

Rezultat R220 Studiul filmelor subțiri de oxizi metalici pentru straturi absorbante eficiente

(Studiu prospectiv)

► Oxizii metalici

Oxizii metalici (OM) sunt materiale abundente în scoarța terestră, iar semiconductorii OM sunt diferiți de semiconductorii anorganici convenționali, cum ar fi siliciul și compușii III-V, în ceea ce privește conceptele de proiectare a materialelor, structura electronică, mecanismele de transport al sarcinii, stările de defecte, procesarea peliculelor subțiri și proprietățile optoelectronice, permițând atât funcții convenționale, cât și funcții complet noi. Au fost efectuate investigații asupra unor structuri de filme TiO_2 -rGO- P_2O_5 pentru aplicații în celule solare. Progresele recente privind sistemele fotovoltaice/termice (PV/T), mecanismele de urmărire a soarelui, configurațiile fotovoltaice bifaciale, sistemele fotovoltaice plutitoare și submersibile sunt prezentate în [Allouhi, 2023] [A. Allouhi, S. Rehman, M.S. Buker, Z. Said, Recent technical approaches for improving energy efficiency and sustainability of PV and PV-T systems: A comprehensive review, *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 56 (2023) 103026]

S-au realizat progrese remarcabile în domeniul semiconductoarelor OM pentru electronică, privind descoperirea și caracterizarea de noi oxizi conductori transparenti, realizarea semiconductoarelor OM de tip *p*, împreună cu cei tradiționali de tip *n*, pentru tranzistoare, joncțiuni *p-n* și circuite complementare, imprimarea electronicii OM. Se analizează unicitatea și universalitatea OM față de alte materiale electronice neconvenționale în ceea ce privește chimia și fizica materialelor, caracteristicile electronice, strategiile de fabricare a peliculelor subțiri și aplicațiile selectate în tranzistoare cu peliculă subțire, celule solare, diode și memorii [Yu, 2016] Yu, X., Marks, T. & Facchetti, A. Metal oxides for optoelectronic applications. *Nature Mater* 15, 383–396 (2016). <https://doi.org/10.1038/nmat4599>

► Celulele solare tandem pe bază de siliciu

Celulele solare tandem pe bază de siliciu, care încorporează materiale de *oxid metalic* ieftine, abundente și netoxice, pot crește eficiența de conversie a celulelor solare de siliciu dincolo de limitele lor convenționale, cu beneficii economice și de mediu evidente.

Caracteristicile electrice ale celulei solare heterojoncțiune cu peliculă subțire de oxid metalic, bazată pe un strat absorbant de oxid cupros (Cu_2O) au fost investigate. Pelicule subțiri de ZnO (AZO) de tip *n* puternic dopat cu Al și pelicule subțiri de Cu_2O de tip *p* nedopat au fost preparate pe substraturi de cuarț prin depunere prin pulverizare magnetronică. Proprietățile electrice și optice ale acestor pelicule subțiri au fost determinate din măsurători cu efect Hall și elipsometrie spectroscopică. După recoacerea peliculei de Cu_2O la 900 °C, mobilitatea purtătorilor majoritari (golurilor) și rezistivitatea au fost măsurate (50 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ și respectiv 200 $\Omega\cdot\text{cm}$). Modelarea numerică investighează efectul alinierii benzilor și al defectelor de interfață asupra caracteristicilor electrice ale heterojoncțiunii AZO/ Cu_2O .

Analiza sugerează că *încorporarea unui strat tampon* poate îmbunătăți performanța celulei solare cu heterojoncțiune ca urmare a reducerii offset-ului benzii de conducție [Nordseth, 2018] [Ø. Nordseth, R. Kumar, K. Bergum, L. Fara, C. Dumitru, D. Craciunescu, F. Dragan, I. Chilibon, E. Monakhov and B.G. Svensson, Metal Oxide Thin-Film Heterojunctions for Photovoltaic Applications, *Metal Oxide Thin-Film Heterojunctions for Photovoltaic Applications, Materials* 2018, 11(12), 2593; <https://doi.org/10.3390/ma1122593>.]

► Tehnici de creștere pelicule cu oxizi metalici (OM)

Peliclele de oxizi metalici pot fi depuse folosind tehnici în fază de vapori și în soluție, cum ar fi:

- Prelucrare în fază de vapori.

Evaporarea termică utilizează un material sursă volatil sub vid înalt pentru a crește pelicule pe un substrat de interes și este utilizată pe scară largă pentru fabricarea produselor metalizate. Depunerea termică a peliculelor de OM se confruntă cu mai multe provocări: (i) ajustarea conținutului de O post-depunere este necesară pentru a obține compoziția dorită, din cauza pierderii de O_2 în timpul evaporării OM și (ii) temperaturile ridicate ale substratului sunt necesare pentru a optimiza reacțiile dintre speciile ionizate de pe substrat.

- Pulverizare catodică.

Pulverizarea catodică este o tehnică comună pentru depunerea (semiconductorilor) de OM. Cea mai utilizată este *pulverizarea catodică cu magnetron*, unde magneții din spatele țintei sporesc bombardamentul cu gaze ionizate, crescând rata de creștere și uniformitatea peliculei. Avantajele pulverizării catodice includ: (i) creșterea peliculei aproape de temperatura camerei; (ii) compatibilitatea cu substraturi sensibile termic, cum ar fi foliile de plastic; și (iii) controlul morfologiei peliculei de OM, compoziției și concentrației purtătorilor prin intermediul parametrilor de depunere, cum ar fi presiunea O_2 și puterea de pulverizare. Pulverizarea este utilizată pe scară largă în industrie pentru depunerile de metal și OM.

- Depunere cu laser pulsant.

PLD este, de asemenea, o tehnică eficientă de evaporare rapidă în care un OM sau o altă țintă este iradiată cu un fascicul laser ultraviolet pulsant de mare putere, vaporizând materialul țintă cu plasmă și depunându-l sub formă de peliculă subțire. Acest proces poate avea loc în vid sau într-un gaz de fond, cum ar fi O_2 , care este utilizat în mod obișnuit în creșterea peliculei de OM. PLD oferă pelicule de înaltă calitate și performanță, cu compoziții și morfologii bine controlate. Este rareori aplicabilă la scări de producție din cauza limitărilor în uniformitatea peliculei pe suprafețe mari, a ratelor scăzute de depunere și a costurilor ridicate.

- Depunere în strat atomic.

Filmele ALD sunt crescute prin expunerea substratului la impulsuri alternante de reactivi gazoși care suferă reacții chimice autolimitate. Spre deosebire de depunerea chimică în stare de vapori, reactivii nu sunt niciodată prezenți simultan în reactor, ci sunt inserați ca o serie de impulsuri secvențiale, care nu se suprapun, rezultând o creștere la scară atomică. Varierea numărului de cicluri permite o creștere uniformă cu precizie ridicată pe substraturi arbitrar de complexe și cu suprafețe mari. Procesele ALD sunt de obicei utilizate pentru fabricarea de filme dielectrice OM de înaltă calitate. Există tehnici în fază de soluție pentru depunerea filmelor OM.

- Acoperire prin centrifugare.

Acoperirea prin centrifugare este o metodă simplă pentru depunerea filmelor optoelectronice, în general pe substraturi plane. O soluție precursoră este aplicată pe suprafața substratului, fixată prin aspirație pe un suport, care fie se rotește la viteză mică, fie este staționar. Apoi, substratul este rotit la viteză mare pentru a răspândi materialul de acoperire prin forță centrifugă, acoperind substratul cu o peliculă subțire. Grosimea și calitatea peliculei depind de accelerație și viteza de rotație, precum și de vâscozitatea, volatilitatea și concentrația soluției și a solventului. Acoperirea prin centrifugare este utilizată pe scară largă în microfabricarea peliculelor de oxid folosind precursori sol-gel și în fabricarea circuitelor integrate pentru a depune straturi de fotorezist.

- **Acoperire prin pulverizare.**

Cunoscută și sub denumirea de piroliză prin pulverizare, acoperirea prin pulverizare este o altă metodă simplă și ieftină de depunere a materialelor electronice, compatibilă cu creșterea pe suprafețe mari pe plastic. Peliculele sunt de obicei crescute prin pulverizarea cu aerosoli a soluțiilor precursorare pe substraturi preîncălzite, unde constituenții suferă o reacție chimică. Acești reactivi chimici sunt selectați astfel încât toți produșii de reacție să fie volatili la temperatura de depunere. Piroliza prin pulverizare este deosebit de utilă pentru depunerile de OM și este o metodă comercială pentru fabricarea conductorilor electrici transparenți pe sticlă. Rugozitățile peliculelor de piroliză prin pulverizare sunt de obicei inferioare celor ale peliculelor acoperite prin centrifugare, dar pot fi optimizate prin ajustarea parametrilor procesului. Piroliza prin pulverizare necesită soluții cu vâscozitate scăzută, ceea ce restricționează selecția solventului.

- **Imprimarea.**

Imprimarea este un proces aditiv care implică depunerea și modelarea simultană a peliculei, de obicei la temperaturi scăzute, reducând astfel la minimum consumul de substanțe chimice și energie. Formele și dimensiunile modelelor imprimate pot fi ușor modificate fără reproiectarea procesului. Cele mai utilizate tehnici de imprimare electronică sunt *jetul de cerneală*, *jetul de aerosoli*, *gravarea*, *flexografia* și *serigrafia*. S-au înregistrat progrese la imprimarea materialelor organice și electronice OM. Pentru aplicații precum circuitele, rezoluția și înregistrarea trebuie să atingă randamente acceptabile în producție. Pentru OM, este de obicei necesară o post-recoacere la temperatură înaltă.

► Pentru **celulele solare cu heterojoncțiune ZnO/Cu₂O**, proprietățile interfeței heterojoncțiunii sunt critice pentru a obține o eficiență ridicată a conversiei de putere. Reducerea la minimum a densității defectelor la interfața heterojoncțiunii este importantă pentru a evita pierderile prin recombinare. Introducerea unui strat tampon de 8,1%, cum ar fi Zn_{1-x}Ge_xO, între straturile de ZnO și Cu₂O în structura heterojoncțiunii produce îmbunătățirea eficienței de conversie a puterii celulelor solare cu heterojoncțiune ZnO/Cu₂O datorită reducerii decalajului benzii de conducție, reducerii offset-urilor de bandă, iar diagramele benzilor de energie sunt afectate de densitatea defectelor la interfața heterojoncțiunii.

► **Celule solare pe baza de oxid cupros (Cu₂O)** Cu₂O este un semiconductor de tip *p* cu absorbție optică ridicată și o bandă interzisă directă de aproximativ 2,1 eV, ceea ce îl face un material atractiv pentru aplicații fotovoltaice. Pentru un dispozitiv fotovoltaic de înaltă performanță, formarea contactelor cu rezistivitate scăzută pe peliculele subțiri de Cu₂O este o condiție prealabilă, care poate fi realizată prin doparea cu azot a Cu₂O pentru a crește concentrația purtătorilor de sarcină. Pelicule subțiri de Cu₂O de tip *p* dopate cu azot au fost preparate pe substraturi de cuarț prin depunere prin pulverizare magnetronică. Prin adăugarea de N₂ gazos în timpul procesului de depunere, s-a obținut o concentrație de azot de până la $2,3 \times 10^{21}$ atomi/cm³ în peliculele subțiri de Cu₂O, determinată din măsurători de spectroscopie de masă cu ioni secundari. A fost investigat efectul dopării cu azot asupra proprietăților structurale, optice și electrice ale peliculelor subțiri de Cu₂O. Măsurătorile de difracție cu raze X sugerează o conservare a fazei Cu₂O pentru peliculele subțiri dopate cu azot, în timp ce

măsurătorile spectrofotometrice arată că proprietățile optice nu au fost modificate semnificativ prin încorporarea azotului în matricea Cu₂O. O creștere semnificativă a conductivității a fost obținută pentru peliculele subțiri de Cu₂O dopate cu azot, pe baza măsurătorilor efectului Hall, adică concentrația de goluri a fost crescută de la 4×10^{15} la $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, iar rezistivitatea a fost redusă de la 190 la 1,9 $\Omega \cdot \text{cm}$ prin adăugarea de azot la peliculele subțiri de Cu₂O. [Nordseth, 2019] Ø. Nordseth, R. Kumar, K. Bergum, I. Chilibon, S.E. Foss, E. Monakhov, Nitrogen-Doped Cu₂O Thin Films for Photovoltaic Applications, *Materials* **2019**, 12(18), 3038; <https://doi.org/10.3390/ma12183038>

► Materialele nanocompozite metal-oxid

Materialele nanocompozite metal-oxid oferă o platformă versatilă cu fenomene noi apărute pentru dispozitive optice, electronice și energetice de mică putere. Pelicule subțiri de nanocompozite heteroepitaxiale La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃:Ag (LSMO:Ag) au fost depuse pe substraturi flexibile de mică, iar răspunsul optico-electric a fost investigat prin inginerie. Odată cu modificarea raportului volumic de Ag, timpul de răspuns și intensitatea pentru schimbarea rezistenței induse de lumină sunt modificate semnificativ.

Peliculele nanocompozite flexibile LSMO:Ag prezintă un mare potențial pentru aplicații opto-electronice de înaltă performanță, reglabile, durabile mecanic și multifuncționale. [Wu, 2024] X. Wu, L. Ye, H. Yang, C. Yun, W. Li, Flexible metal-oxide nanocomposite thin films with tunable optical-electrical performances, *Ceramics International*, Vol. 50, Issue 21, Part B, pp. 42721-42728, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.08.116>

► Sisteme fotovoltaice bifaciale

Sistemele fotovoltaice bifaciale reprezintă alternative importante la sistemele fotovoltaice convenționale, deoarece pot absorbi radiația solară de pe ambele suprafețe, permițând o producere mai mare de energie. Predicțiile evidențiază faptul că piața sistemelor bifaciale se așteaptă să crească de la mai puțin de 20% în 2019 la 70% până în anul 2030 [ITRPV - VDMA n.d. <https://itrpv.vdma.org/> (accessed August 14, 2020)]. Pentru a îmbunătăți performanța PSC, trebuie să se optimizeze materialul de transport al electronilor (ETL) (materialele organice și anorganice); materialele ETL includ oxizi metalici (precum dioxidul de titan (TiO₂)), oxidul de zinc (ZnO), oxidul de staniu (SnO₂) și alte materiale, cum ar fi disulfura de molibden (MoS₂).

Generarea de energie a sistemelor bifaciale s-a dovedit a fi cu 10% și 15% mai mare decât cea a sistemelor monofaciale pentru unghiuri de înclinare de 25° și respectiv 45°. În aceeași direcție, Ledesma și colab. [Ledesma,2020] [Ledesma JR, Almeida RH, Martinez-Moreno F, Rossa C, Martín-Rueda J, Narvarte L, et al. A simulation model of the irradiation and energy yield of large bifacial photovoltaic plants. *Sol Energy* 2020;206:522–38] au propus un factor de vizualizare bidimensional simplu, combinat cu un model specific de putere, pentru a estima randamentele energetice ale sistemelor fotovoltaice bifaciale. Abordarea de modelare a fost validată experimental prin explorarea unei centrale fotovoltaice de 6,6 kWp. S-a raportat o îmbunătățire de mai puțin de 20% în generarea anuală de energie față de sistemele monofaciale.

Recent, Lehr și colab. [Lehr, 2020] [Lehr J, Langenhorst M, Schmager R, Gota F, Kirner S, Lemmer U, et al. Energy yield of bifacial textured perovskite/silicon tandem photovoltaic modules. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2020;208:110367] au optimizat performanțele sistemelor fotovoltaice tandem bifaciale pe bază de siliciu cristalin perovskit. Pentru un teren caracterizat de un *albedo* mediu de 35%, generarea de

energie a tehnologiei investigate a fost estimată a fi cu 24%-38% mai mare decât cea a tehnologiei pe bază de siliciu cristalin bifacial. Albedo este măsura reflectivității unei suprafețe, indicând fracțiunea de lumină solară (energie radiată) reflectată de un corp înapoi în spațiu, spre deosebire de cea absorbită. Pentru a maximiza productivitatea modulului fotovoltaic investigat, autorii au recomandat ca elevația acestuia față de nivelul solului să fie superioară nivelului solului.

► Materialele nanocompozite metal-oxid

Materialele nanocompozite metal-oxid oferă o platformă versatilă cu fenomene noi apărute pentru dispozitive optice, electronice și energetice de mică putere. Pelicule subțiri de nanocompozite heteroepitaxiale $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3:\text{Ag}$ (LSMO:Ag) au fost depuse pe substraturi flexibile de mică, iar răspunsul optico-electric a fost investigat prin inginerie. Odată cu modificarea raportului volumic de Ag, timpul de răspuns și intensitatea pentru schimbarea rezistenței induse de lumină sunt modificate semnificativ.

Peliclele nanocompozite flexibile LSMO:Ag prezintă un mare potențial pentru aplicații opto-electronice de înaltă performanță, reglabile, durabile mecanic și multifuncționale. [Wu, 2024] Xiaotong Wu, Lianxu Ye, Hao Yang, Chao Yun, Weiwei Li, Flexible metal-oxide nanocomposite thin films with tunable optical-electrical performances, *Ceramics International*, Vol. 50, Issue 21, Part B, pp. 42721-42728, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.08.116>

Heterostructurile cu proprietăți optice, inclusiv rezonanța plasmei de suprafață, optica neliniară și fotocataliza, prezintă performanțe importante, permițând aplicații largi în dispozitivele fotoelectrice.

Integrarea multifuncțiilor, inclusiv a gradelor de libertate a rețelei, sarcinii și spinului, permit creșterea performanței dispozitivului, *nanocompozitul heteroepitaxial aliniat vertical (VAN)* fiind o modalitate eficientă de a manipula, combina și intercupla proprietățile fazelor componentelor. Compozitul oxid-oxid și compozitul metal-oxid sunt două modalități principale de obținere a VAN-urilor.

Sistemul $\text{BaTiO}_3:\text{Au}$ prezintă cuplarea caracteristicilor microstructurale reglabile, a proprietăților optice și feroelectrice. ***Película compozită $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3:\text{Au}$*** permite multifuncționalități, inclusiv cuplarea magneto-optică, dispersia hiperbolică și anizotropia feromagnetică reglabilă.

Nanocompozitul este o formă unică de heterostructură auto-asamblată care integrează potențial flexibilitatea mecanică și versatilitatea funcțională.

Majoritatea **nanocompozitelor metal-oxid** sunt depuse pe substraturi rigide, ceea ce împiedică gradul de libertate mecanic și restricționează domeniile de aplicare, prin urmare, un nanocompozit flexibil cu faze componente adecvate se impune pentru îndeplinirea acestor sarcini. Printre diversele substraturi flexibile, **mica** este cel mai potrivit candidat pentru formarea de pelicule nanocompozite metal-oxid de înaltă calitate datorită rezistenței sale la temperaturi ridicate și structurii sale cristaline, care garantează formarea fazelor cristaline și epitaxiale.

Oxizii de manganit perovskit sunt materiale candidate pentru proiectarea peliculelor subțiri compozite metal-oxid datorită proprietăților lor abundente. $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ (LSMO) prezintă proprietăți electrice și magnetice excelente, cum ar fi tranziția izolator-metal în jurul

temperaturii camerei și cea mai ridicată temperatură Curie (TC, până la 360 K) dintre *oxizii de manganit perovskit*, care sunt foarte potriviți pentru studierea efectelor de cuplare dintre gradele de libertate ale electronilor și spinului în peliculele compozite metal-oxid la temperatura camerei.

Heterostructuri nanocompozite flexibile **LSMO:xAg** ($x = 0, 10\%, 20\%$ și 30% vol.) fabricate pe un substrat de mică tamponată cu STO, unde Ag și LSMO sunt separate de fază, formând faze fără stres. Răspunsul de rezistență indus optic sub iluminare prezintă o corelație puternică cu conținutul de Ag. Diagrama simplificată (Fig. 1) a benzilor sistemului nanocompozit LSMO:Ag, unde contactul metal-semiconductor formează interfețe aliniate cu benzile pentru a facilita transportul purtătorilor și transferul de energie, implică modularea răspunsului la lumină.

Răspunsul opto-electric reglabil și performanța stabilă sub controlul compoziției și îndoire mecanică prezintă importanță pentru proiectarea dispozitivelor opto-electrice de înaltă performanță bazate pe sisteme nanocompozite flexibile metal-oxid. [Wu, 2024] [Xiaotong Wu, Lianxu Ye, Hao Yang, Chao Yun, Weiwei Li, Flexible metal-oxide nanocomposite thin films with tunable optical-electrical performances, *Ceramics International*, Volume 50, Issue 21, Part B, Pages 42721-42728, 2024, ISSN 0272-8842, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.08.116>.]

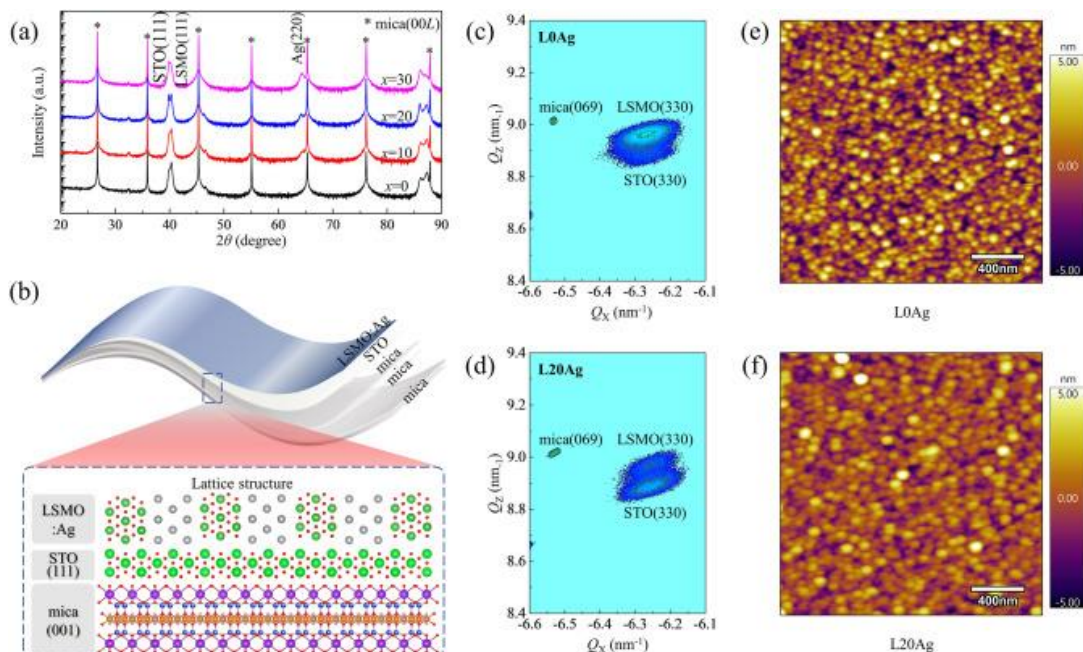


Fig. 1. Caracterizarea structurală a peliculelor nanocompozite LSMO:xAg. (a) Modele XRD θ - 2θ ale peliculelor subțiri LSMO:xAg/STO/mica cu diferite conținuturi de Ag; (b) O diagramă schematică a construcției macroscopice stratificate a heterostructurii flexibile și a structurii rețelei corespunzătoare; (c-d) Maparea spațiului reciproc (RSM) a planurilor LSMO/STO (330) și mică (069) pentru probele L0Ag și respectiv L20Ag; (e-f) Topografiile de suprafață ale probelor L0Ag și L20Ag obținute prin AFM. [Wu, 2024]

Tendențele de variație ale intensităților de răspuns în funcție de lungimea de undă sunt similare pentru peliculele subțiri cu diferite raporturi de adăugare de Ag, adică fiecare probă prezintă intensități de răspuns mai mari pentru lumina de 715 nm și 460 nm decât cea a luminii de 535 nm, ceea ce se datorează probabil absorbției mult mai mari a luminii de către LSMO și Ag în

jurul lungimii de undă de 460 nm și efectului de încălzire mai mare generat de lumina de 715 nm (care se apropie de regiunea infraroșie).

LSMO ($\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$) este un material perovskit cunoscut pentru proprietățile sale magnetice excelente, inclusiv o temperatură Curie peste temperatura camerei și o polarizare de spin de aproape 100%. Un substrat ideal pentru stratul de LSMO ($\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$) este perovskitul monocristalin SrTiO_3 (STO). Complementaritatea sa structurală cu LSMO (aceeași structură, adică perovskit și o constantă de rețea similară) permite creșterea epitaxială a unui multistrat atunci când se aplică *metoda depunerii cu laser pulsant (PLD)*. Prin urmare, materialele perovskite, cum ar fi LSMO, BaTiO_3 și STO, au fost testate pe larg pentru aplicații în joncțiuni de tunel.

► *Investigații asupra unor structuri de filme subțiri pe bază de TiO_2 -rGO- P_2O_5 pentru aplicații în celule solare.*

Pentru experimentări s-a ales metoda de depunere sol-gel a filmelor subțiri de TiO_2 - P_2O_5 tratate termic la 400°C, 450°C și 500°C, funcție de numărul de straturi și concentrația de P_2O_5 .

Tabelul 1. Condițiile de sinteză ale probelor de TiO_2 -rGO- P_2O_5

Denumire probă	Isopropoxid de Ti (mL)	Alcool isopropilic (mL)	H_2PO_4 (mL)	rGO (mL)	HCl (mL)	Temperatura (°C)	Nr. de straturi
$\text{TiO}_2\text{P}_2\text{O}_5\text{rGO } 0.2\%$	1.8	18	0.083	0.972	2	400, 450, 500	1, 3, 5
$\text{TiO}_2\text{P}_2\text{O}_5\text{rGO } 0.5\%$	1.8	18	0.083	2.43	2	400, 450, 500	1, 3, 5
$\text{TiO}_2\text{P}_2\text{O}_5\text{rGO } 0.7\%$	1.8	18	0.083	3.402	2	400, 450, 500	1, 3, 5

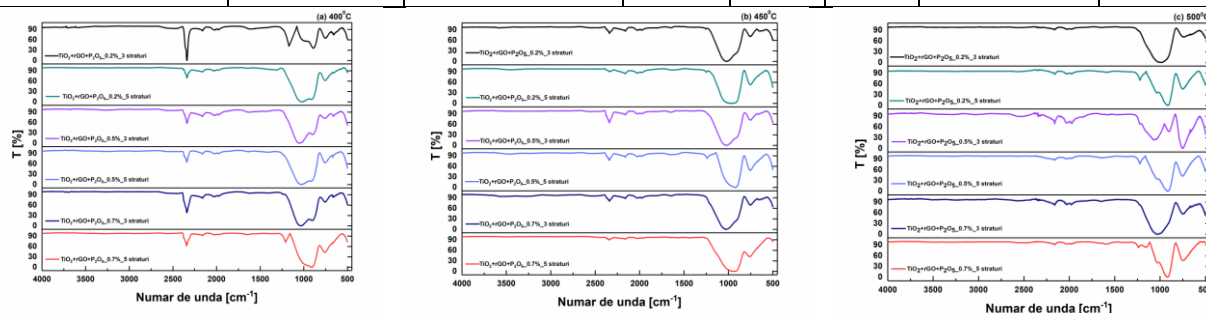


Fig. 2. Spectrele FT-IR ale filmelor subțiri nanocompozite TiO_2 -rGO- P_2O_5 depuse, cu diferite numere de straturi și tratate termic la a) 400°C, b) 450°C și c) 500°C.

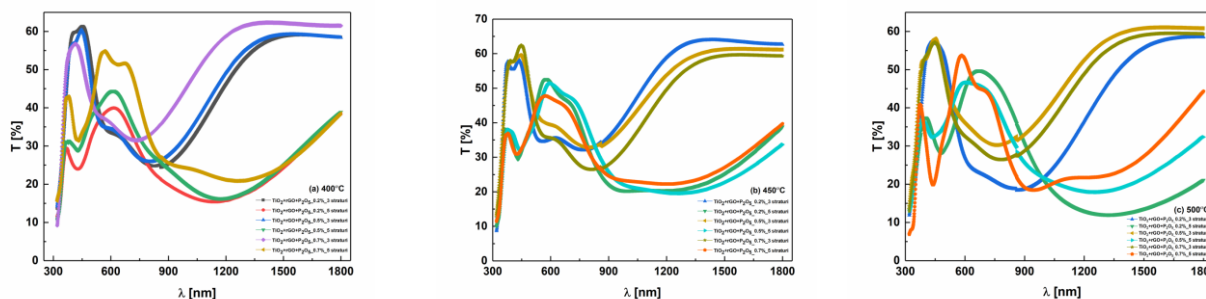


Fig. 3. Spectrele de transmitanță optică ale filmelor subțiri compozite TiO_2 +rGO+ P_2O_5 în funcție de lungimea de undă (λ) pentru probe supuse tratamentului termic la: (a) 400°C, (b) 450°C și (c) 500°C, ilustrând efectele concentrației de P_2O_5 (0,2%, 0,5%, 0,7%) și ale numărului de straturi de depunere (3 și 5 straturi).

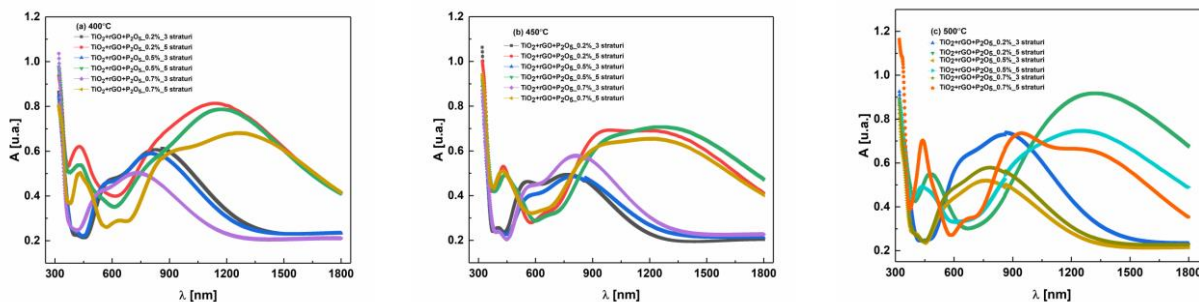


Fig. 4. Spectre de absorbantă dependente de lungimea de undă ale filmelor de $\text{TiO}_2+\text{rGO}+\text{P}_2\text{O}_5$ în diferite condiții de tratament termic (400–500°C).

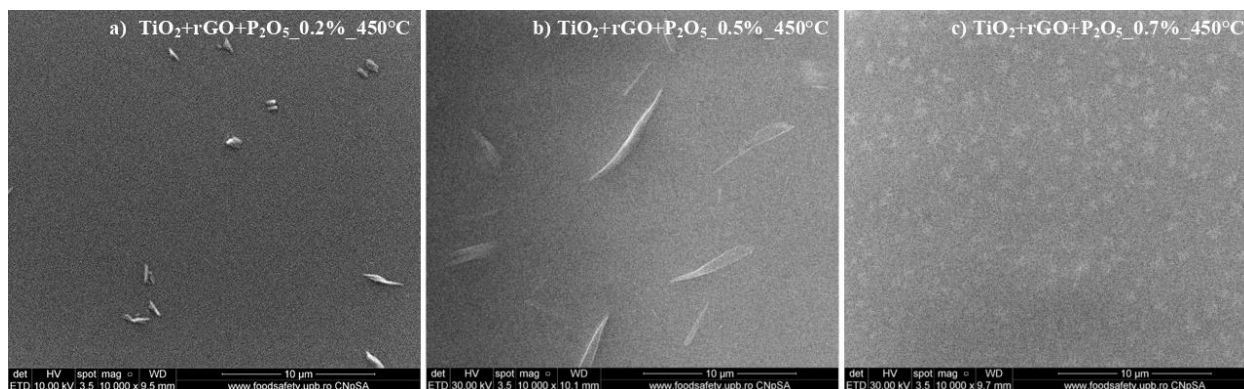


Fig. 5. Imaginile SEM ale filmelor compozite $\text{TiO}_2+\text{rGO}+\text{P}_2\text{O}_5$ tratate la 450°C, cu conținut variabil de P_2O_5 (0.2%, 0.5% și 0.7%).

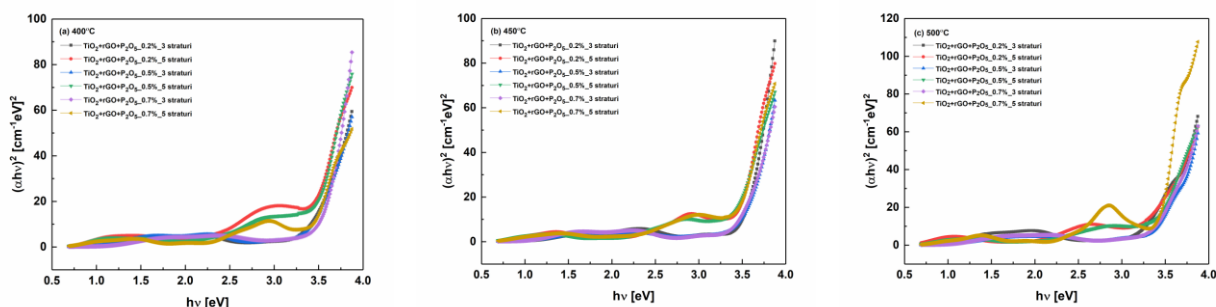


Fig. 6. Reprezentările Tauc ale $(\alpha h\nu)^2$ în funcție de energia fotonilor ($h\nu$) pentru filmele subțiri compozite $\text{TiO}_2+\text{rGO}+\text{P}_2\text{O}_5$ tratate termic la: a) 400°C, b) 450°C și c) 500°C.

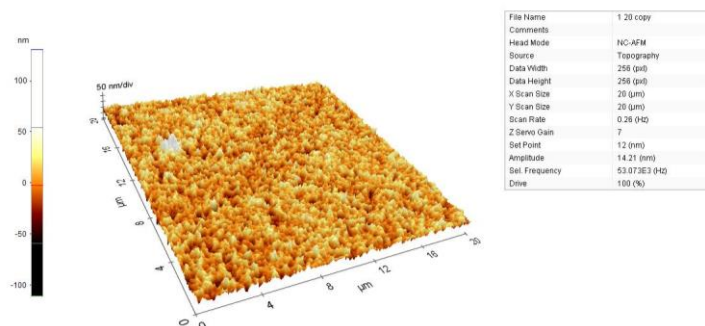


Fig. 7. Reprezentare AFM a filmului $\text{TiO}_2-\text{rGO}-\text{P}_2\text{O}_5$ 0.5% la 450 °C

Concluziile studiului prospectiv:

- Analizele FTIR, UV-Vis și SEM au evidențiat o morfologie uniformă și interfețe bine definite;
- Analiza spectrelor de absorbție arată că proprietățile optice ale filmelor $\text{TiO}_2\text{-rGO-P}_2\text{O}_5$ depind de grosimea stratului, concentrația dopanților și temperatura de tratament termic;
- Analiza spectrelor de transmisie optică a arătat că proprietățile filmelor $\text{TiO}_2\text{-rGO-P}_2\text{O}_5$ sunt puternic influențate de numărul de straturi și de temperatura de tratament termic. Toate probele prezintă franje de interferență în domeniul vizibil și NIR, confirmând formarea unor filme uniforme. Creșterea de la 3 la 5 straturi determină deplasarea maximelor către lungimi de undă mai mari și o ușoară scădere a transmisiei, asociată creșterii grosimii și pierderilor optice. Tratamentul la 500°C îmbunătățește claritatea franjelor, indicând o cristalinitate și densificare superioară. Prezența rGO reduce transmisia totală la ~60–65%, contribuind la ajustarea proprietăților optice ale sistemului.
- Incorporarea sinergică a P_2O_5 și rGO a condus la îmbunătățirea transportului sarcinilor electrice, prin facilitarea separării eficiente a purtătorilor de sarcină și reducerea recombinației electron–gol, precum și la extinderea absorbției luminii în domeniul vizibil.
- Calitatea filmelor subțiri a fost influențată semnificativ de conținutul de rGO, grosime și temperatura de recoacere.