г.Б. Абдуллаев, М.Я. Бакиров, Г.М. Ахмедов, Н.А. Сафаров. *Гелиотехника*, вып. 1, 14 (1994).
- [5] Ю.А. Анешкин, А.И. Петров, В.А. Рожков и др. *Гелиотехника*, вып. 6, 13 (1982).

Редактор Л.В. Шаронова

Effects of passivation and photoluminescence in silicon solar cells with optical coatings

M.I. Bakirov

Radiation Research Department, Azerbaijan Academy of Sciences,
370073 Baku, Azerbaijan

Optical coating of silicon solar cells leads to photocurrent gain larger than that expected due to effect of anti-reflecting: Nd_2O_3 gives 10 per cent increment; $\text{ZnS} + \text{Nd}_2\text{O}_3$ layers — 30 per cent. The first is the result of anti-reflecting and passivating, the second — that of anti-reflecting and photoluminescence.