

3.7. ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГИИ ФАКЕЛА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛЕНОК $\text{SnO}_2\text{:Sb}$ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ БЕЗКАПЕЛЬНОГО МЕТОДА ИЛО

Материалы статьи были доложены на 22 Международной конференции по лазерным технологиям (ALT'14) (6-10 октября, г. Касис, Франция)

Паршина Любовь Сергеевна, научный сотрудник лаборатории наноструктур и тонких пленок, кандидат физико-математических наук. Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН. E-mail: ParshinaLiubov@mail.ru

Новодворский Олег Алексеевич, заведующий лабораторией наноструктур и тонких пленок, доктор физико-математических наук. Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН. E-mail: onov@mail.ru

Храмова Ольга Дмитриевна, старший научный сотрудник, кандидат химических наук. Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН. E-mail: Okhram48@mail.ru

Петухов Илья Андреевич, аспирант Факультета наук о материалах МГУ им. М.В. Ломоносова. E-mail: ilya.petukhov.lssm@gmail.com

Лотин Андрей Анатольевич, научный сотрудник лаборатории наноструктур и тонких пленок, кандидат физико-математических наук. Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН. E-mail: Lotin_82@mail.ru

Михалевский Владимир Александрович, аспирант Института проблем лазерных и информационных технологий РАН. E-mail: uhr@inbox.ru

Шорохова Анна Владимировна, младший научный сотрудник лаборатории наноструктур и тонких пленок. Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН. E-mail: av.shor@yandex.ru

Аннотация: Задача: Пленки прозрачных проводящих оксидов широко используются в качестве прозрачных высокопроводящих тонкопленочных материалов для применения в различных областях, таких как солнечные элементы [1], газовые сенсоры [2], оптоэлектронные устройства, высокотемпературные зеркала [3] и плоско-панельные дисплеи. Пленки оксида олова, легированные сурьмой, обладают более высокой термической и химической стабильностью по сравнению с пленками оксида индия, легированными оловом, а также механической прочностью, что позволяет им выдерживать воздействия окружающей среды, при которых работают солнечные элементы. Разработка новых оптоэлектронных приборов на гибких подложках, а также устройств органической электроники выдвигает повышенные требования к качеству и условиям синтеза таких соединений: необходимо обеспечить получение высокого коэффициента пропускания в видимой области спектра и низкого удельного сопротивления при температурах подложки не более 150°C в процессе получения. Целью настоящей работы было получение методом импульсного лазерного осаждения (ИЛО) в бескапельном режиме на подложках из кварцевого стекла тонких пленок $\text{SnO}_2\text{:Sb}$, при различных условиях осаждения без последующего отжига и исследование структурных, электрических и оптических свойств полученных тонких пленок $\text{SnO}_2\text{:Sb}$.

Методология: Метод ИЛО обладает определенными преимуществами по сравнению с другими методами получения тонких многокомпонентных оксидных пленок. Состав пленок, выращенных методом ИЛО, благодаря неравновесным условиям осаждения, полностью воспроизводит состав компонентов мишени. Пленки, полученные методом ИЛО, кристаллизуются при более низких температурах подложки по сравнению с другими физическими методами парового осаждения благодаря высоким кинетическим энергиям (> 1 эВ) ионизированных инжектированных частиц в создаваемой лазерной плазме. Возможность управления энергетическим спектром факела позволила исследовать особенности роста и управления свойствами выращиваемых пленок.

Результаты: На подложках кварцевого стекла без последующего отжига получены тонкие пленки $\text{SnO}_2\text{:Sb}$ методом импульсного лазерного осаждения со скоростной сепарацией частиц при различных условиях осаждения в диапазоне плотности энергии на мишени от $3,4 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$ до $6,8 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$. Минимум удельного сопротивления $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом см}$ получен при плотности энергии $4,6 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$, температуре подложки 300°C и давлении кислорода 20 мТорр и концентрации сурьмы в пленке $2 \text{ ат.}\%$. Средний коэффициент пропускания в видимой области спектра таких пленок составил 85% , а оптическая ширина запрещенной зоны $5,3 \text{ эВ}$. Шероховатость пленок не превышала 30 нм .

Обсуждение результатов: Получены тонкие пленки $\text{SnO}_2\text{:Sb}$ методом импульсного лазерного осаждения в бескапельном режиме на подложках из кварцевого стекла без последующего отжига. Исследованы струк-

турные, электрические и оптические свойства пленок, полученных при различных условиях осаждения. Установлено, что плотность энергии на мишени и уровень легирования пленок SnO_2 сурьмой влияют на их пропускание и проводимость. Определены оптимальные условия получения пленок бескапельным методом ИЛО с точки зрения высокой прозрачности в видимой области спектра и хорошей проводимости. Установлено влияние уровня легирования на характеристики пленок (проводимость, прозрачность, фазовый состав и морфологию пленок). Определены оптимальные условия получения пленок $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ с точки зрения высокой проводимости и прозрачности в видимой области спектра при максимально низкой температуре подложки, что очень важно для напыления таких пленок на гибкие органические подложки.

Практическое значение: Использование метода импульсного лазерного осаждения (ИЛО) обеспечивающего увеличение энергии частиц в плазменном факеле при синтезе тонких пленок, позволит наносить эти материалы на гибкие полимерные органические подложки благодаря существенному снижению температуры кристаллизации пленок. Получен и исследован новый материал для прозрачных электродов и p-n-переходов на их основе, который необходим для разработки оптоэлектронных приборов.

Ключевые слова: прозрачные проводящие пленки, бескапельное импульсное лазерное осаждение, энергия частиц факела

3.7. INFLUENCE OF THE PLUME ENERGY ON THE $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ FILMS CHARACTERISTICS BY USING THE PLD DROPLET-FREE METHOD

Parshina Liubov S., Scientific Researcher of laboratory of nanostructures and thin films, Ph.D. in Physics and Mathematical Sciences. Institute on Laser and Information Technologies of RAS. E-mail: ParshinaLiubov@mail.ru

Novodvorsky Oleg A., chief of laboratory of nanostructures and thin films, doctor of Physics and Mathematical Sciences. Institute on Laser and Information Technologies of RAS. E-mail: onov@mail.ru

Khramova Olga D., senior research associate, candidate of Chemistry, Institute on Laser and Information Technologies of RAS. E-mail: Okhram48@mail.ru

Petukhov I'ya A., postgraduate student of Materials Science Faculty of Lomonosov Moscow State University. E-mail: ilya.petukhov.lssm@gmail.com

Lotin Andrey A., Scientific Researcher of laboratory of nanostructures and thin films, Ph.D. in Physics and Mathematical Sciences. Institute on Laser and Information Technologies of RAS. E-mail: Lotin_82@mail.ru

Mikhalevskiy Vladimir A., postgraduate student of Institute on Laser and Information Technologies of RAS. E-mail: uhr@inbox.ru

Shorokhova Anna V., associate scientific researcher of laboratory of nanostructures and thin films. Institute on Laser and Information Technologies of RAS. E-mail: av.shor@yandex.ru

Abstract: Problem: The films of the transparent conductive oxides widely are used as transparent high-conductivity thin-film materials for application in various areas, such as solar elements [1], gas sensors [2], optoelectronic devices, high-temperature mirrors [3] and flat panel displays. The tin oxide films alloyed by antimony possess higher thermal and chemical stability in comparison with, the oxide films alloyed by tin, and also mechanical durability that allows them to maintain influences of environment at which solar elements work. Development of new optoelectronic devices on flexible substrates, and also devices of organic electronics makes increased requirements to quality and conditions of synthesis of such compounds: it is necessary to provide high coefficient of a transmission in visible area of the spectrum and low specific resistance at temperatures of substrate no more than 150°C in the course of receiving. Receiving by method of the pulse laser deposition (PLD) in the droplet-free regime on substrates from quartz glass of thin films of $\text{SnO}_2:\text{Sb}$, under various conditions of deposition without the subsequent annealing and research of structural, electric and optical properties of the received thin films of $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ was the purpose of the real work.

Methodology: The PLD method has certain advantages in comparison with other methods of receiving thin multicomponent oxidic films. The composition of the films which are grown up by the PLD method thanks to nonequilibrium conditions of deposition, completely reproduces the composition of components of a target. The films received by the PLD method crystallize at lower temperatures of a substrate in comparison with other physical methods of steam deposition, thanks to high kinetic energy ($>1 \text{ эВ}$) the ionized injected particles in the created laser plasma. Possibility of direction of a power spectrum of a plume allowed to investigate features of growth and direction of properties of the grown-up films.

Results: On substrates of quartz glass without the subsequent annealing thin films of SnO₂:Sb by method of pulse laser deposition with high-speed separation of particles are received under various conditions of deposition in the energy density range on a target from 3,4 J · cm⁻² to 6,8 J · cm⁻². The minimum of specific resistance 1,2 · 10⁻³ Ohms of cm is received at the density of energy of 4,6 J · cm⁻², temperature of a substrate 300 °C both oxygen 20 pressure mTopp and concentration of antimony in a film 2 at. %. The average coefficient of a transmission in visible area of a range of such films made 85%, and the optical band gap is 5,3 eV. The roughness of films didn't exceed 30 nanometers.

Discussion of results: Thin films of SnO₂:Sb by method of pulse laser deposition in the droplet-free regime on substrates from quartz glass without the subsequent annealing are received. Structural, electric and optical properties of the films received under various conditions of deposition are investigated. It is established that energy density on targets and level of an alloying of films of SnO₂ antimony influence their transmission and conductivity. Optimum conditions of receiving films by the PLD the droplet-free method from the point of view of high transparency in visible area of the spectrum and good conductivity are determined. Influence of level of an alloying on characteristics of films (conductivity, transparency, phase structure and morphology of films) is established. Optimum conditions of receiving films of SnO₂:Sb from the point of view of high conductivity and transparency in visible area of the spectrum at the lowest temperature of a substrate that is very important for the deposition of such films on flexible organic substrates are defined.

Practical importance: Use of a method of the pulse laser deposition providing increase in energy of particles in a plasma plume at synthesis of thin films will allow to apply these materials on flexible polymeric organic substrates thanks to essential decrease in temperature of crystallization of films. New material for transparent electrodes and p - n - transitions on their basis which is necessary for development of optoelectronic devices is received and investigated

Index terms: transparent conducting films, droplet-free pulse laser deposition, particles energy of a plume

Пленки прозрачных проводящих оксидов широко используются в качестве прозрачных высокопроводящих тонкопленочных материалов для применения в различных областях, таких как солнечные элементы [1], газовые сенсоры [2], оптоэлектронные устройства, высокотемпературные зеркала [3] и плоскостельные дисплеи. Наиболее широко для этих целей используются пленки оксида индия, легированные оловом, благодаря их уникальным оптическим и электрическим свойствам [4]. Существенным недостатком таких пленок является высокая стоимость. Пленки оксида олова, легированные сурьмой, обладают более высокой термической и химической стабильностью по сравнению с пленками оксида индия, легированными оловом, а также механической прочностью, что позволяет им выдерживать воздействия окружающей среды, при которых работают солнечные элементы [5]. SnO₂ является полупроводником n-типа с шириной запрещенной зоны 3,6 эВ. Нелегированные пленки диоксида олова обладают высоким коэффициентом пропускания в видимой области спектра, однако, низкой электронной проводимостью. Увеличения электронной проводимости пленок SnO₂ можно добиться легированием различными примесями и применением постростового отжига. Пленки оксида олова, легированные сурьмой, выращивают разными методами, такими как струйный пиролиз [6], химическое осаждение из газовой фазы [7], золь – гель метод [8], магнетронное распыление [9], импульсное лазерное осаждение (ИЛО) [5] и др. Метод ИЛО обладает некоторыми преимуществами по сравнению с другими методами получения многокомпонентных оксидных тонких пленок. Состав пленок,

выращенных методом ИЛО, полностью воспроизводит состав компонентов мишени [10]. Пленки, полученные методом ИЛО, кристаллизуются при более низких температурах подложки по сравнению с другими физическими методами парового осаждения благодаря высоким кинетическим энергиям (> 1 эВ) ионизированных инжектированных частиц в создаваемой лазерной плазме [11]. Кроме того, поверхность пленок прозрачных проводящих оксидов, выращенных методом ИЛО, может быть атомарно гладкой. Дальнейшее повышение качества пленок может быть достигнуто при обеспечении бескапельного режима осаждения с использованием механического сепаратора [12].

Целью настоящей работы было исследование структурных, электрических и оптических свойств тонких пленок SnO₂:Sb, выращенных методом ИЛО в бескапельном режиме на подложках из кварцевого стекла, при различных условиях осаждения без последующего отжига.

Тонкие пленки SnO₂:Sb были осаждены на подложки из кварцевого стекла KV-1, использовался Krf эксимерный лазер LPX 200 (длина волны 248 нм, длительность импульса 20 нс). Лазерное излучение с частотой следования импульсов 10 Гц фокусировалось при помощи линзы с фокусным расстоянием 25 см на вращающуюся мишень при угле падения излучения 45°. Плотность энергии лазерного излучения на поверхности мишени изменялась от 2 Дж · см⁻² до 10 Дж · см⁻². Между мишенью и подложкой, расстояние между которыми составляло 7 см, располагался механический сепаратор [12]. Пленки осаждались при температурах подложки в интервале от 25 °C до 600 °C и давлениях кислорода в вакуумной камере в диапазоне от 10 мТорр до 100

мТорр. Подложки из кварцевого стекла очищались в УЗ ванне по 10 минут в дистиллированной воде при температуре 60 °С и в ацетоне двойной перегонки при температуре 35 °С. Мишени были изготовлены из порошков SnO_2 (чистотой 99,99%) и Sb_2O_3 (чистотой 99,99%). Порошки тщательно перемешивались в агатовой ступке в течение часа, прессовались в таблетки диаметром 2 см с силой в 10 тонн и затем отжигались при 1000 °С на воздухе в течение 2 часов. Были получены керамические мишени $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ с концентрациями Sb от 0 ат. % до 8 ат. %.

Морфология поверхности полученных пленок $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ определялась с помощью сканирующего электронного микроскопа Carl Zeiss NVision 40 с использованием первичного электронного пучка с энергией 1 кэВ и атомно-силового микроскопа DME DualScope 2401. Толщину пленок $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ измеряли с помощью оптического интерферометра МИИ 4 ($\lambda = 543$ нм). Спектры пропускания пленок снимались спектрофотометром Cary 50 в диапазоне от 200 нм до 800 нм. Электрические свойства исследовались по четырех точечной схеме Ван-дер-Пау методом Холла в поле постоянного магнита 1 Тл на автоматизированной установке HSM 3000. Структурные характеристики пленок $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ исследовались с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН 3М (длина волны 1,5406 Å) и на многоцелевом рентгеновском дифрактометре D8 Discover Bruker AXS (длина волны 1,5406 Å).

Пленки $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ должны обладать высокой электронной проводимостью. Для того чтобы минимизировать удельное сопротивление пленок $\text{SnO}_2:\text{Sb}$, необходимо оптимизировать уровень легирования пленок, а также параметры импульсного лазерного осаждения, такие как температура подложки в процессе напыления, давление кислорода в вакуумной камере и плотность энергии на мишени. На рисунке 1 приведена зависимость удельного сопротивления пленок $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ от плотности энергии на мишени в процессе осаждения. Ранее нами было установлено, что состав пленок не зависит от плотности энергии лазерного излучения на мишени [13].

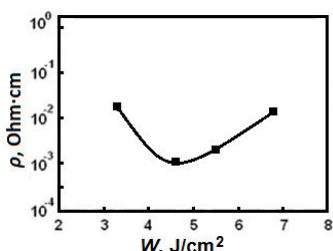


Рис. 1. Влияние плотности энергии на мишени в процессе роста пленок $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ методом ИЛО в бескапельном режиме на удельное сопротивление пленок.

Как видно из рис. 1 удельное сопротивление пленок $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ немонотонно изменяется при изменении плотности энергии на мишени от 3,4 Дж · см⁻² до 6,8 Дж · см⁻². Оптимальная энергия, при которой удельное

сопротивление минимально, составила 4,6 Дж · см⁻². Зависимость, приведенная на рис. 1, получена при температуре подложки 300 °С, давлении кислорода в камере 20 мТорр и концентрации сурьмы в пленке 2 ат. %. При двух различных плотностях энергии на мишени 6,8 Дж · см⁻² и 4,6 Дж · см⁻² определяли зависимость удельного сопротивления от уровня легирования, температуры подложки и давления кислорода в процессе напыления пленок. Результаты для пленок толщиной 100 нм представлены на рис. 2 а,б,с.

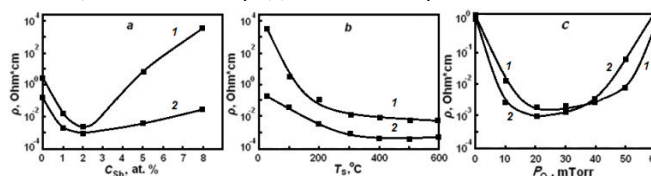


Рис. 2. Изменение удельного сопротивления как функция (а) уровня легирования сурьмой, (б) температуры подложки и (с) давления кислорода в процессе бескапельного осаждения пленок $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ методом ИЛО при различной плотности энергии на мишени: 1-6,8 Дж · см⁻², 2-4,6 Дж · см⁻². Толщина пленок составляла 100 нм.

Из рис. 2 видно, что кривые для плотности энергии 4,6 Дж · см⁻² лежат ниже при всех значениях концентрации сурьмы, температуры подложки и давления кислорода. Это подтверждает влияние плотности энергии на мишени на качество пленок. Следует отметить, что минимум удельного сопротивления (рис. 2 а) достигается при одном и том же значении концентрации сурьмы в пленке для обоих значений плотности энергии на мишени. Как видно из рис. 2 а, удельное сопротивление уменьшается с увеличением концентрации сурьмы в пленке, достигает минимума при концентрации сурьмы 2 ат. % ($\rho \sim 1,2 \cdot 10^{-3}$ Ом · см) и увеличивается с дальнейшим увеличением концентрации сурьмы в пленке. Причиной начального уменьшения сопротивления с увеличением уровня легирования является увеличение концентрации свободных носителей заряда, а именно донорных электронов при увеличении концентрации сурьмы. Это начальное увеличение плотности носителей в пленках $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ происходит из-за замены внедренными ионами Sb^{5+} катионных мест Sn^{4+} или внедрения ионов Sb в междоузлия. Однако после достижения минимума (2 ат. %) удельное сопротивление возрастает с увеличением уровня легирующей примеси. Как показано в работе [5], избыточное легирование сурьмой производит к образованию Sb_2O_3 , что формирует ионы Sb^{3+} , а они действуют подобно акцепторам и компенсируют донорные уровни, созданные ионами Sb^{5+} . Таким образом, избыток легирования сурьмой уменьшает концентрацию носителей в пленках и, следовательно, увеличивает удельное сопротивление.

Зависимости удельного сопротивления от температуры подложки в процессе напыления пленок $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ представлены на рис. 2 б. Пленки были получены при давлении кислорода 20 мТорр в процессе напыления,

с содержанием сурьмы 2 ат. %. Для обеих кривых удельное сопротивление с увеличением температуры подложки от 25 °С до 300 °С постепенно снижается и выходит на стационар при дальнейшем увеличении температуры $1,0 \cdot 10^{-2}$ Ом · см и $1,2 \cdot 10^{-3}$ Ом · см для кривых 1 и 2 соответственно. Начальное уменьшение удельного сопротивления с увеличением температуры подложки может быть объяснено улучшением кристалличности пленки. Рентгеновский дифракционный анализ (рис. 3) показал, что пленки, выращенные при низких температурах подложки (150 °С - 250 °С), были аморфные, в то время как пленки, выращенные при более высоких температурах (≥ 300 °С) имели поликристаллическую структуру.

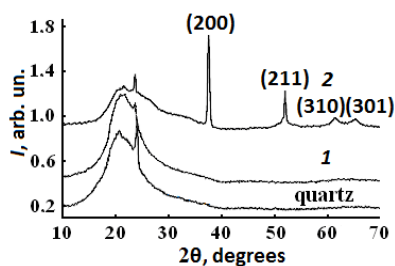


Рис. 3. Кривые θ - 2θ для пленок $\text{SnO}_2\text{:Sb}$, выращенных методом ИЛО в бескапельном режиме из мишени с содержанием сурьмы 2 ат. % при давлении кислорода 20 мТорр, оптимальной плотности энергии на мишени $4,6 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$ и температурах подложки: 1 – 200 °С и 2 – 300 °С в процессе осаждения. Толщина каждой пленки составляла 100 нм.

На рис. 2 с приведены зависимости удельного сопротивления от давления кислорода при напылении пленок $\text{SnO}_2\text{:Sb}$, для оптимальных условий (рис. 2 а, рис. 2 б), а именно, при содержании сурьмы 2 ат. % и температуре подложки 300 °С. Как видно из рис. 2 с, для обеих плотностей мощности на мишени удельное сопротивление немонотонно зависит от давления кислорода в процессе напыления пленки. Изначально удельное сопротивление уменьшается с увеличением давления кислорода, достигает минимума при давлении кислорода 20 мТорр и возрастает при дальнейшем увеличении давления для обеих кривых 1 и 2.

Был проведен рентгеноструктурный анализ пленок $\text{SnO}_2\text{:Sb}$, выращенных методом ИЛО при оптимальных условиях (рис. 1, рис. 2): уровень легирования сурьмой 2 ат. %, давление кислорода 20 мТорр, плотность энергии на мишени $4,6 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$. С целью выяснения температуры начала кристаллизации пленки осаждались при температурах подложки от 150 °С до 300 °С с шагом 50 °С. На рис. 3 представлены результаты рентгеноструктурного анализа кривые для пленок $\text{SnO}_2\text{:Sb}$, выращенных методом ИЛО при оптимальных условиях при температуре 200 °С и 300 °С. Из рентгеновских кривых видно, что пленка, напыленная при температуре подложки 200 °С, имеет аморфную структуру. Пленка, полученная при 300 °С имеет поликристаллическую структуру, о чем свидетельствует наличие фазы SnO_2 (пик 200).

Помимо хорошей электронной проводимости пленки $\text{SnO}_2\text{:Sb}$ должны обладать высоким коэффициентом

пропускания в видимой области спектра. Спектры пропускания пленок $\text{SnO}_2\text{:Sb}$ (толщиной 100 нм), полученных при давлении кислорода от 10 до 50 мТорр в процессе напыления, приведены на рис. 4. Средний коэффициент пропускания в видимой области спектра (400 нм – 700 нм) составил 85%. Из спектров пропускания определена ширина запрещенной зоны (E_g) путем проведения касательной к графику зависимости квадрата коэффициента поглощения (α^2) от энергии фотона ($h\nu$) [14]. Коэффициент поглощения определялся из уравнения:

$$\alpha = (1 - R) \times \ln [(1 - R) T^{-1}],$$

где T – оптическое пропускание, R – отражение, d – толщина пленки. Ширина запрещенной зоны пленок $\text{SnO}_2\text{:Sb}$ изменялась от 5,3 эВ до 6,5 эВ в зависимости от давления кислорода в процессе осаждения, что согласуется с результатами работы [15].

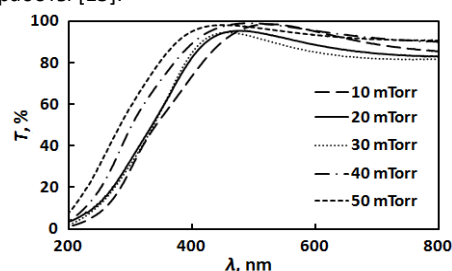


Рис. 4. Спектры пропускания пленок $\text{SnO}_2\text{:Sb}$ (толщиной 100 нм), полученных из мишени с содержанием 2 ат. % сурьмы при температуре подложки 300 °С, плотности энергии на мишени $4,6 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$ и разном давлении кислорода в процессе бескапельного ИЛО.

Морфология поверхности пленок $\text{SnO}_2\text{:Sb}$, исследовалась с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Продемонстрировано, что пленки, полученные в бескапельном режиме ИЛО, имеют однородную поверхность без капель (рис. 5). Шероховатость поверхности, определенная методом атомно-силовой микроскопии, составила 30 нм.

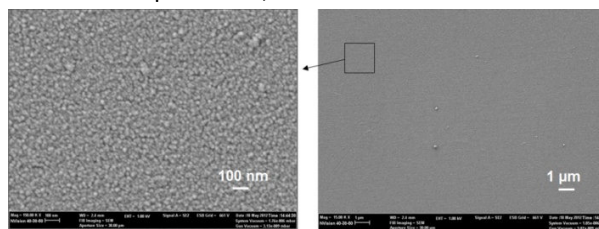


Рис. 5. СЭМ поверхности плёнки $\text{SnO}_2\text{:Sb}$ (толщиной 100 нм), полученной методом ИЛО в бескапельном режиме из мишени с содержанием 2 ат. % сурьмы при температуре подложки 300 °С, давлении кислорода 20 мТорр и оптимальной плотности энергии на мишени $4,6 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$ в процессе осаждения.

Таким образом, получены тонкие пленки $\text{SnO}_2\text{:Sb}$ методом импульсного лазерного осаждения в бескапельном режиме на подложках из кварцевого стекла без последующего отжига. Исследованы структурные, электрические и оптические свойства пленок, полученных при различных условиях осаждения. Установлено, что плотность энергии на мишени и уровень легирования пленок SnO_2 сурьмой влияют на их пус-

кание и проводимость. Определены оптимальные условия получения пленок бескапельным методом ИЛО с точки зрения высокой прозрачности в видимой области спектра и хорошей проводимости. Установлено, что минимум удельного сопротивления ($\rho \sim 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}$) пленок $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ достигается при температуре подложки 300 °С, давлении кислорода 20 мТорр, плотности энергии на мишени 4,6 Дж $\cdot \text{см}^{-2}$ и концентрации сурьмы в пленке 2 ат.%. Средний ко-эффект пропуска в видимой области спектра таких пленок составил 85%, а оптическая ширина за-прецессной зоны 5,3 эВ. Шероховатость пленок не превышала 30 нм.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 14-07-00408_а, 14-07-00688_а, 12-02-33022 мол_а_вед, 14-03-90004 Бел_а и Президентских грантов МК-6798.2013.9, МК-5538.2013.2.

Список литературы:

1. Goetzberger A. and Hebling C. // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2000. V. 62. P. 1.
2. Nelli P., Faglia G., Sverbeglieri G. et. al. // Thin Solid Films. 2000. V. 371. P. 249.
3. Frank G., Kaur E., and Kostlin H. // Sol. Energy Mater. 1983. V. 8. P. 387.
4. Зуев Д.А., Лотин А.А., Новодворский О.А. и др. // ФТП. 2012. Т. 46. № 3. С. 425.
5. Kima H. and Pique A. // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 84. №2. P. 218.
6. Elangovan E., Shivashankar S.A., and Ramamurthi K. // J. Cryst. Growth. 2005. V. 276. P. 215.
7. Arias A.C., Roman L.S., Kugler T. et. al. // Thin Solid Films. 2000. V. 371. P. 29.
8. Varghese O.K. and Malhotra L.K. // J. Appl. Phys. 2000. V. 87. P. 7457.
9. Stjerna B., Olsson E. and Granqvist C.G. // J. Appl. Phys. 1994. V. 76. P. 3797.
10. Лотин А.А., Новодворский О.А., Хайдуков Е.В. и др. // ФТП. 2010. Т. 44. № 2. С. 260.
11. Chrisey D.B. and Hubler G.K. Pulsed laser deposition of thin films. New York: John Wiley and Sons, 1994.
12. Новодворский О.А., Лотин А.А., Хайдуков Е.В. // Устройство для лазерно-плазменного напыления. Патент РФ на полезную модель. № 89906. Бюллетень № 35. Опубл. 20.12.2009.
13. Петухов И.А., Паршина Л.С., Зуев Д.А. и др. // Неорганические материалы. 2013. Т. 49. № 11. С. 1211.
14. Tauc J., Grigorovici R., and Vancu A. // Phys. Status Solidi. 1966. V. 15. P. 627.
15. Assia S., Ratiba O., Mahdi M.E. et. al. // International Journal of Chemical and Biological Engineering. 2009. V. 2:1. P. 48.

ОТЗЫВ

научного консультанта на статью Паршиной Л.С., Новодворского О.А., Храмовой О.Д., Петухова И.А., Лотина А.А., Михалевского В.А., Шороховой А.В. «Влияние энергии факела на характеристики пленок $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ при использовании бескапельного метода ИЛО»

Работа посвящена получению пленок прозрачных проводящих оксидов методом импульсного лазерного осаждения (ИЛО). Пленки прозрачных проводящих оксидов широко используются в качестве прозрачных высокопроводящих тонкопленочных покрытий в солнечных элементах, газовых сенсорах, оптоэлектронных устройствах, высокотемпературных зеркалах и в плоско-панельных дисплеях. В настоящее время для этих целей используются пленки оксида индия, легированные оловом. Однако, постоянное повышение цен на оксид индия в связи с ограниченностью разведанных запасов индия требует поиска новых материалов для прозрачных проводящих покрытий. Разработка новых прозрачных проводящих тонкопленочных покрытий, обеспечивающая повышение их экономических и эксплуатационных качеств, является актуальной задачей. Авторами получен и исследован новый материал $\text{SnO}_2:\text{Sb}$, который может применяться для прозрачных электродов и р-п-переходов на их основе, а также использоваться для разработки оптоэлектронных приборов. Пленки оксида олова, легированные сурьмой, обладают более высокой термической и химической стабильностью по сравнению с пленками оксида индия. Тонкие пленки $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ получены методом ИЛО на подложках из кварцевого стекла при различных условиях осаждения. Новизна работы заключается в получении тонких пленок $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ в бескапельном режиме без последующего отжига при изменении плотности энергии на мишени. Исследованы структурные, электрические и оптические свойства полученных уникальных тонких пленок $\text{SnO}_2:\text{Sb}$. Материалы этой статьи ранее не публиковались. Рекомендую статью для публикации в открытой печати.

Начальник отдела НИЦТЛ ИПЛИТ РАН

Д.ф.-м.н., профессор

В. Г. Низьев