

06.2;06.3;07;12

©1993

ПРОСВЕТЛЯЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ ИЗ ФТОРИДОВ ЭРБИЯ, НЕОДИМА И ГАДОЛИНИЯ ДЛЯ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

В.А.Рожков, А.И.Петров, М.Б.Шалимова

Значительный коэффициент отражения света (35–40%) от поверхности кремния в области спектральной чувствительности 400–1100 нм вызывает необходимость просветления рабочей поверхности кремниевого фотоэлектрического преобразователя [1]. Среди материалов, перспективных для использования в качестве просветляющих покрытий кремниевых приборов, выгодно выделяются фториды редкоземельных элементов (РЗЭ), которые обладают высокой прозрачностью в рабочей области спектра и характеризуются химической и термической стойкостью [2]. Однако оптические и просветляющие свойства этих соединений в тонкопленочном состоянии до настоящего времени не изучены.

В настоящей работе исследуются оптические характеристики фторидов эрбия, неодима и гадолиния и эффект просветления с использованием этих материалов на кремниевых поверхностях фотоэлектрических преобразователей.

Пленки фторидов РЗЭ толщиной $d = 80\text{--}110$ нм изготавливались на поляризованных кремниевых, кварцевых и стеклянных подложках методом термического распыления порошкообразного фторида на подогретую до температуры 573 К подложку. Распыление материала проводилось из молибденовой лодочки в вакууме 10^{-5} Тор на установке типа ВУП-5. Для измерения спектров пропускания света пленочный фторид РЗЭ формировался на половине кварцевой или стеклянной подложки. Исследование свойств просветляющих покрытий из фторидов РЗЭ на поверхности кремния проводилось, когда в качестве подложки использовались кремниевые $n^+ - p - p^+$ структуры с толщиной n^+ -слоя, равной 0.45–0.5 мкм.

Спектральные зависимости пропускания света пленок фторидов РЗЭ исследовались на спектрофотометре СФ-26, спектральные зависимости коэффициента отражения света от системы просветляющая пленка фторида РЗЭ–кремний измерялись с помощью фотометра отражения ФО-1. Для исследования просветляющих свойств пленок фторидов РЗЭ

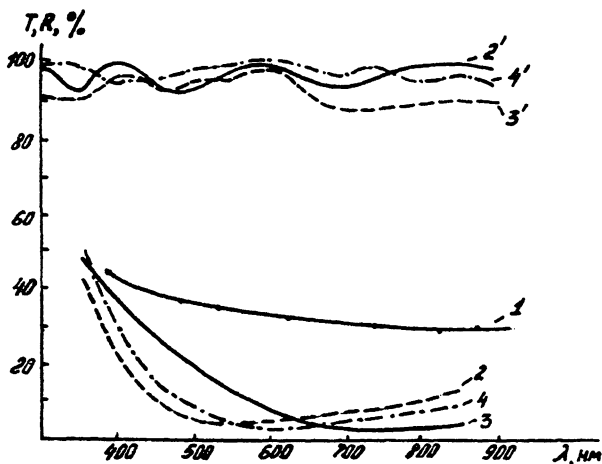


Рис. 1. Спектральные зависимости коэффициента пропускания пленок фторидов РЗЭ на кварцевых подложках (2'-4') и отражения света от поверхности кремния (1) и пленки фторида РЗЭ на кремниевой подложке (2-4).

2, 2' — NdF_3 , 3, 3' — ErF_3 , 4, 4' — GdF_3 .

на кремниевой поверхности измерялись такие спектральные зависимости тока короткого замыкания $n^+ - p - p^+$ кремниевых структур.

Как показали исследования, пленки исследуемых фторидов РЗЭ обладают высокой механической прочностью, хорошей адгезией к поверхности кремния и кварца и не царапаются стальной иглой. Тонкие слои фторидов РЗЭ рентгеноаморфны, а более толстые слои ($d > 150$ нм) имеют поликристаллическую структуру. Зависимости спектров пропускания T пленок эрбия, неодима и гадолиния, нанесенных на кварцевые подложки, и спектры коэффициента отражения R света от поверхности кремния и системы пленка фторида РЗЭ-кремний приведены на рис. 1 и в таблице 1. Для компенсации искажений, связанных с потерями излучения из-за поглощения света кварцем и отражения от противоположной стороны подложки, излучение, прошедшее через часть кварцевой пластины, не содержащей пленки фторида, принималось за 100%. Как видно, пленки фторидов РЗЭ в спектральном диапазоне 400–1100 нм обладают высокой прозрачностью, коэффициент пропускания света изменяется в пределах 96–99.5%. Изменение коэффициента пропускания света пленок в зависимости от длины волны падающего излучения связаны с интерференционными явлениями в пленке фторида РЗЭ. Коэффициент отражения монохроматического света в спектральной области 400–927 нм прини-

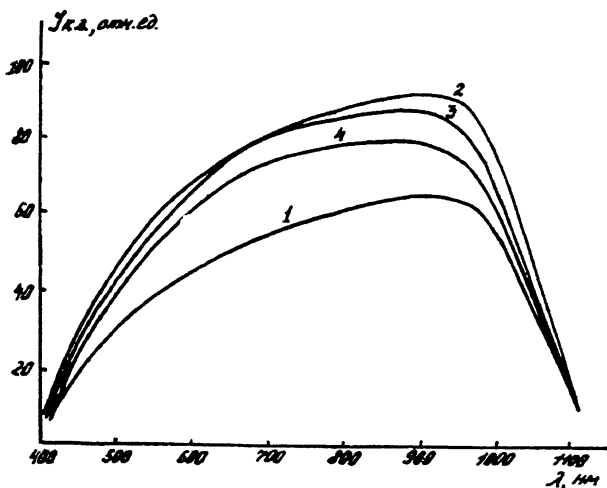


Рис. 2. Спектральные зависимости фототока короткого замыкания кремниевой $n^+ - p - p^+$ структуры без покрытия (1) и с пленкой фторида РЗЭ (2-4); 2 — NdF_3 ; 3 — ErF_3 ; 4 — GdF_3 .

мает значения для чистой поверхности кремния, лежащие в пределах 30.6–44.3% и уменьшается до 2.0–5.6% при нанесении пленки из фторида РЗЭ (табл. 1), что указывает на наличие эффекта просветления. Следует отметить, что экспериментальные минимальные значения спектрального коэффициента отражения света являются несколько завышенными из-за неполной монохроматизации излучения в спектр-фотометре ФО-1, а также вследствие возможного неполного совпадения длины волны излучения при измерении со спектральным минимумом отражения света. Наилучший эффект просветления наблюдается для пленки фторида неодима. Интегральный коэффициент отражения R_0 , измеренный в белом свете от структуры пленка фторида РЗЭ–кремний, составлял 5.5, 6.1 и 18% для фторида эрбия, гадолиния и неодима соответственно.

На рис. 2 представлены спектральные зависимости фототока короткого замыкания для $n^+ - p - p^+$ кремниевой структуры с просветляющим слоем из фторида РЗЭ и без него. Как видно, все спектральные зависимости качественно подобны между собой и имеют максимум фототока на длине волны излучения около 900 нм. Характерно, что использование покрытия из фторида РЗЭ вызывает значительное увеличение фоточувствительности всех образцов в диапазоне длин волн излучения от 400 до 1100 нм. Рассчитанные из этих характеристик значения относительного увеличе-

Таблица 1. Значения коэффициента отражения света для различных длин волн излучения от поверхности кремния и пленки фторида РЗЭ на кремниевой подложке

| Материалы | λ , нм | | | | | | | | | | |
|------------------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| | 400 | 457 | 490 | 520 | 582 | 620 | 750 | 832 | 874 | 927 | R_0 |
| Si | 44.3 | 39.7 | 38.8 | 37 | 34.7 | 33.4 | 31.7 | 30 | 31.8 | 31.4 | — |
| ErF ₃ | 26.8 | 11.2 | 8.9 | 6.0 | 5.2 | 5.6 | 9.2 | 11.9 | 15 | 15.1 | 5.5 |
| GdF ₃ | 35.1 | 15.3 | 12.8 | 8.1 | 4.8 | 4.3 | 6.5 | 9.3 | 10 | 12.8 | 6.1 |
| NdF ₃ | 45.3 | 31.4 | 29.4 | 23.8 | 13.9 | 9.7 | 3.0 | 2.0 | 4.0 | 4.0 | 18 |

Таблица 2. Значения K , % для различных длин волн излучения кремниевых фотоэлектрических преобразователей с просветляющим слоем

| Фторид РЗЭ | λ , нм | | | | | | | | | |
|------------------|----------------|------|-----|------|------|------|------|------|------|-------|
| | 500 | 600 | 700 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 | K_0 |
| ErF ₃ | 43 | 52.3 | 48 | 46 | 40.6 | 40.6 | 36 | 33 | 31 | 42 |
| GdF ₃ | 42 | 46 | 34 | 30 | 27.6 | 19 | 16.4 | 11.6 | 11 | 26 |
| NdF ₃ | 23 | 41 | 50 | 47.5 | 46 | 44 | 42 | 38 | 34 | 40 |

ния фототока, определяемые соотношением:

$$K = \frac{J_{\phi} - J_{\phi}^*}{J_{\phi}^*} \cdot 100\%,$$

где J_{ϕ} и J_{ϕ}^* — фототоки короткого замыкания структур с просветляющим слоем и без него соответственно, показывают, что применение пленок фторидов РЗЭ позволяет увеличить спектральное значение фототока фотоэлектрического преобразователя более чем на 50% для фторида эрбия и неодима (табл. 2). Интегральная чувствительность фототока в области длин волн 400–1000 нм K_0 фотоэлектрических преобразователей с пленками исследуемых фторидов РЗЭ увеличивается на 26–42%. Анализ показывает, что наблюдаемое увеличение спектральной чувствительности исследуемых кремниевых структур при использовании пленочного покрытия из фторида неодима или эрбия более чем на 8% больше ожидаемого значения только за счет эффекта просветления. Данный результат, очевидно, связан с пассивирующим действием пленки фторида РЗЭ, применение которой уменьшает скорость рекомбинации фотоносителей заряда на поверхности кремния.

Таким образом, проведенные исследования показывают перспективность использования пленки фторидов РЗЭ в качестве просветляющих и пассивирующих покрытий кремниевых фотоэлектрических приборов.

Список литературы

- [1] Колтун М.М. Солнечные элементы. М.: Наука, 1987. 191 с.
- [2] Риттер Э. Пленочные диэлектрические материалы для оптических применений. В кн.: Физика тонких пленок. Т. 8. / Под ред. Г.Хасса, М.Франкомба, Р.Гофмана. М.: Мир, 1978. С. 7–60.

Поступило в Редакцию
19 июля 1993 г.
