

## ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК $\text{SiO}_x$ ПЕРЕМЕННОГО СОСТАВА И ВОЛЬТФАРАДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МДМ И МДП СТРУКТУР НА ИХ ОСНОВЕ

Э.А. ДЖАФАРОВА, З.А. ИСКЕНДЕРЗАДЕ\*, М.Р. АХУНДОВ\*, Э.С. ТАПТЫГОВ,  
Ш.А. АЛИХАНОВА, Л.А.АЛИЕВА, П.А. АСКЕРОВА.

*Институт Физики им. академика Г.М. Абдуллаева НАН Азербайджана*

*A Z 1143, Баку, пр. Г. Джавида, 33*

*\*Азербайджанский Технический Университет*

*A Z1073, Баку, пр. Г. Джавида, 29*

Rezistiv buxarlandırma və yüksək tezlikli ion-plazma çökdürmə üsulları ilə dəyişən tərkibli  $\text{SiO}_x$  ( $x=1.05\div 1.5$ ) təbəqələri alınmışdır. Alınmış  $\text{SiO}_x$  təbəqələrinin xüsusi müqavimətinin, dielektrik nüfuzluğunun, dielektrik itkiləri əmsali bucağının tangensinin ( $\text{tg}\delta$ ) buxarlandırma sürətindən və qalıq qazların təzyiqindən asılılığı tədqiq olunmuşdur. Yüksək tezlikli voltfarad xarakteristikaları metodu vasitəsi ilə  $\text{SiO}_x$ - Si ( $x=1.05\div 1.5$ ) sərhəddində fiksə olunmuş yükün qiyməti ( $Q_s=5.6 \cdot 10^{12} \div 2.7 \cdot 10^{12}$  Кл·см<sup>-2</sup>) və səthi yüklərin sıxlığı ( $N_{ss}=9 \cdot 10^{11} \div 2.5 \cdot 10^{12}$  eV<sup>-1</sup>·см<sup>-2</sup>) təyin olunmuşdur. Dəyişən tərkibli  $\text{SiO}_x$  təbəqələrinin silisium günəş elementlərində şəffaflaşdırıcı örtük kimi istifadə olunması imkanı göstərilmişdir.

Методом резистивного напыления и высокочастотного ионно - плазменного распыления получены пленки окислов кремния переменного состава. Исследованы удельное сопротивление пленок  $\text{SiO}_x$ , диэлектрические свойства этих пленок ( $\epsilon$ ,  $\text{tg}\delta$ ) в зависимости от скорости напыления и давления остаточных газов. Используя метод высокочастотных вольтфарадных характеристик (ВФХ), определены величины фиксированного заряда ( $Q_s=5.6 \cdot 10^{12} \div 2.7 \cdot 10^{12}$  Кл·см<sup>-2</sup>) и плотность поверхностных состояний ( $N_{ss}=9 \cdot 10^{11} \div 2.5 \cdot 10^{12}$  эВ<sup>-1</sup>·см<sup>-2</sup>) на границе  $\text{SiO}_x$ - Si для пленок переменного состава ( $x=1.05\div 1.5$ ). Показана возможность применения пленок переменного состава  $\text{SiO}_x$  в качестве просветляющих покрытий для кремниевых солнечных элементов (СЭ).

It is shown, that a films of oxides  $\text{SiO}_x$  of variable composition ( $x=1.05\div 1.5$ ), obtained by high-frequency plasma ion sputtering of silicon possess high adhesive properties in comparison with vacuum evaporation. Are investigated specific resistance of  $\text{SiO}_x$  films, their dielectric permittivity ( $\epsilon$ ) and dissipation factor ( $\text{tg}\delta$ ), depending on velocity of evaporation and pressure of residual gases. From measurements high-frequency voltfarad characteristics formed MDM and MDS-structures are determined sizes of the fixed charge ( $Q_s=5.6 \cdot 10^{12} \div 2.7 \cdot 10^{12}$  Кл·см<sup>-2</sup>) and the density of surface states on boundary  $\text{SiO}_x$ - Si ( $N_{ss}=9 \cdot 10^{11} \div 2.5 \cdot 10^{12}$  eV<sup>-1</sup>·см<sup>-2</sup>). It is shown on opportunity of application films of oxides  $\text{SiO}_x$  variable composition as clarifying coverings for silicon solar cells (SC).

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что повышение коэффициента полезного действия солнечных элементов, в основном, определяется возможностями снижения потерь на отражение от поверхности кремния. Эффективным способом уменьшения потерь на отражение является нанесение просветляющих слоев / 1-3 /.

В настоящее время для просветления поверхности кремниевых СЭ широко применяются однослойные и двухслойные покрытия на основе ZnS и  $\text{SiO}_2$ , получаемые методом резистивного напыления. Существенным условием для возможности длительной эксплуатации СЭ при возникновении неблагоприятных внешних факторов является повышенное требование к адгезии просветляющих покрытий, наносимых на кремниевые СЭ. С этой точки зрения перспективным методом служит ионно- плазменное распыление.

Была разработана технология получения однослойных покрытий на основе пленок переменного состава  $\text{SiO}_x$  ( $x=1.05\div 1.5$ ) указанными выше способами. Методами фотолитографии получены МДМ и МДП структуры со слоями окисла переменного состава  $\text{SiO}_x$  и исследованы их электрические и диэлектрические свойства.

### ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПЛЕНОК $\text{SiO}_x$

Диэлектрические пленки  $\text{SiO}_x$  переменного состава были получены резистивным испарением порошка монокристаллического кремния на различные подложки. Состав пленок изменялся варьированием скорости напыления, давлением остаточных газов, а также дозированным введением кислорода в камеру через натекагель.

В качестве подложек использовались полированные пластины кремния, кварца и ситалла, предварительно подвергнутые химической обработке. В процессе напыления подложки нагревались до температуры 150<sup>0</sup>С. Толщина пленок, осажденных на подложку, контролировалась с помощью кварцевых электронных микровесов, встроенных в вакуумную установку УВН-71 П и измерением на интерференционном микроскопе МИИ-4.

Наряду с резистивным распылением, был использован метод высокочастотного ионно- плазменного распыления, позволяющий получать пленки  $\text{SiO}_x$ , характеризующиеся высокими адгезионными свойствами. Пленки  $\text{SiO}_x$  переменного состава были получены распылением монокристаллического p- Si с  $\rho=10$  Ом·см в аргоно-кислородной смеси. Кислород и аргон подавались в объем камеры через вакуумный

тройник с двумя игольчатыми натекателями, имеющими электромагнитные клапаны, позволяющие прекрывать поступление газа в камеру.

Методом фотолитографии были получены МДМ и МДП сэндвич структуры с различной толщиной пленок SiO<sub>x</sub>. В качестве подложки был использован монокристаллический n-Si с ρ=10 Ом·см. Оба контакта создавались резистивным напылением алюминия толщиной 300-500 нм. Площади верхних контактов имели размеры 0.85; 1.4 и 2.3 мм<sup>2</sup>. Для устранения краевых эффектов, из предварительно нанесенных резистивным методом пленок SiO<sub>x</sub> (x=1.5) толщиной 0.4 мкм, создавались охранные кольца.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

Известно, что исследование квазистатических характеристик полупроводниковых структур позволяет определить их важнейшие параметры, что необходимо при конструировании различных приборов на их основе. Этот интерес не ослабевает и на сегодняшний день [4,5].

Вольтфарадные характеристики и диэлектрические свойства полученных МДП и МДМ структур исследовались на мосте полной проводимости МПП-300 (f=0.2-700кГц) и измерителе диэлектрической постоянной и угла потерь Т9701 (f=0.05 -300кГц).

Толщина пленки, определенная интерференционным методом на микроскопе МИИ-4 по высоте ступеньки, образованной между поверхностями пленки и подложки, была равна d= (100÷500)±20 нм.

Измерения показали, что наблюдается линейная зависимость удельной емкости МДП- структур от величины 1/d, что указывает на однородность пленок по толщине (рис.1), а отсутствие зависимости диэлектрической проницаемости ε и угла потерь tgδ от площади верхнего контакта указывает на однородность пленок по площади.

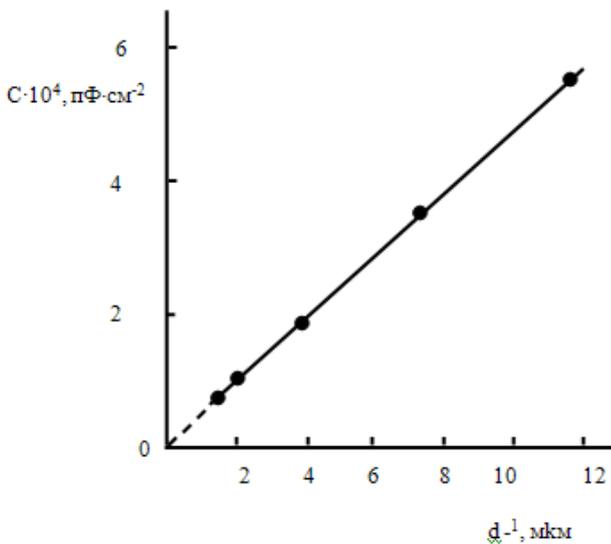


Рис. 1. Зависимость удельной емкости пленки SiO<sub>x</sub> от величины обратной толщине пленки.

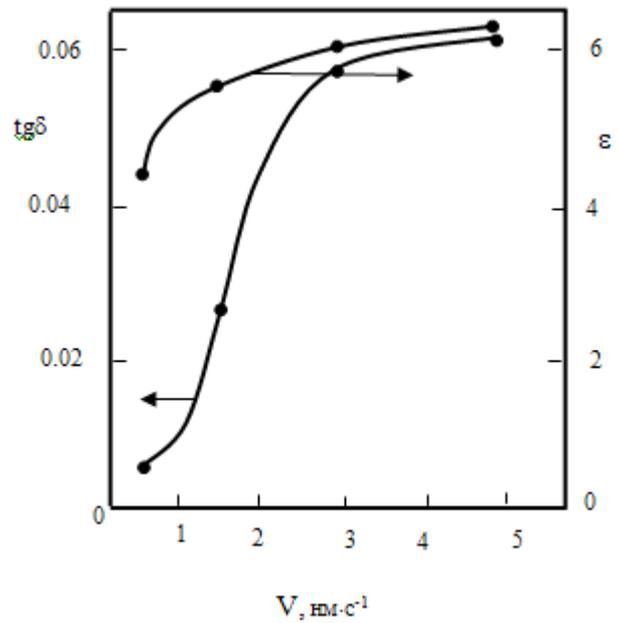


Рис. 2. Зависимость диэлектрической проницаемости ε и тангенса угла диэлектрических потерь tgδ пленок SiO<sub>x</sub> от скорости напыления.

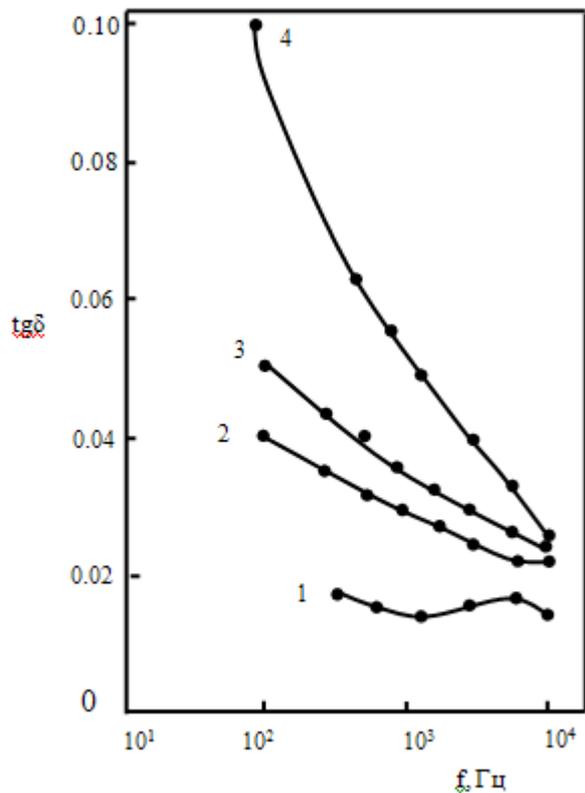


Рис. 3. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь пленок SiO<sub>x</sub>, полученных при разных скоростях напыления : 1- 0.5 , 2- 1.5, 3 – 3 .0, 4- 5 нм·с<sup>-1</sup>

Измерения физических параметров тонких пленок SiO<sub>x</sub> проводились в условиях равных толщин пленок, напыляемых с различной скоростью V =0.5÷5 нм·с<sup>-1</sup>.

С увеличением скорости напыления V (уменьшением x) наблюдается рост tgδ (рис.2). Аналогичная, но слабо выраженная зависимость наблюдается и для диэлектрической проницаемости. Такое поведение ε и tgδ

по-видимому, связано с понижением концентрации кислорода в пленках, вследствие уменьшения времени взаимодействия атомов распыляемого вещества с остаточным кислородом.

Удельное сопротивление пленок SiO<sub>x</sub>, полученных резистивным методом, с ростом скорости напыления ( $V = 0.5 \div 5 \text{ нм} \cdot \text{с}^{-1}$ ) уменьшается от  $3 \cdot 10^{10}$  до  $3 \cdot 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  (измерения проводились при частоте переменного сигнала  $f = 1 \text{ кГц}$ )

Диэлектрические параметры пленок, имеющих различный состав, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Состав x	Скорость напыления V, нм·с <sup>-1</sup>	tgδ	ε
1.05	5	0.06-0.07	5.5-6.5
1.17	3	0.06-0.07	5.5-6.5
1.25	1.5	0.02-0.08	5.0-6.0
1.40	0.5	0.005-0.01	4.0-4.5

С увеличением скорости напыления ( $V = 0.5 \div 5 \text{ нм} \cdot \text{с}^{-1}$ ) в зависимости от частоты переменного сигнала наблюдается значительное возрастание tgδ (рис. 3).

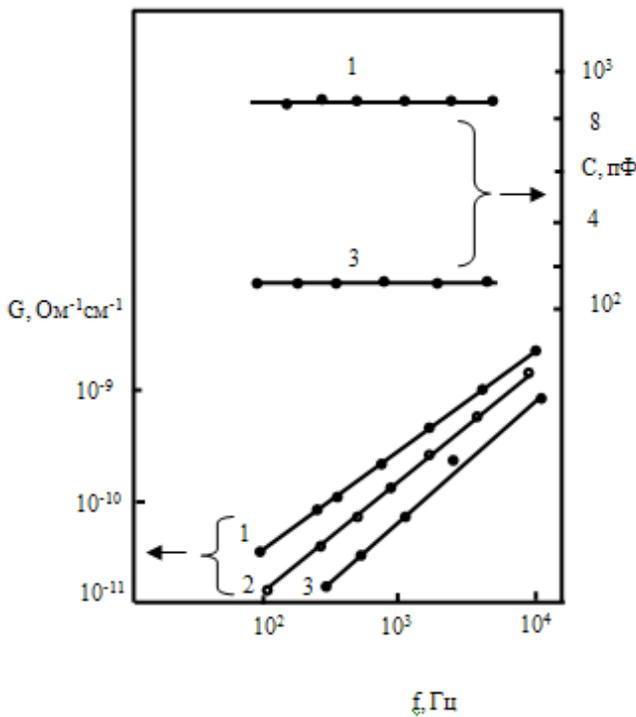


Рис. 4. Зависимость емкости и проводимости пленок SiO<sub>x</sub>, полученных резистивным напылением, от частоты переменного сигнала (1-x = 1.1, 2- x = 1.25, 3 - x = 1.4)

Для пленок SiO<sub>x</sub> всех составов наблюдается степенная зависимость проводимости от частоты ( $f$ )  $G \sim f^n$ , где  $n \sim 0.8$  характерна для прыжкового механизма проводимости. Степенная зависимость  $G$  от частоты (рис. 4) наблюдается также для пленок SiO<sub>x</sub>, полученных высокочастотным распылением, при этом величина емкости незначительно изменяется с ростом частоты.

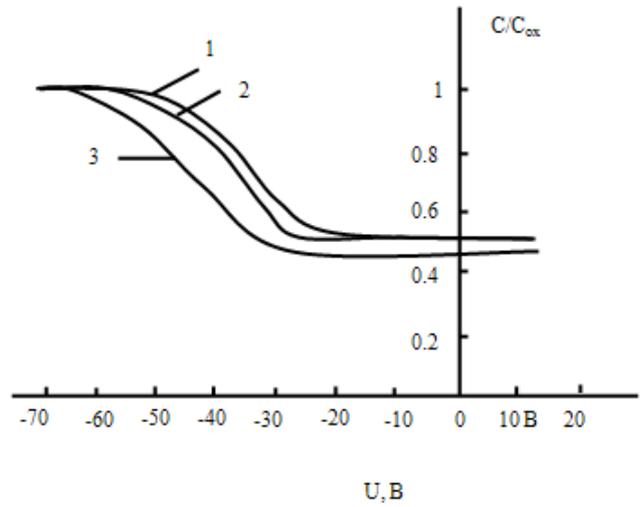


Рис. 5. Зависимость приведенной высокочастотной емкости МДП –структур на основе пленок SiO<sub>x</sub>, полученных резистивным напылением, от приложенного напряжения (1-x= 1.4, 2- x =1.25, 3 -x = 1.1)

ВФХ МДП – структур на основе пленок SiO<sub>x</sub> переменного состава, полученных резистивным напылением и измеренная при высоких частотах, представлена на рис. 5. Наблюдаемый сдвиг ВФХ в сторону отрицательных напряжений указывает на наличие на границе SiO<sub>x</sub> - Si положительного фиксированного заряда Q<sub>s</sub>. Величина фиксированного заряда Q<sub>s</sub> и плотность поверхностных состояний N<sub>ss</sub>, вычисленные из измерений зависимости C(U), составляют  $Q_s = 5.6 \cdot 10^{12} \div 2.7 \cdot 10^{12} \text{ Кл} \cdot \text{см}^{-2}$  и  $N_{ss} = 9 \cdot 10^{11} \div 2.5 \cdot 10^{12} \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$  для составов  $x = (1.05 \div 1.5)$ . При расчетах величины фиксированного заряда было использовано значение работы выхода Al и Si  $\phi_{ms} = 0.9 \text{ эВ}/6/$ .

Наблюдаемое возрастание Q<sub>s</sub> с уменьшением концентрации кислорода в пленках SiO<sub>x</sub> указывает на определяющую роль в формировании фиксированного заряда избыточного кремния [7, 8].

В МДП – структурах, в которых окисел SiO<sub>x</sub> получен высокочастотным ионно-плазменным распылением, не наблюдалось изменение емкости с приложенным напряжением, что обусловлено наличием большой плотности поверхностных состояний ( $N_{ss} \geq 10^{13} \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ ), экранирующих объем кремния. Последнее, по-видимому, связано с повреждением поверхности кремния в процессе облучения и бомбардировки ионами и вторичными электронами.

Как уже отмечалось, пленки переменного состава SiO<sub>x</sub>, полученные высокочастотным ионно-плазменным распылением, имеют высокую степень адгезии к подложке и их можно использовать в качестве просветляющих однослойных покрытий для кремниевых солнечных элементов.

Для определения эффективности однослойных покрытий SiO<sub>x</sub>, нанесенных на кремниевые солнечные элементы, были измерены величины токов короткого замыкания ( $I_{к.з.}$ ) и напряжений холостого хода ( $U_{хх}$ ) до и после просветления. Было показано, что нанесение просветляющего покрытия SiO<sub>x</sub> ( $x = 1.4$ ) с показателем преломления  $n = 2$  и толщиной пленки 70 нм позволяет

повысить коэффициент полезного действия кремниевого солнечного элемента на 25%.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Таким образом, показано, что пленки окислов переменного состава SiO<sub>x</sub> (x=1.05÷1.5), полученные высокочастотным ионно-плазменным распылением, обладают высокими адгезионными свойствами по сравнению с резистивно напыленными.

Исследованы удельное сопротивление этих пленок, их диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon$ ) и тангенс угла

диэлектрических потерь ( $\operatorname{tg}\delta$ ) в зависимости от скорости напыления и давления остаточных газов.

Из измерений высокочастотных вольтфарадных характеристик изготовленных МДМ и МДП-структур определены величины фиксированного заряда ( $Q_s = 5.6 \cdot 10^{12} \div 2.7 \cdot 10^{12}$  Кл·см<sup>-2</sup>) и плотность поверхностных состояний ( $N_{ss} = 9 \cdot 10^{11} \div 2.5 \cdot 10^{12}$  эВ<sup>-1</sup>см<sup>-2</sup>) на границе SiO<sub>x</sub>-Si (x=1.05÷1.5). Показана возможность применения пленок переменного состава SiO<sub>x</sub> в качестве просветляющих покрытий для кремниевых солнечных элементов (СЭ).

- 
- [1]. Дж.Твайдел, А.Уэйр Возобновляемые источники энергии, М., Энергоатомиздат, 1990, 392 с.
- [2]. В.М.Андреев, В.А.Гриликес Фотоэлектрические преобразователи концентрационного солнечного излучения, Л., Наука, 1989, 310с.
- [3]. С. Зи Физика полупроводниковых приборов, ч.2, М., Мир, 1984, 456 с.
- [4]. J.Dokme, S.Altundal Зависимость ВФХ и характеристик кондактанс - напряжение конденсаторов Al-SiO<sub>2</sub>- nSi от частоты. Physica B, 2007, 391, №1, с.59-67
- [5]. А.Г.Ждан, Н.Ф.Кухарская, Т.В.Чучева Определение абсолютной величины поверхностного потенциала полупроводника по квазистатическим ВФХ-ам МДП структуры, ФТП, 2003, т.37, №6, с.686-691
- [6]. H.Goronkin Origin of the fixed charge in internally oxidized silicon. J. Electrochem Soc 124, 1977, №2, p.314
- [7]. Y.S.Cheng, Electronic states of the silicon- silicon dioxide interface. Progr. Surface Sci.8, 1977, №1, p.181
- [8]. W.M.Werner. The work function difference of the MOS- system with aluminium field plates and polycrystalline silicon field plates. Sol. Stat. Electron., 17, 1974, №8, p.769