

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК ИТО, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Г.В. Юрченко

Харьковский государственный политехнический университет, г. Харьков, Украина

Исследовались кристаллическая структура, электрические и оптические свойства пленок ИТО, полученных при температурах подложки от 200 до 500°C путем прямого нереактивного магнетронного распыления механической смеси содержащей 95 мас.% In_2O_3 и 5 мас.% SnO_2 . Пленки ИТО, осажденные при температуре подложки 300°C, текстурированы в направлении [400] и имеют минимальный уровень микродеформаций и обладают оптимальным сочетанием оптических и электрических свойств.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время тонкие пленки ИТО, полученные методом магнетронного распыления, привлекают внимание исследователей благодаря уникальному сочетанию низкой удельной электропроводности и высокой прозрачности в видимом диапазоне [1]. Такие пленки используются либо в конструкции фронтально-барьерных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) в качестве верхних прозрачных, проводящих электродов, либо в конструкции тыльно-барьерных ФЭП, где они являются пленочным широкозонным «окном», на которое затем осуществляется нанесение базовых слоев. В первом случае температура подложки при формировании слоя ИТО определяет интенсивность межфазного взаимодействия с нижележащим базовым слоем. Во втором случае, при формировании тыльнобарьерных ФЭП, температура подложки при получении пленок ИТО влияет на характер изменения их оптоэлектрических свойств при последующем высокотемпературном формировании приборной структуры в целом. Следовательно, температура формирования слоя ИТО оказывает влияние на эффективность фотоэлектрических процессов ФЭП.

Таким образом, исследование влияния температуры подложки на кристаллическую структуру, оптические и электрические свойства слоев ИТО является актуальной задачей при оптимизации верхних прозрачных электродов и широкозонных «окон» для высокоэффективных пленочных ФЭП различных конструктивно-технологических решений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБСУЖДЕНИЕ

Пленки ИТО осаждались на подложки из оптического стекла К8 методом нереактивного магнетронного распыления мишеней $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ (95/5 мас. %) при постоянном токе. Мощность разряда составляла 100 Вт. Поликристаллические пленки ИТО толщиной $t=0.60\text{...}0.67$ мкм были получены при варьировании температуры подложки (T_s) от 200 до 500°C.

Путем аналитической обработки дифракционных линий определялся размер области когерентного рассеивания (L) и уровень микродеформации (ϵ) в полученных слоях ИТО.

Величина удельного электросопротивления (ρ) исследуемых слоев определялась четырехзондовым методом с линейным расположением контактов. Концен-

трация (n) и подвижность (μ) основных носителей заряда рассчитывалась на основании измерений ЭДС Холла [2]. Коэффициент пропускания пленок ИТО (T) измерялся с помощью двухканального спектрофотометра в диапазоне длин волн 400...850 нм.

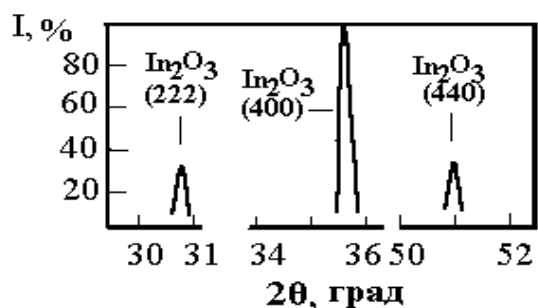
Дифрактометрический анализ пленок ИТО, полученных при различных температурах подложки показал, что во всех исследованных пленках идентифицировалась только фаза In_2O_3 кубической модификации. Пленки были текстурированы в направлении [400] (см. рисунок).

Анализ размеров областей когерентного рассеивания (ОКР) и уровня микродеформаций показывает, что наибольшим размером ОКР $L=650\text{Å}$ обладали пленки ИТО, полученные при температуре подложки 400°C. Дальнейшее увеличение температуры подложки до 500°C приводит к снижению L до 350Å. Минимальный уровень микродеформации $\epsilon=0,3510^{-3}$ имели пленки полученные при температуре подложки 300°C. Уменьшение температуры подложки до 200°C и увеличение температуры подложки до 500°C приводит к возрастанию уровня микродеформации примерно в два раза.

Результаты исследований оптических и электрических свойств пленок ИТО в зависимости от температуры подложки при осаждении представлены в таблице.

Анализ полученных результатов показывает, что с ростом температуры подложки от 200 до 400°C происходит монотонное уменьшение удельного электросопротивления от $6,4 \cdot 10^{-4}$ до $1,9 \cdot 10^{-4}$ Ом·см. Холловские измерения концентрации и подвижности основных носителей заряда свидетельствуют о том, что наблюдаемое уменьшение μ обусловлено, в основном, увеличением n от $3,9 \cdot 10^{20}$ до $9,1 \cdot 10^{20}$ см⁻³. При этом μ возрастает от 25 см²/В·с при $T_s=200^\circ\text{C}$ до 43 см²/В·с при $T_s=300^\circ\text{C}$, а затем начинает уменьшаться до 36 см²/В·с при $T_s=400^\circ\text{C}$. Дальнейшее увеличение температуры подложки от 400 до 500°C приводит к увеличению величины удельного электросопротивления от $1,9 \cdot 10^{-4}$ до $2,9 \cdot 10^{-4}$ Ом·см, что связано с одновременным уменьшением концентрации и подвижности основных носителей заряда.

Во всем исследуемом интервале изменений температуры подложки средняя величина прозрачности в видимом диапазоне монотонно уменьшается с 91% при $T_s=200^\circ\text{C}$ до 83% при $T_s=500^\circ\text{C}$.



Рентгendifрактограмма пленок ИТО при $T_s=300^\circ\text{C}$

Оптические и электрические свойства пленок ИТО

$T_s, ^\circ\text{C}$	$t, \text{мкм}$	$T, \%$	$\rho, \text{Ом}\cdot\text{см} \cdot 10^{-4}$	$n, \text{см}^{-3} \cdot 10^{20}$	$\mu, \text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$
200	0.65	91	6.4	3.9	25
250	0.66	90	3.2	5.2	37
300	0.61	88	2.1	6.9	43
350	0.60	87	2.0	8.3	38
400	0.67	86	1.9	9.1	36
450	0.63	84	2.4	8.6	30
500	0.61	83	2.9	8.1	27

Все наблюдаемые при увеличении T_s изменения электрических свойств исследуемых пленок ИТО могут быть объяснены на основе существующих представлений о влиянии состава и структуры поликристаллических слоев ИТО на их электрические характеристики. Известно [4], что в пленках ИТО не все атомы Sn находятся в электрически активном состоянии: являются четырехвалентными и при этом замещают атомы In в кристаллической решетке соединения In_2O_3 [4]. Часть атомов олова находится в электрически не активном двухвалентном состоянии, либо в четырехвалентном состоянии, но занимают междоузлья и границы зерен поликристаллической пленки. Согласно результатам структурных исследований, увеличение температуры подложки при получении пленок ИТО до 400°C приводит к увеличению размеров области когерентного рассеивания, что обуславливает снижение концентрации атомов олова, находящихся в электрически не активном состоянии на зернограничной поверхности, и увеличение концентрации атомов олова в объеме зерна в электрически активном состоянии. Известны также литературные данные [4], которые свидетельствуют о том, что увеличение температуры подложки при получении пленок ИТО обуславливает уменьшение доли атомов олова в электрически не активном двухвалентном состоянии. Поэтому, очевидно, что рост температуры подложки до 400°C при получении исследуемых пленок ИТО также может приводить к аналогичным процессам, которые в конечном итоге, способны вызывать увеличение концентрации основных носителей заряда, что и наблюдалось экспериментально в исследуемых слоях. Рост структурного совершенства пленок при увеличении температуры подложки приводит к уменьшению скорости поверхностной и объемной рекомбинации, что вызывает экспериментально наблюдаемый рост подвижности основных носителей заряда. В пленках ИТО с ростом

температуры подложки до 300°C подвижность основных носителей заряда возрастала, что находится в хорошем соответствии с результатами структурных исследований, учитывая то обстоятельство, что минимальный уровень микродеформаций наблюдался в слоях полученных при температуре подложки 300°C .

Уменьшение концентрации и подвижности основных носителей заряда в результате снижения размеров областей когерентного рассеивания при увеличении температуры подложки свыше 400°C можно связать с дроблением областей когерентного рассеивания из-за диффузии неконтролируемой акцепторной примеси (например, Na) из стеклянной пластины в растущий поликристаллический слой ИТО. Кроме того, рост неконтролируемой акцепторной примеси в пленке ИТО вызывает увеличение рассеивания основных носителей заряда (электронов) и их частичную компенсацию. Подобное поведение подвижности и концентрации основных носителей заряда с ростом температуры подложки наблюдали авторы [4], которые интерпретировали наблюдаемые закономерности аналогичным способом.

Для нахождения оптимальных условий получения прозрачных и проводящих пленок ИТО оценивалось значение фактора качества $\Phi_{is}=\Gamma^{10}\cdot t/\rho$ [1]. Максимальное значение фактора качества $\Phi_{is}=8,2\cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1}$ наблюдалось в пленках полученных при температуре подложки 300°C .

ВЫВОДЫ

Было установлено, что температура подложки при формировании поликристаллических пленок ИТО методом прямого неактивного магнетронного распыления определяет соотношение между количеством атомов олова находящихся в электрически неактивном и электрически активном состояниях.

Показано, что при температурах подложки 300°C формируются текстурированные в направлении [400] пленки ИТО, обладающие оптимальными оптоэлектрическими характеристиками: удельное электросопротивление пленок толщиной 0,61 мкм составляет $2,1\cdot 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ при средней прозрачности в видимом диапазоне 88 %, что определяет критерий качества на уровне $8,2\cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. Чопра, С. Дас. *Тонкопленочные солнечные элементы*. Москва: «Мир», 1986, 440 с.
2. Л.П. Павлов. *Методы измерения параметров полупроводниковых материалов*. Москва: «Высшая школа», 1987, 239 с.
3. O. Marcovitch, Z. Klein, I. Lubezky Transparent conductive indium oxide film deposited on low temperature substrates by activated reactive evaporation // *Applied Optics*. 1989, vol. 28(14), p.2792-2795.
4. N. Balasubramanian, A. Subrahmanyam. Electrical and optical properties of reactively evaporated indium tin oxide (ITO) films dependence on substrate temperature and tin concentration // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1989, vol. 22, p.206-209.