

- Alfutov, N. A. Zinovev, P. A., Popov, B. G. (1984). Raschety mnog-oslojnykh plastin i obolochek iz kompozicionnykh materialov. Moscow: Mashinostroenie, 264. **4.** Isayev, F. Q., Radjabov, V. Q. (2015). Bending and stability of nonhomogeneous nano-micro elements based on non-local elasticity theory. *Journal of Qafqaz University. Mechanical and Industrial Engineering*, Vol. 3, No 1, 80–85. **5.** Reddy, J. N. (2007). Nonlocal theories for bending, buckling and vibration of beams. *International Journal of Engineering Science*, Vol. 45, 288–307. **6.** Reddy, J. N., Pang, S. D. (2008). Nonlocal continuum theories of beams for the analysis of carbon nanotubes. *Journal of Applied Physics*, No 103(2), 023511-1–023511-16. **7.** Naderi, A., Saidi, R. (2014). Nonlocal postbuckling analysis of graphene sheets in a nonlinear polymer medium. *International Journal of Engineering Science*, Vol. 81, 49–65. **8.** Rahman, O., Pedram, O. (2014). Analysis and modeling the size effect on vibration of functionally graded nanobeams based on nonlocal Timoshenko beam theory. *International Journal of Engineering Science*, Vol. 77, 55–70. **9.** Ashrafi, M. Zenkour, Ahmed, E. (2014). Abouelregal. Vibration of FG nanobeams induced by sinusoidal pulse-heating via a nonlocal thermo-elastic model. *Journal Acta Mechanica*, Vol. 225, No 12, 3409–3421. **10.** Keivan, Kiani. (2014). Axial buckling analysis of vertically aligned ensembles of single-walled carbon nanotubes using nonlocal discrete and continuous models. *Journal Acta Mechanica*, Vol. 225, No 12, 3569–3589. **11.** Reddy, J. N., Sami, El-Borgi. (2014). Eringens nonlocal theories of beams accounting for moderate rotations. *International Journal of Engineering Science*, Vol. 82, 159–177. **12.** Ghorbanpour, Arani A., Dasthi, P., Amir, S., Yousefi, M. (2015). Nonlinear vibration of coupled nano and microstructures conveying fluid based on Timoshenko beam model under two dimensional magnetic field. *Journal Acta Mechanica*, Vol. 226, No 8, 1737–1756. **13.** Dai, H. L., Wang, L., Abdelkefi, A., Ni, Q. (2015). On nonlinear behavior an buckling of fluid-transporting nanotubes. *International Journal of Engineering Science*, Vol. 87, 13–22. **14.** Amir, Mehdi. (2015). Dehrouyen-Semnami, Mohammad Dehrouyen, Mostafa Torabi-Kafshgari, Mansour Nikkha-Bahrami. Adamped sandwich beam model based on symmetric-deviatoric couple stress theory. *International Journal of Engineering Science*, Vol. 92, 83-94. **15.** Li, Li, Yu, Jin Hu. (2015). Buckling analysis of size-dependent nonlinear beams based on a nonlocal strain gradient theory. *International Journal of Engineering Science*, Vol. 97, 84–94.

Поступила (received) 12.12.2015

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Исаев Фахрaddin Курбан оглы** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедры “Математика и информатика”, Университет Гафгаз, ул. Гасан Алиева, 120, г. Хырдалан, Баку, Абшерон, Азербайджан, AZ0101

**Исаев Фахрaddin Гурбан оглы** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедры “Математика та информатика”, Университет Гафгаз, вул. Гасан Алиева, 120, м. Хирдалан, Баку, Абшерон, Азербайджан, AZ0101

**Isayev Fakhraddin Gurban oglu** – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department “Mathematics and Informatics”, Qafqaz University, ul. Hasan Aliyev, 120, Khirdalan city, Baku, Absheron, Azerbaijan, AZ0101

**Раджабов Вугар Газанфар оглы** – докторант кафедры “Инженерная механика” Университет Гафгаз, ул. Гасан Алиева, 120, г. Хырдалан, Баку, Абшерон, Азербайджан, AZ0101

**Раджабов Вугар Газанфар оглы** – докторант кафедры “Инженерная механика” Университет Гафгаз, вул. Гасан Алиева, 120, м. Хирдалан, Баку, Абшерон, Азербайджан, AZ0101

**Rajabov Vugar Ghazanfar ogly** – PhD in “Mechanical Engineering” Qafqaz University, ul. Hasan Aliyev, 120, Khirdalan city, Baku, Absheron, Azerbaijan, AZ0101

УДК 616-073.55, 616-073.582, 616-073.65

**В. П. МАСЛОВ, П. М. ЛИТВИН, Т. А. ТУРУ, А. А. КОРЧОВИЙ, Н. В. КАЧУР, А. В. ГУРИН**

#### ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ ПЛІВКОВОГО НАГРІВАЧА НА ОСНОВІ ПРОЗОРОЇ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОЇ ПЛІВКИ ІТО

Встановлено, що напилене магнетронним способом на скляний зразок віконного флоат-скла прозоре електропровідне ІТО покриття може мати топологічну структурну неоднорідність товщини, шорсткості, розміру зерен та механічних напружень, яка при нагріванні проявляється в нерівномірності температурного поля на ньому. Рекомендується у виробництві віконного скла з ІТО-покриттям проводити поляризаційний контроль механічних напружень в зразках готової продукції.

**Ключові слова:** тонкоплівковий прозорий нагрівач, нанопокриття окис «індію – олова», флоат-скло, атомно-силова мікроскопія, термографія, механічні напруження, поляризаційний оптичний контроль.

**Вступ.** Тонкоплівкові прозорі електропровідні покриття на скляній поверхні на основі оксиду олова та індію (ІТО) використовуються в мікроелектроніці та «сонячній» енергетиці.

В конструкціях сонячних батарей такі покриття можуть використовуватись як ізолюючі для уникнення шунтування структур приладу [0] або при інших співвідношеннях компонентів в якості електричних контактів в екранах дисплеїв, а також для нагрівання цих дисплеїв з метою забезпечення їх роботи при мінусових температурах [0, 0]. Ці покриття використовуються також в якості нагрівальних елементів для видалення крапель вологи на об'єктах оптичних приладів.

Одним з актуальних напрямків використання ІТО є енергозбереження в комунальному господарстві, а саме в якості тепловідбиваючого покриття ІТО для стекол, завдяки якому відбувається зменшення теплопередачі випромінюванням із побутових приміщень на вулицю. Тепловідбиваючі плівки мають здатність пропускати короткохвильову сонячну радіацію в діапазоні від 0,4 до 2,5 мкм і майже повністю (до 80-90 %) відбивають довгохвильову теплову інфрачервону радіацію в діапазоні від 2,5 до 25 мкм, яка і є основним компонентом теплових втрат. Для порівняння:

© В. П. Маслов, П. М. Литвин, Т. А. Туру, А. А. Корчовий, Н. В. Качур, А. В. Гурин. 2015

звичайна шибка пропускає до 70 % інфрачервоної радіації, а відбиває близько 6 %. При заміні звичайного зовнішнього скла на тепловідбивне (з покриттям ІТО) опір теплопередачі збільшується в 1,4 рази, а середня температура внутрішньої поверхні скла в літніх умовах істотно знижується, в зимових же збільшується на 4-5 °С.

Унікальні властивості плівок ІТО пояснюються тим, що чистий нелегований оксид індію відноситься до вроджених напівпровідників p-типу [0] з широкою забороненою зоною, концентрація електронів провідності в ньому приблизно досягає  $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Існування вільних електронів провідності в матеріалі пояснюється наявністю кисневих вакансій. Для підвищення концентрації електронів провідності оксид індію легують чотирьохвалентним оловом. Концентрація вільних носіїв заряду зростає при цьому до  $10^{21} \text{ см}^{-3}$ , а рухливість вільних носіїв заряду становить від 10 до 30  $\text{см}^2 / \text{В} \cdot \text{с}$  [0].

Існує декілька способів напилення таких плівок на поверхню скла. За першим способом напилення [0] оксидна плівка осаджується на скляній підкладинці із водяних розчинів солей індію та олова. Також широко використовується магнетронне розпилення відповідних металів з наступним термічним відпалом нанесеного покриття [0]. При цьому контроль однорідності товщини виготовлених тонкопліткових прозорих електропровідних покриттів на основі оксидів індію та олова, здійснюють за показником оптичного пропускання з використанням спектрометра (SPECORD M400) та питомого електроопору зондовим методом. Для великогабаритних віконних стекол з ІТО покриттям відомі способи контролю є трудомісткими і не надають загальну картину їх якості.

**Ціль роботи.** Ціллю досліджень було визначення наявності топологічної неоднорідності товщин ІТО та впливу на його роботу, як нагрівача на зразках віконного скла більших за розміром ніж для поширених деталей оптико-електронних приладів.

**Експериментальні дослідження топологічної неоднорідності ІТО покриттів на флоат-склі.** На поверхню зразка з листового полірованого скла (флоат-скло) розмірами 240x95x3 мм після очищення напилювали покриття ІТО на високовакумній установці магнетронного напилення зі шлюзовими камерами. Зразок розміщали у камері осадження, а потім переміщали в камеру, що з'єднувалась з атмосферою, в яку вивантажували зразок. Технологічні режими та схеми напилення відповідали роботі [0].

Контроль якості поверхні плівки та її товщини здійснювався на скануючому атомно-силовому мікроскопі NanoScope IIIa Dimension 3000. Плівка має типовий для магнетронного способу нанесення рельєф, що повторює неоднорідності поверхні скляної підкладки. Характерна товщина та шорсткість поверхні склали 20 нм та 8нм, відповідно.

Для дослідження нагріву плівки, по краях виготовленого зразка наносили металеві електроди та прикладали напругу. Використовуючи понижуючий трансформатор, подавали змінну напругу від 5 до 30 В. Опір між контактами складав 20 Ом, що у перерахунку на площу зразка відповідає  $0,09 \text{ Ом/см}^2$ . При кожній конкретній напрузі давали витримку 10-20 хв і

фіксували термограму нагрітого зразка. Для цих термографічних вимірювань був використаний експериментальний тепловізор (рис. 1), характеристики якого наведено у табл. 1.



Рис. 1 – Зовнішній вигляд тепловізора

Таблиця 1 – Характеристики камери для термічного бачення

| Параметр                         | Значення                                |
|----------------------------------|---|
| Габаритні розміри, мм            | 287x192x130                             |
| Поле кут зору, град              | 40                                      |
| Кількість елементів матриці      | 256Nx290V                               |
| Розміри одного елемента          | 50x33 $\mu\text{m}^2$                   |
| Частота кадрів                   | 25 Гц                                   |
| Діапазон спектральної чутливості | 2 – 5,3 мкм                             |
| Вхідний сигнал камери            | Цифровий                                |
| Напруга живлення                 | 220 В $\pm$ 10%, частота 50 Гц $\pm$ 1% |
| Температурна чутливість          | 0,07 °С на площі 0,25 $\text{мм}^2$     |
| Охолодження                      | Рідкий азот                             |

Залежність загальної температури розігріву зразка від підведеної потужності приведена на рис. 2. Видно, що плівка ефективно нагрівається і температура лінійно залежить від прикладеної питомої електричної потужності. Відповідна вольт-амперна залежність та залежність температури від нагріву показані на рис. 3, 4. Як і температура нагріву, вольт-амперна залежність є майже лінійною, а напруги величиною 30 В при струмі 1.4 А достатньо для нагріву плівки до 88 °С.

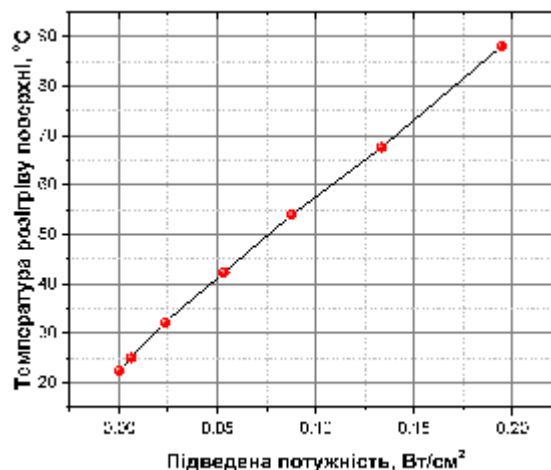
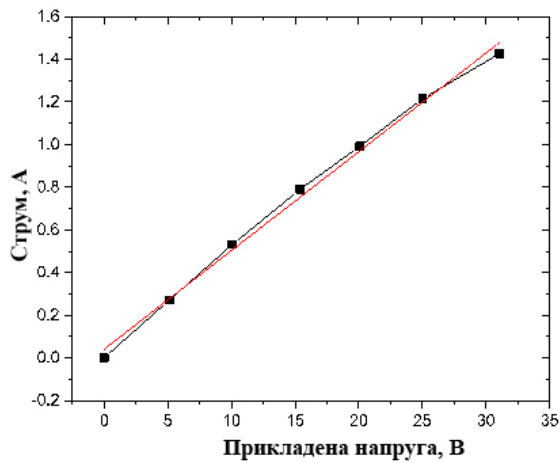
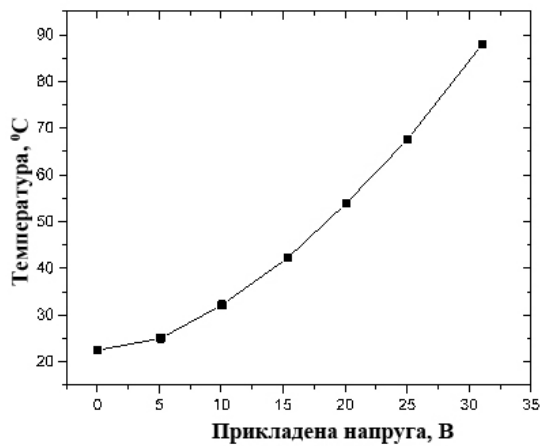


Рис. 2 – Залежність температури розігріву зразка від прикладеної потужності



а



б

Рис. 3 – Залежності: а – струму та б – температури від прикладеної змінної напруги, які відповідають рис. 2

Неоднорідність топологічної структури зразка, що досліджувався, проводили поляризаційним методом. Замість відомого приладу ПКС-250 автори запропонували простий для виконання спосіб [0] поляризаційного контролю прозорих зразків, при якому в якості джерела поляризованого світла використовується монітор персонального комп'ютера в стані ввімкнення в електричну мережу, а в якості аналізатора – плівковий аналізатор та цифрова камера для документування результатів контролю. Зразок розміщували між екраном та аналізатором (рис. 4).

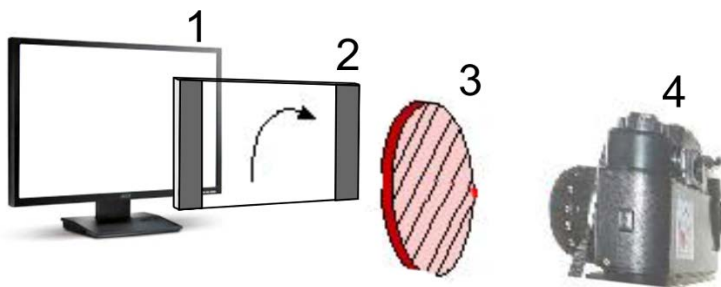


Рис. 4 – Схема поляризаційного контролю: 1- екран ПК у стані ввімкнення, 2 – зразок, який досліджували, 3- аналізатор, 4 – камера для документування

Аналіз термографічних зображень дозволив встановити, що розігрів зразка відбувається не рівномірно і для стабілізації температурного поля потрібно 15-20 хв. При напрузі від 15 до 35 В проявляються температурні особливості (рис. 5) у вигляді горизонтальних більш нагрітих ліній в яких температура складала 60-90 °С, в той час як середня частина на початковому етапі нагрівалась лише на 30-40 °С, а на торцях з електродами не перевищувала 30 °С. Ця нерівномірність розподілу температури при напрузі 15 В та 30В наведена на рис. 6.

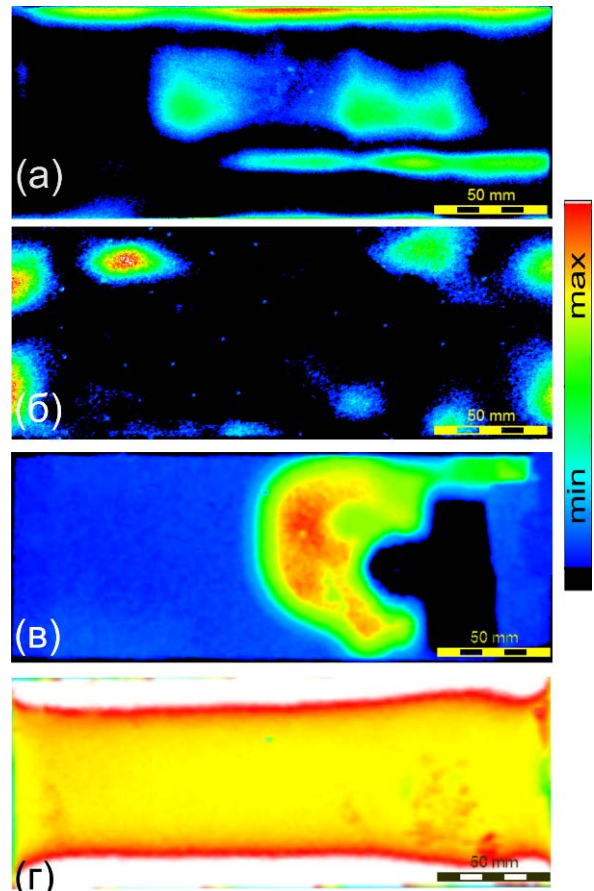


Рис. 5– Порівняння «поляризаційних» неоднорідностей зразка із температурним фронтом його розігріву. а, б – інтенсивність поляризованого світла, що проходить крізь зразок при повному гасінні підсвітки монітора аналізатором на характерних кутах повороту зразка 0 та 45°, відповідно; в,г – термограми нерівномірного нагріву при напругах ~ 5 В та ~ 30 В, відповідно

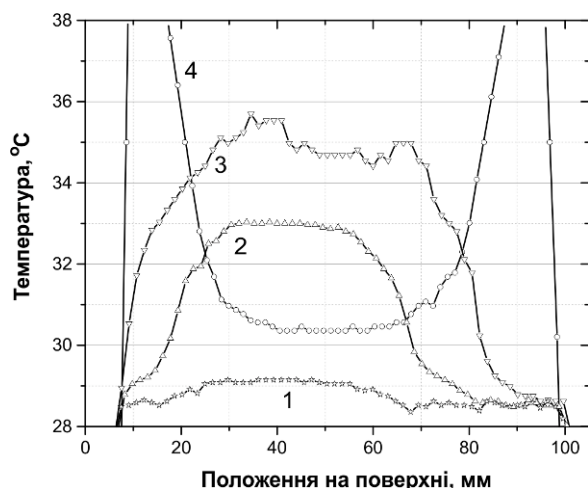


Рис. 6 – Розподіл температури в горизонтальному перерізі зразка при напруга напругах 15В та 30 Вт. Криві 1-3 відповідають перерізам в різних місцях неоднорідного температурного поля розігріву при 15В (рис. 5, в). Крива 4 – переріз розподілу температурного поля при 30 В до встановлення теплової рівноваги

Додатково методом атомно-силової мікроскопії (АСМ) досліджували шорсткість та перепади висот покриття на краях і всередині зразка. Дослідження проводили на зондовому мікроскопі NanoScope IIIa Dimension 3000TM в лабораторії вимірювань геометричних параметрів поверхні Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України (лабораторія атестована відповідно до вимог Правил уповноваження та атестації в державній метрологічній системі) [0]. На рис. 7 наведена різниця в товщині плівки, яка відповідають особливостям поляризаційної картини крайового фрагменту зразка.

Видно, що на краях плівки (білий контраст, прямокутник А), товщина плівки є меншою на 5-6 нм, що складає четверту частину загальної товщини покриття ІТО. Також на краю плівки вищою є амплітуда рельєфу, що вказує на меншу щільність плівки і те, що границі між її окремими нанометровими ділянками є більш широкими. Це може бути причиною більшого питомого опору плівки в ділянках на краю зразка, що і зумовлює їх менший нагрів. Це справджується до напруги 30В. При 30В картина інвертувалася.

Така нерівномірність розподілу температури також може бути пов'язана як зі зміною складу покриття, так і з топологічним нерівномірним розподілом його товщини, шорсткості, розміру зерен [0] та механічними напруженнями, які були утворені в процесі магнетронного напилення. До того ж флот процес виробництва листового полірованого скла пов'язаний з контактуванням розігрітого скла з розплавленим рідким оловом, що забезпечує формування полірованої поверхні на листовому склі і вірогідним насиченням атомів олова цієї поверхні. Цей процес має направлений характер за технологією витягування (виробництва) віконного скла.

Поляризаційні дослідження (рис. 8) показали, що незначний перепад товщин плівки між крайовою та центральною зонами на рівні 6 нм може змінювати поляризаційний контраст і формувати його характерну симетрію через деформацію скляної підкладки.

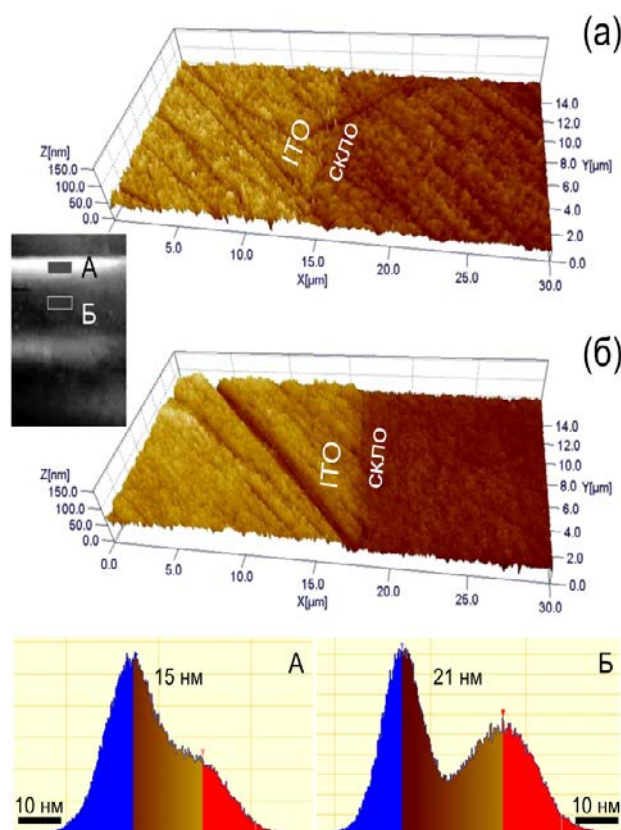


Рис. 7– АСМ вимірювання товщини шару ІТО в областях з різним поляризаційним контрастом біля краю пластини: а – 3D зображення сходинок на краю зразка в світлій зоні (прямокутник А на вставці), б – в темній зоні (прямокутник Б на вставці). (А, Б) – гістограми висот, які відповідають АСМ зображенням (а та б). Цифри вказують перепад висот між максимумами гістограм, сформованими від областей плівки та скляної підкладки

При обертанні зразка відповідно положенню аналізатора можна було констатувати, що кожен 90 градусів картина повторюється, а при 45 градусах є тенденція до інверсії інтенсивності світла, яке проходить крізь зразок. Між 0° і 45° інтенсивність плавно переходить одна в другу. При загальній товщині плівки 20нм та різниці товщин на рівні 5 - 6 нм такі поляризаційні ефекти обумовлені не лише і не стільки товщиною, скільки внутрішніми механічними напруженнями в системі скло-покриття. Аналогічні результати було отримано при дослідженні проходження поляризованого світла крізь отвори та тріщини у тонких металевих плівках [0].

Додатково проводили дослідження впливу локального розігріву на поляризаційну картину в зразку. Локальний нагрів зони зразка, відміченої стрілкою (рис. 9), проводили струменем розігрітого повітря (використовувався фен для паяння мікросхем). Можна побачити, що після нагріву протягом кількох секунд в зоні нагріву виникає чорна пляма, що пов'язана з розтягуючими напруженнями в цій зоні, які компенсуються в світлих зонах (стиснення).

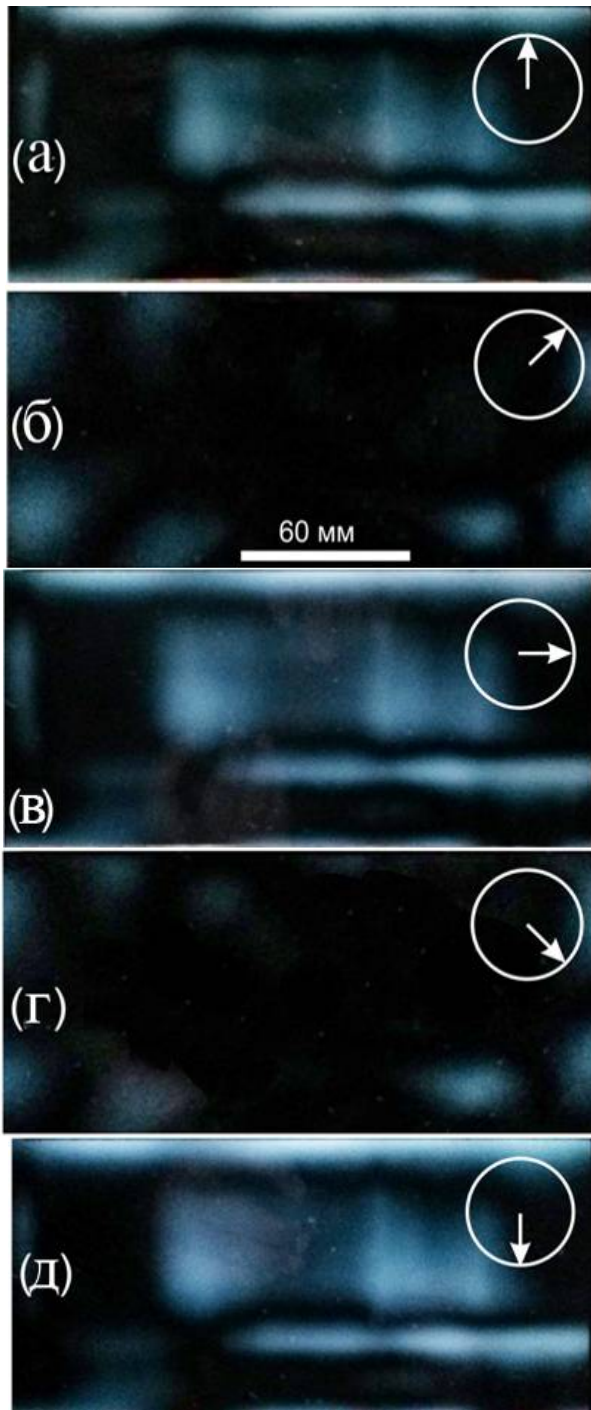


Рис. 8 – Зображення зразка а–д : при повному гасінні підствітки монітора аналізатором, зразок повертався в площині монітора на кут, вказаний стрілкою на вставках

Після припинення локального нагріву поляризаційна картина поступово повертається до вихідного вигляду. Результати поляризаційних досліджень дозволяють виявити неоднорідний характер деформаційних полів в зразку, загальна картина яких формується на всіх технологічних стадіях підготовки скляної підкладки і нанесення покриття. У тому числі і деформаційні поля в підкладці привнесені топологічними неоднорідностями плівки.

Раніше були виконані роботи зі створення нових технологій та матеріалів для виробництва натяжних бортових авіаційних рідкокристалічних дисплеїв [0].

В цій роботі плівкові нагрівачі виготовляли на підкладках зі склокераміки з ультранизьким коефіцієнтом термічного розширення. Полірування цих підкладок виконували за стандартною технологією виготовлення оптичних поверхонь. ІТО покриття наносили за однією і тією ж технологією, що і зразок, який досліджувався в цій роботі. Термографія показала, що зразок плівкового нагрівача для авіаційних дисплеїв при нагріванні не мав топологічних неоднорідностей температурного поля. Така різниця між цими двома зразками вказує, що створення полірованої поверхні за оптичною технологією та флоат - технологією для віконного скла впливають на особливості саме для флоат – технології.

Таким чином, проведені дослідження дозволили виявити особливості топологічної неоднорідності плівки ІТО при нанесенні на поліроване віконне скло. Ці неоднорідності викликають неоднорідність нагріву та мають складний комплексний характер виникнення, що, в свою чергу, пов'язаний з технологією його виробництва.

Незалежними методами було встановлено, що на зразку, що досліджувався, має місце неоднорідність температурного поля на плівковому нагрівальному елементі. Застосований спосіб поляризаційного контролю дозволяє візуально визначити неоднорідності флоат-скляної підкладки та покриття і є високоефективним для використання у виробництві.

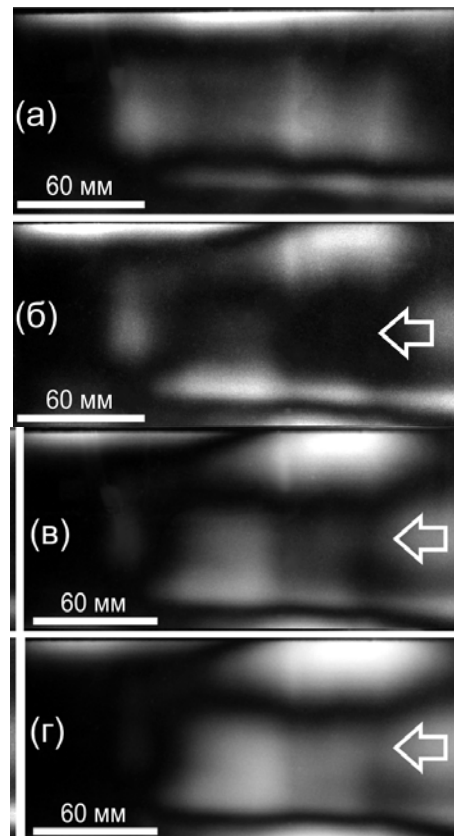


Рис. 9 – Зміни поляризаційного контрасту при асиметричному нагріві зразка: а, в – зразок у вихідному стані; б, г – трансформація контрасту при поширенні теплового поля за час 9 сек. Зона локального нагріву та напрям поширення температурного поля вказані стрілкою

**Подяка.** Автори висловлюють щире вдячність кандидату технічних наук, старшому науковому співробітнику Інституту фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України Дунаєвському Вадиму Івановичу та науковому співробітнику Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Назарчук Світлані Степанівні за попередні термографічні дослідження.

**Висновки.** 1. Встановлено, що на скляному зразку віконного флоат - скла з напиленим магнетронним способом прозором електропровідним ІТО покриттям може мати топологічну структурну неоднорідність товщин, шорсткості, розміру зерен та механічних напружень, яка при нагріванні проявляється в нерівномірності температурного поля на ньому.

2. Рекомендується у виробництві віконного скла з ІТО-покриттям проводити поляризаційний контроль механічних напружень в зразках готової продукції.

**Список літератури:** 1. Хрипунов, Г. С. Влияние наноразмерной прослойки оксида олова на эффективность фотоэлектрических процессов в пленочных солнечных элементах на основе теллурида кадмия [Текст] / Г. С. Хрипунов, А. В. Пирогов, Д. А. Кудий, Р. В. Зайцев, А. Л. Хрипунова, В. А. Геворкян, П. П. Гладышев // Журнал нанотехнологической физики. – Том 7 No 1. – 2015. – С. 01016-1–01016-6.2. Коломзаров, Ю. В. Рідкокристалічний дисплей [Текст] / Ю. В. Коломзаров, В. П. Маслов, Ю. Г. Толстух, Ю. Я. Циркунов // патент України на корисну модель No 4517 опуб. 17.01.2005, бюл. No 1.3. Transparent and conducting ITO films: new developments and applications / C.G. Granqvist, A. Hultaker // Thin Solid Films. – 2002. – Vol. 411. – P. 1–5.4. Юрченко, Г. В. Электрические и оптические свойства пленок ITO, полученных методом магнетронного распыления [Текст] / Г. В. Юрченко // Вопросы атомной науки и техники. – 2000. – No 5. – С. 97–98.5. Патрушев, В. В. Способ получения прозрачной проводящей пленки insno [Текст] / В. В. Патрушев, Н. Ю. Снежко, Т. Н. Патрушева // патент РФ No2491372 от 27.03.2012 г.6. Амосова, Л. П. Магнетронное напыление прозрачных электродов ITO из металлической мишени на холодную подложку [Текст] / Л. П. Амосова, М. В. Исаев // Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84, Вып. 10 – С. 127–132.7. Венгер, С. Ф. Застосування плоского або телевізійного екрана в стані включення в електричну мережу живлення персонального комп'ютера або телевізора як джерела поляризованого провідності [Текст] / С. Ф. Венгер, В. П. Маслов, О. І. Семенець, Н. В. Качур, С. М. Куцовий // патент України на корисну модель No78911 опуб. 10.04.2013, бюл. No 7/2013.8. Lytvyn, P. Scanning Probe Microscopy in Practical Diagnostic: 3D Topography Imaging and Nanometrology in book Functional Nanomaterials and Devices for Electronics, Sensors and Energy Harvesting [Text] / P. Lytvyn // Editors A. Nazarov, F. Balestra, V. Kilchitska, D. Flandre // Springer International Publishing, Switzerland. – 2014. – pp. 179–219.9. Kulkarni, A. K. Dependence of the sheet resistance of indium-tin-oxide thin films on grain size and grain orientation determined from X-ray diffraction techniques [Text] / A. K. Kulkarni, K. H. Schulz, T. S. Lim & M. Khan // Thin solid films. –1999. – No345(2). – P. 273–277.10. Wu, S. Enhanced rotation of the polarization of a light beam transmitted through a silver film with an array of perforated S-shaped holes [Text] / S. Wu, Z. Zhang, Y. Zhang, K. Zhang, L. Zhou, X. Zhang, & Y. Zhu // Physical review letters. – 2013. – No 110(20). – 207401 pp.11. Коломзаров, Ю. В. Тепловізійний неруйнівний метод дослідження прозорих тонкоплівкових нагрівачів [Текст] / Ю. В. Коломзаров, В. П. Маслов, С. Л. Кравченко, В. В. Забудський // Космічна наука і технологія. – 2005. – Т. 11, No5/6. – С. 111–114.

**Bibliography (transliterated):**1. Hripunov, G. S., Pirogov, A. V., Kudiy, D. A., Zaytsev, R. V., Hripunova, A. L., Gevorkyan, V. A., Gladyshev, P. P. (2015). Vliyanie nanorazmernoy prosloyki oksida olova na effektivnost fotoelektricheskikh protsessov v plenochnykh solnechnykh elementah na osnove tellurida kadmia. Zhurnal nanotekhnologii fiziki, T. 7, No 1, 01016-1–01016-6.2. Kolomzarov, Yu. V., Maslov, V. P., Tolstih, Yu. G., Tsirkunov, Yu. Ya. Ridkokristalichniy displey. Patent Ukraini na korisnu model No 4517 opub. 17.01.2005, byul. No 1.3. Granqvist, C. G., Hultaker, A. (2002). Transparent and conducting ITO films: new developments and applications. Thin Solid Films, Vol. 411, 1–5.4. Yurchenko, G. V. (2000). Elektricheskie i opticheskiye svoystva plenok ITO, poluchennykh metodom magnetronnogo raspyleniya. Voprosy atomnoy nauki i tehniki, No5, 97–98.5. Patrushev, V. V., Snezhko, N. Yu., Patrusheva, T. N. (2012). Sposob polucheniya prozrachnoy provodyaschey plenki insno. Patent RF #2491372 ot 27.03.2012 g.6. Amosova, L. P., Isaev, M. V. (2014). Magnetronnoe napylenie prozrachnykh elektrodov ITO iz metallicheskoj miseni na holodnuyu polozhku. Zhurnal tehnicheckoy fiziki, T. 84, No10, 127–132.7. Lytvyn, P. (2014). Scanning Probe Microscopy in Practical Diagnostic: 3D Topography Imaging and Nanometrology in book Functional Nanomaterials and Devices for Electronics, Sensors and Energy Harvesting, Editors A. Nazarov, F. Balestra, V. Kilchitska, D. Flandre. Springer International Publishing, Switzerland, 179–219.8. Venger, S. F., Maslov, V. P., Semenets, O. I., Kachur, N. V., Kuschoviy, S. M. (2013). Zastosuvannya ploskogo або televizijnogo ekranu v stani vkluchennya v elektrichnu mereshu zhivlennya personalnogo komp'yutera або televizora yak dzherela polyarizovanogo viprominyuvannya. Patent Ukraini na korisnu model No 78911 opub. 10.04.2013, byul. No 7/2013.9. Kulkarni, A. K., Schulz, K. H., Lim, T. S., & Khan, M. (1999). Dependence of the sheet resistance of indium-tin-oxide thin films on grain size and grain orientation determined from X-ray diffraction techniques. Thin solid films, 345(2), 273–277.10. Wu, S., Zhang, Z., Zhang, Y., Zhang, K., Zhou, L., Zhang, X., & Zhu, Y. (2013). Enhanced rotation of the polarization of a light beam transmitted through a silver film with an array of perforated S-shaped holes. Physical review letters, 110(20), 207401.11. Kolomzarov, Yu. V., Maslov, V. P., Kravchenko, S. L., Zabudskiy V. V. (2005). Teploviziyiny neruynlvniy metod doslidzhennya prozorih tonkoplivkovih nagrивачiv. Kosmichna nauka i tehnologiya, T.11, No 5/6, 111–114.

Поступила (received) 22.12.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Маслов Володимир Петрович** – доктор технічних наук, професор, Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, професор кафедри наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»;

**Маслов Владимир Петрович** – доктор технических наук, профессор, Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины, профессор кафедры научных, аналитических и экологических приборов и систем Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт»;

**Volodymyr Maslov** – doctor of sciences, professor, V Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine, professor of sciences, analytical and ecological devices and systems of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"; tel. +38 (044) 525-58-30; email: [vpmaslov@ukr.net](mailto:vpmaslov@ukr.net).

**Литвин Петро Мар'янович** – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України,

**Литвин Петр Марьянович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины,

**Lytvyn Petro** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Ph. D), senior researcher at the V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine, tel. +38 (044) 525-59-40; email: [plyt2007@gmail.com](mailto:plyt2007@gmail.com).

**Туру Тетяна Анатоліївна** – асистент кафедри наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», тел.: +38 (044) 406-85-03

**Туру Татьяна Анатольевна** – ассистент кафедры научных, аналитических и экологических приборов и систем Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт»,

**Tyru Tatyana** – Assistant of the Department of scientific, analytical and ecological devices and systems of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", email: [kpi\\_naeps@ukr.net](mailto:kpi_naeps@ukr.net)

**Корчовий Андрій Адамович** – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України,

**Korchoviy Andriy Adamovich** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины,

**Korchoviy Andriy** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Ph. D), senior researcher at the V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine, tel. +38 (044) 525-59-40; email: [akorch@isp.kiev.ua](mailto:akorch@isp.kiev.ua).

**Качур Наталія Володимирівна** – молодший науковий співробітник Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, тел.: +38 (044)525-58-30; email: [natalykachur@gmail.com](mailto:natalykachur@gmail.com).

**Kachur Nataliya Vladymyrovna** – младший научный сотрудник Института физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины, тел.: +38 (044)525-58-30; email: [natalykachur@gmail.com](mailto:natalykachur@gmail.com).

**Kachur Nataliya** – researcher at the V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine,

**Гурін Андрій Володимирович** – провідний інженер Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, тел.: +38 (044) 525-61-88; email: [plyt2007@gmail.com](mailto:plyt2007@gmail.com).

**Gurin Andriy Vladymyrovich** – ведущий инженер Института физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины, тел.: +38 (044) 525-61-88; email: [plyt2007@gmail.com](mailto:plyt2007@gmail.com).

**Hurin Andriy** – lead engineer Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine

УДК 621.762

**А. Т. МАМЕДОВ, Ч. А. АЛИЕВ**

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИЙ ПОСЛЕ СПЕКАНИЯ И ГОРЯЧЕГО УПЛОТНЕНИЯ

В статье приведены результаты исследований композиций «металлы-оксиды-связующее», получаемых холодным прессованием следующих компонентов: порошок железный, частицы оксида  $Fe_2O_3$ , смола СОРЖ-3031. после чего композиции были подвергнуты дополнительным операциям. Для достижения высокой плотности прессовок были осуществлены три технологических варианта: спекание, горячее прессование и горячая осадка. Установлено, что уплотнение прессовок в этих операциях имеет сложный характер и зависит от доли оксида в составе композиций.

**Ключевые слова:** структура, свойства, композиция, спекание, прессование, усадка, оксидная фаза, водород.

**Введение.** Изготовление из композиций типа «металл-оксид-связующее» путем холодного прессования указанных компонентов с последующим спеканием или горячим прессованием и осадкой антифрикционных деталей, например, уплотнительных колец является серьезной научно-технической задачей. Так, например, требуется рациональный выбор доли каждого состоящего композиции с учетом дисперсности их частиц. Кроме того представляет интерес изучение вклада холодного прессования композиций и дополнительных операций уплотнения прессовок на структуру и свойства материала. Наличие оксида железа и углеродсодержащего связующего в шихте композиций на основе железа может интенсифицировать процессы восстановления, уплотнения и упрочнения заготовок на операциях нагрева. Иными словами наличие оксида может привести к активированному спеканию композиции.

Поэтому исследование оксидо-углеродсодержащих порошковых композиций интересно также с точки зрения получения заготовок высоких плотности и прочности путем спекания.

С учетом публикаций [1-6], посвященных изучаемому вопросу, при планировании и проведении исследований предполагалось изучения влияния на вышеуказанные процессы специфических факторов разрабатываемой технологии. К ним относятся высокая дисперсность компонентов композиций, связанная высокой дисперсностью первичных материалов

или высокой дисперсностью фаз, образующих при реакционном размоле, а также структура материалов, получаемых в результате низкотемпературного обжига композиций.

**Методика проведения экспериментов.** Рациональный состав композиции состоял из следующих компонентов, масс. %: оксид железа  $Fe_2O_3$  с размерами частиц 0,2-0,4 мкм-42; порошок железный распыленный ПЖР2.28-42, смола СФЖ 3031-15,2 и стеарат цинка 0,18 %. Шихта композиции была подвергнута холодному прессованию под давлением 400 МПа. С целью получения прессовок высокой плотности были использованы три технологических варианта: спекание, компрессионные горячее прессование и горячая осадка.

Спекание изучалось на композициях, используемых для исследования процессов деструкции связующего и низкотемпературной термической обработки, а также на композициях для изучения влияния различных факторов на спекание. В композициях менялось соотношение между количеством железного порошка и отходов, дисперсность их компонентов, а также степень наполнения их компонентов, а также степень наполнения их твердой фазой ( $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ ).

Из исследуемых композиций изготавливались образцы с наружным диаметром 31 мм, внутренним диаметром 15 мм высотой 4,5 мм и заготовки размерами 20x20x80 мм. На круглых образцах измерялись размеры, плотность, твердость, определялась струк

© А. Т. Мамедов, Ч. А. Алиев. 2015