



(12) CERERE DE BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: a 2014 00638

(22) Data de depozit: 20/08/2014

(41) Data publicării cererii:
26/02/2016 BOPI nr. 2/2016

(71) Solicitant:
• UNIVERSITATEA "DUNĂREA DE JOS"
DIN GALAȚI, STR. DOMNEASCĂ NR. 47,
GALAȚI, GL, RO

(72) Inventatori:
• MUȘAT VIORICA DOMNICA, STR. OVIDIU
NR. 5, BL. M12, ET. 2, AP. 29, MEZEPA II,
GL, RO;
• HERBEI ELENA EMANUELA,
STR. ROȘIORI NR. 4, BL. BR 16A, SC. 1,
AP. 10, GALAȚI, GL, RO

(54) NANOMATERIAL HIDRID ȘI METODĂ PENTRU OBȚINEREA
DE FILME SUBȚIRI DIELECTRICE PENTRU ELECTRONICĂ
TRANSPARENTĂ ȘI/SAU FLEXIBILĂ

(57) Rezumat:

Invenția se referă la un material hibrid și la un procedeu pentru obținerea acestuia, utilizat în electronică transparentă și/sau flexibilă. Materialul conform invenției conține atomi de zirconiu și monomer de metilmetacrilat într-un raport de 1...4:1, și monomer de 3-metacril-oxipropil-trimetoxisilan în același raport față de atomii de zirconiu, sub formă de film având dimensiuni de 50...300 nm, o constantă dielectrică de 12...18 și transparență optică în domeniul vizibil de 80...90%. Procedeu conform invenției constă în prepararea unei

soluții alcoolice conținând etoxid de zirconiu, 3-metacril-oxipropil-trimetoxisilan, metilmetacrilat și un agent de hidroliză și stabilizare, depunerea prin centrifugare a soluției pe un substrat solid, sub formă de film de gel, și tratamentul post depunere, prin tratament termic în vid preliminar și tratament UV.

Revendicări: 5
Figuri: 4



NANOMATERIAL HIBRID ȘI METODĂ PENTRU OBTINEREA DE FILME SUBȚIRI DIELECTRICE PENTRU ELECTRONICĂ TRANSPARENTĂ ȘI/SAU FLEXIBILĂ

DESCRIEREA INVENȚIEI

Invenția se referă la obținerea de filme hibride dielectrice cu caracteristici funcționale adecvate utilizării ca porți dielectrice în tranzistoare cu efect de câmp pe bază de filme subțiri. Un dielectric poartă este un film dielectric depus între poarta și substratul unui tranzistor cu efect de câmp, care trebuie să răspundă simultan mai multor constrângeri: interfața cu substratul să fie „electric curată”, să aibă o concentrație cât mai mică a electronilor în banda de conducție, capacitatea dielectrică să fie mare pentru a crește transconductanța FET și grosimea filmului să fie suficient de mare pentru a evita străpungerea dielectricului și scurgerile de curent prin acesta. Odată cu scăderea dimensiunii dispozitivelor electronice, pentru creșterea vitezei de operare și scăderea tensiunii de funcționare, grosimea stratului dielectric în circuitele integrate a coborât continuu. În general, capacitatea dielectricului variază invers proporțional cu grosimea lui. O reducere accentuată a grosimii stratului dielectric implică creșterea curenților de scurgere și scăderea tensiunilor de străpungere a dielectricului, probleme care pot fi rezolvate prin utilizarea de materiale cu constantă dielectrică mare (“*high-k*”). Utilizarea materialelor “*high-k*” permite creșterea vitezei de operare și scăderea tensiunii de funcționare a tranzistorului fără a fi necesară scăderea accentuată a grosimii stratului dielectric.

Tranzistoarele pe bază de filme subțiri de înaltă performanță utilizabile în electronica transparentă și/sau flexibilă necesită porți dielectrice din materiale cu capacitate electrică ridicată la grosimi mici care să permită tranzistorului să opereze la tensiuni mici și fără hysteresis și să asigure în acelaș timp o transparentă ridicată în domeniul vizibil. Pentru intergrarea în circuite complementare, materialul dielectric trebuie să fie de asemenea compatibil cu depunerea ulterioară de acoperiri polimerice și să fie stabil la diverse tratamente chimice care să permită realizarea ulterioară a canalului semiconductor de tip-*n* sau tip-*p*. De asemenea, dispozitivele electronice flexibile cer ca filmul dielectric să fie mecanic flexibil și, pentru sistemele care utilizează substraturi din materiale plastice, este foarte important ca filmul să poată fi depus din soluție la temperatură joasă sub limita de stabilitate termică a substratului.

Dezvoltarea de materiale care să satisfacă simultan toate cerințele impuse unor porți dielectrice utilizabile în electronica transparentă și/sau flexibilă constituie o mare provocare. În acest scop, materialele hibride reprezintă varianta optimă deoarece ele combină avantajele polimerilor organici ca procesabilitate, flexibilitate, aderentă și conformitate cu suprafața substratului, cu cele ale componentei anorganice ca stabilitate termică și chimică, constantă dielectrică mare, rezistență mecanică. Atunci când fiecare dintre cele două componente (organică și anorganică) separat prezintă proprietăți dielectrice, prin optimizarea raportului lor și realizarea unei legături chimice directe între ele se poate modifica în mod controlat valoarea energiei benzii interzise și în consecință proprietățile dielectrice ale materialului.

Materialele hibride pot fi constituite din straturi alternative de compus organic și compus anorganic (structură hibridă multistrat) sau pot conține cele două componente (organică și anorganică) legate covalent între ele și dispersate la scară nanometrică sau moleculară în cadrul aceluiaș strat.

Se cunosc procedee de obținere a materialelor hibride de tip multistrat prin depunerea succesivă a stratului organic și a stratului anorganic folosind metode chimice (cu auto-asamblare) sau metode fizice. În cazul obținerii materialelor hibride monostrat se folosesc în special metode chimice din soluție. În continuare se va face referire doar la metodele de obținere a filmelor hibride pe bază de oxid de zirconiu și (poli)metilmetacrilat sau asemănător.

Se cunosc metode de obținere a materialelor pe bază de ZrO_2 -PMMA cu diferite aplicații, care utilizează ca materii prime direct nanoparticule de oxid de zirconiu și polimerul polimetilmetacrilat (PMMA) cu diferite mase moleculare. Dintre acestea, metoda propusă de Wolf Dieter Müller ș.a. pentru aplicații în medicină (WO/2009/135697) [B1] are dezavantajul că folosește temperaturi înalte de procesare de până la $500^\circ C$, temperatură la care structura și proprietățile dielectrice ale polimerului pot fi modificate. Această metodă și altele [A1-A2] care utilizează direct nanoparticulele oxidice ca și componentă anorganică dielectrică prezintă dezavantajul că la dispersarea nanoparticulelor în matricea polimerică de PMMA se pot produce defecte (aglomerări, porozitate) în anumite zone ale filmului subțire. Acesta este un inconvenient major în cazul utilizării filmului ca poartă dielectrică într-un tranzistor, deoarece conduce la apariția fenomenului de străpungere a filmului și implicit la distrugerea tranzistorului, precum și la valori nereproductibile ale parametrilor de funcționare a tranzistorului.

Marks Tobin J ș.a. (WO2011146744) [B2] au brevetat o metodă de obținere a unei structuri hibride multistrat dielectrice, pentru aplicații în dispozitive electronice de tip tranzistori cu film subțire (TFTFT) și memorii nevolatile (DRAM), constând dintr-un strat conductor de oxid de staniu dopat cu indiu (ITO) și unul sau mai multe straturi duble depuse peste acestea. Fiecare strat dublu include un strat organic " π -polarizabil" și un strat anorganic de oxid de zirconiu, care interacționează chimic selectiv cu stratul organic printr-un proces de auto-asamblare [A1]. Această metodă conduce la o structură hibridă multistrat cu constantă dielectrică mai mică decât 10, cu următoarele dezavantaje: procedura de obținere este complicată fiind constituită din multe etape în care există probabilitatea de impurificare a straturilor datorită multitudinii de reactivi și solvenți utilizați, risc ridicat de neuniformitate a straturilor hibride datorită unor defecte de "cuplare" la auto-asamblarea straturilor de ZrO_2 și temperatura de obținere care variază între $100-400^\circ C$.

Silvia Gross ș.a. au propus o metodă de obținere a unui film dielectric hibrid pentru tranzistori cu efect de câmp utilizând ca materie primă clusterul de oxozirconiu metacrilat ($Zr_4O_2(OMc)_{12}$) fotoreticulat cu metilmetacrilat (MMA), cu dezavantajul că filmul obținut, având o constantă dielectrică de numai 1,93 (la $25^\circ C$ and 1 kHz), nu este adecvat utilizării în electronica transparentă care necesită filme transparente foarte subțiri [A3]. Constante dielectrice mai mari (5.2-9) au fost obținute de Y. Wang ș.a. [A4] pentru filme dielectrice hibride utilizate în tranzistor organic cu efect de câmp (OTFT), fabricate din alcoxizi de titan și/sau zirconiu și metil metacrilat și reticulate de asemenea prin polimerizare în UV, cu

dezavantajul că densitățile de curent de scurgere (10^{-6} - 10^{-7} A/cm²), deși mai mici decât în cazul [A3], sunt mai mari decât pentru materialul propus în această invenție (10^{-7} - 10^{-11}).

Yogo Toshinobu ș.a. propun fabricarea unui film poartă dielectrică, pentru un tranzistor organic pe baza de filme subțiri (OTFT), format prin depunere spin de soluție compusă din metal-acrilat sau metal-metacrilat sau metal-acetil acetonat, și care în final conține oxid de zirconiu sau oxid de titan sau soluție solidă de oxid de zirconiu/oxid de titan (**JP2008147410 (A)**) [B3], cu dezavantajul că prepararea soluției durează 24 ore, se utilizează compuși chimici toxici (hidrazina, acetil acetona), atmosfera de lucru este în gaz inert (Ar), temperatura de tratament este de 200 de grade, iar pentru evaporarea solventului se folosește un vid ridicat. În același timp, constanta dielectrică a filmelor obținute variază între 6 și 10.

Ito Yutaka propune realizarea prin metode chimice din soluție, inclusiv prin printare, a mai multor filme groase hibride cu proprietăți izolatoare electric, formate dintr-un compus polimeric, un compus metalic (element metalic din grupele 4, 5) legat de compusul polimeric printr-un atom de oxigen și o altă moleculă organică legată la atomul metalic printr-un atom de oxigen sau de azot (**US 8309954**) [B4]. Printre filmele propuse se numără și un film hibrid pe bază de zirconiu, care folosește ca precursor anorganic tetra-n-butylzirconat ((nBuO)₄Zr) și polivinil fenol (PVP) ca și compus polimeric iar metilmelamina ca moleculă organică de legătură, cu dezavantajul obținerii unui film cu constantă dielectrică mică (4), utilizării unor solvenți toxici și/sau iritanți (metanol, benzen, tetrahidrofuran etc) și efectuării tratamentului de stabilizare a filmului la temperaturi de până la 200-250°C.

Kurita Kimio și Shimizu Shigeru prezintă o metodă de obținere a unui film hibrid format din oxid de zirconiu generat *in situ* din butoxid de zirconiu într-o matrice de copolimer format din polimetil metacrilat și 3-metacril-oxipropil-trimetoxisilan (PMMA/MPS) (**JP2003147148 (A)**) [B5]. Această metodă urmărește ca, beneficiind de transparența optică în vizibil excelentă a polimerului PMMA, să obțină un material hibrid care să fie utilizat pentru îmbunătățirea proprietăților mecanice și de protecție UV pentru lentile din material plastic, păstrând transparența optică specifică filmului de PMMA. Autorii, care raportează obținerea de filme groase (zeci de micrometri) pentru aplicații de protecție (UV și mecanică), nu și-au propus obținerea de filme subțiri cu proprietăți electrice, nefăcându-se nici o mențiune cu privire la proprietățile dielectrice sau aplicabilitatea filmului obținut în domeniul electric/electronic.

Referințe

- [A1] Yiqing Hu, Guangxin Gu, Shuxue Zhou, Limin Wu, *Preparation and properties of transparent PMMA/ZrO₂ nanocomposites using 2-hydroxyethyl methacrylate as a coupling agent*, Polymer 52 (7) (2011) 122–129.
- [A2] E. E. VALCU (HERBEI), V. MUSAT, M. JANK, S. OERTEL, *Sol-gel Preparation of ZrO₂-PMMA for Thin Films Transistors*, REV. CHIM 65 (5) (2014) 574-577.
- [A3] S. Gross, V Di Noto, U. Schubert, *Dielectric investigation of inorganic-organic hybrid film based on zirconium oxocluster-crosslinked PMMA*, Journal of Non-Crystalline Solids, Journal of Non-Crystalline Solids, 322 (1–3) (2003) 154–159.

- [A4] Yuedan Wang, Yeonok Kim, Eunju Lee si Hongdoo Kim, *Fabrication of Organic Thin-Film Transistors Based on Cross-Linked Hybrid Dielectric Materials*, Yuedan *Jpn. J. Appl. Phys.* 51 (09MJ02) 2012, doi:10.1143/JJAP.51.09MJ02.
- [B1] Brevet **WO 2009135697 (A8)** - *Method for producing a bone cement with bioactivity and bone cement kit*, Wolf Dieter Müller, Elke Mitzner și Cristian Müller (DE).
- [B2] Brevet **WO2011146744 (A1)** - *Organic-inorganic hybrid multilayer gate dielectrics for thin-film transistors*, Marks Tobin, Ha Young-Geun, Facchetti Antonio (US).
- [B3] Brevet **JP2008147410 (A)** - *Thin film transistor using organic/inorganic hybrid film in gate insulating layer and its manufacturing method*, Yogo Toshinobu; Asano Takeshi; Suzuki Makoto; Miura Noriko (JP).
- [B4] Brevet **United States Patent 8309954** - *Insulating thin film, formation solution for insulating thin film, field-effect transistor, method for manufacturing the same and image display unit*. Ito, Yutaka (US) .
- [B5] Brevet **JP2003147148 (A)** - *Polymethyl methacrylate/zirconia hybrid film* , Kurita Kimio si Shimizu Shigeru (JP).

Problema de rezolvat este aceea de a oferi o metodă de obținere la temperatură cât mai scăzută, între 100-200°C, a unui material hibrid sub forma de film subțire (50-300nm) depus prin spin, cu constantă dielectrică mai mare de 10, de preferat mai mare de 15, cu o transparență optică în vizibil de minim 80% , cu flexibilitate, aderență și rezistență chimică bune, compatibil cu utilizarea ca poartă dielectrică în TFT pentru electronica transparentă și flexibilă.

Realizarea unui material hibrid dielectric implică realizarea unei legături chimice directe între componenta anorganică și cea organică. “Compatibilizarea” chimică a componentelor organică și anorganică implică utilizarea unor agenți chimici cu caracter acid sau bazic care, dacă rămân în interiorul filmului, pot duce la scurgeri de curent. Problema particulară de rezolvat a fost găsirea acelor reactivi și a raportului optim dintre ei, care să genereze în situ un material hibrid cu structura omogenă la scară moleculară (fără separări de faze) (Figura 3), și în special găsirea agentului chimic “curat” care să permită obținerea și stabilizarea unei soluții alcoolice limpezi pentru depunerea filmelor, astfel încât după tratamentul post depunere termic și UV filmul dielectric să nu conțină “impurități” conductoare.

Soluția tehnică propusă în această invenție pentru realizarea unui film dielectric “high k” transparent și flexibil este generarea *in situ* simultan a compușilor dielectrici hibridi prin conectarea cu un agent bifuncțional adecvat a unor clasteri anorganici de ZrO₂ cu fragmente organosilanice de MPS și monomeri de MMA (Figura 1). Această structură este ideală pentru modelarea energiei benzii interzise și optimizarea proprietăților filmului dielectric “high k”. Mai mult, prezenta invenție se referă la metoda de obținere a acestui material sub formă de film dielectric multifuncțional (Figura 2), caracterizat prin constantă dielectrică cuprinsă între 12-18 și prin compactitate, aderență perfectă la substraturi de siliciu, SiO₂, polimeri organici sau metale, stabilitate chimică la acizi, baze și solvenți (alcooli inferiori, tetrahidrofuran) și transparență optică în domeniul vizibil cuprinsă între 80-90%, funcție de grosimea filmului și raportul component anorganic/component organic.

Dintre metodele de obținere din soluție, metoda sol-gel prezintă cel mai mare potențial de adaptabilitate pentru obținerea de materiale hibride la temperaturi scăzute, fiind o tehnică foarte versatilă în îmbinarea la scară moleculară în structuri omogene a unor compuși chimici din clase diferite. Prin alegerea adecvată a reactanților utilizați, temperatura de obținere poate scădea sub 200°C, făcând această metoda compatibilă cu fabricarea de dispozitive electronice transparente și flexibile. În prezent se studiază intens obținerea din soluție la temperaturi sub 200°C a diferitelor tipuri de filme funcționale (dielectrice, semiconductoare, conductoare) în vederea fabricării circuitelor electronice intergral din soluție, fiind vizată în special metoda printării.

Metoda de obținere propusă în această invenție constă în mai multe etape (Figura 2) și anume prepararea solului (I), depunerea solului pe substrat sub forma unui film de gel (II) și tratamentul postdepunere a filmului de gel (III), obținându-se în final un film hibrid stabilizat cu proprietăți dielectrice. Pentru prepararea solului, 1.25 g etoxid de zirconiu se dizolvă sub refluxare la temperatura de 50°C în 25 ml ethanol absolut. După dizolvare completă, se adaugă un volum de 3-metacril-oxipropil-trimetoxisilan (MPS) care este egal sau mai mare de 150 μl dar nu depășește 600 μl și se continuă agitarea cu refluxare. Soluția conține de asemenea un compus chimic cu rol dublu de hidroliză și stabilizare care conține un număr de atomi de carbon egal sau mai mare de doi, dar mai mic de 6. După obținerea unui sol transparent și cu o vâscozitate scăzută se adaugă o cantitate de metilmetacrilat în raport echimolar cu MPS și se continuă agitarea până la limpezirea completă a soluției. Soluția astfel obținută este lăsată să se răcească la temperatura camerei, după care poate fi folosită pentru depunerea de filme subțiri, prin metoda spin-coating la viteze de 2000-3000 rpm. Solul poate fi lăsat la maturare 24 ore înainte de depunerea filmelor. Depunerea se realizează după ce soluția a fost filtrată prin microfiltre cu diametru de 450 nm pentru eliminarea unor eventuale impurități. După depunere, filmul este tratat termic la o temperatură între 100-200°C, dar nu mai mică de 120°C și care nu atinge 200°C. Tratamentul termic se poate realiza cu sau fără vid preliminar (17-20mbar) pentru o durată de maxim 30 minute. După răcire, filmul este supus unui tratament final cu radiație UV (254nm). Filmul cu un singur strat astfel obținut are o grosime de aproximativ 60 nm. Pentru creșterea grosimii filmului, se pot depune mai multe straturi succesive stabilizate fiecare prin tratament termic, sau se poate concentra solul.

Diferența majoră dintre invențiile anterioare, în special invenția [B3], și invenția propusă de noi este determinată de ordinea adăugării/amestecării precursorilor și altor reactivi. Astfel, metoda menționată în [B3] promovează mai întâi reacția de polimerizare între dublele legături C=C din monomerii MMA și MPS realizând o matrice de copolimer în care ulterior, prin reacția de hidroliză și condensare a moleculelor de alcoxid (butoxid) de zirconiu, se formează nanoparticulele de ZrO₂ care se leagă de matricea de copolimer. Ca urmare, în acest caz se realizează un material hibrid de tip nanocompozit format din matrice de copolimer PMMA-MPS, generată în prima etapă și din nanoparticule ale fazei anorganice de ZrO₂, realizate ulterior.

Materialul hibrid propus în această invenție este caracterizat din punct de vedere chimic prin aceea că este format dintr-o succesiune ordonată de fragmente anorganice (Zr-O-Zr) legate de fragmente organosilanică de MPS și monomer organic de metilmetacrilat, realizată prin autorecunoastere (autoasamblare) pe bază de reacții simultane de condensare (între grupările OH ale etoxidului de zirconiu hidrolizat și ale MPS hidrolizat) și reacții de polimerizare între dublele legături ale monomerilor MPS și MMA (Figura 1). Din acest punct de vedere, materialul propus de noi face parte din clasa II de materiale hibride care prezintă legături chimice puternice între componenți (legături covalente, legături coordinative).

Principalele elemente de noutate și avantajele materialului hibrid nou creat și ale metodei de obținere a acestuia sunt:

1. Metoda de preparare a soluției este simplă, rapidă și nu utilizează solvenți toxici sau iritanți, cum se utilizează în alte metode.
2. Metoda de preparare a soluției este originală prin ordinea de adugare a precursorilor și prin utilizarea în sistemul Zr(OEt)₄-MPS-MMA a unui agent cu rol dublu de hidroliză și stabilizare acestea și tratamentul postdepunere au condus la un material hibrid foarte omogen din punct de vedere al structurii chimice și de faze (Figura 3).
3. Tunarea proprietăților dielectrice prin crearea de punți chimice hibride de tipul Zr-O-Si și Zr-O-C în urma unor reacții *in situ* simultane, cu păstrarea unei transparențe foarte ridicată și a flexibilității filmului, permite utilizarea lor în aplicații de electronică transparentă și flexibilă.
4. Realizarea unei compoziții chimice din care lipsesc elemente care ar contribui la apariția unor purtători de sarcină electrică (precum ionul Cl⁻, de exemplu), ceea ce scade valoarea curenților de scurgere.
5. Se obține un material hibrid cu adevărat "high k". Din cunoștințele noastre, materialul obținut prezintă cele mai ridicate valori ale constantei dielectrice pentru un material hibrid pe bază de Oxid Metalic - (P)MMA.
6. Realizarea unor filme foarte subțiri caracterizate prin curent de scurgere care variază între 10⁻¹² A pentru o tensiune aplicată în intervalul ±(1- 2)V și 10⁻⁷ A pentru o tensiune aplicată de ± 6 V la o grosime cuprinsă între 60-70 nm.

REVENDICĂRI

1. Nanomaterial hibrid conținând atomi de zirconiu, în care raportul dintre conținutul de atomi de zirconiu și monomer de metilmetacrilat este egal sau mai mare de 1:1 și egal sau mai mic de 4:1, iar raportul dintre conținutul de atomi de zirconiu și monomer de 3-metacril-oxipropil-trimetoxisilan este egal sau mai mare de 1:1 și egal sau mai mic de 4:1, caracterizat prin aceea că atomii de zirconiu pot fi legați, prin intermediul unui atom de oxigen, de un alt atom de zirconiu, de un atom de siliciu sau de un atom de carbon.
2. Film subțire format din nanomaterialul definit la revendicarea 1 caracterizat prin aceea că, la grosimi cuprinse între 50-300nm, poate prezenta un spectru de fotoelectroni cu raze X (XPS) cu picuri caracteristice speciilor chimice ZrO_2 , $ZrSiO_4$, $ZrOxCy$ (sub 3%) și SiO_2 , dintre acestea doar specia ZrO_2 prezintă un pic de difracție de raze X caracteristic unor nanocristalite de 1,9-2,2 nm, restul speciilor fiind amorfe.
3. Film dielectric transparent și flexibil definit la revendicarea 2, utilizabil în electronica transparentă și flexibilă, caracterizat prin transparență optică în domeniul vizibil de minim 80% și maxim 90%, constantă dielectrică egală sau mai mare de 12 și mai mică sau egală cu 18 și având capacitate constantă în intervalul de minim $\pm 2V$ cu valori între 10^{-9} - $10^{-10}F$ și curent de scurgere care variază între $10^{-12} A$ pentru o tensiune aplicată în intervalul $\pm(1-2)V$ și $10^{-7} A$ pentru o tensiune aplicată de $\pm 6 V$ la o grosime cuprinsă între 60-70 nm.
4. Procedeu de obținere a filmului dielectric transparent definit la revendicările 2 și 3, caracterizat prin aceea că este constituit din trei etape: I - Prepararea unei soluții alcoolice conținând etoxid de zirconiu, 3-metacril-oxipropil-trimetoxisilan, metilmetacrilat și un agent cu rol dublu de hidroliză și stabilizare; II - Depunerea prin centrifugare (spin) a soluției preparate în etapa I pe un substrat solid, sub formă de film de gel; III - Stabilizarea compoziției și structurii filmului de gel prin tratament termic în vid preliminar (17-20 mbar) și tratament UV (254nm).
5. Prepararea soluției definită la revendicarea 4 pentru prepararea filmului dielectric transparent, caracterizată prin aceea că agentul cu rol dublu de hidroliză și stabilizare conține un număr de atomi de carbon egal sau mai mare de doi, dar mai mic de 6.

DESENE EXPLICATIVE

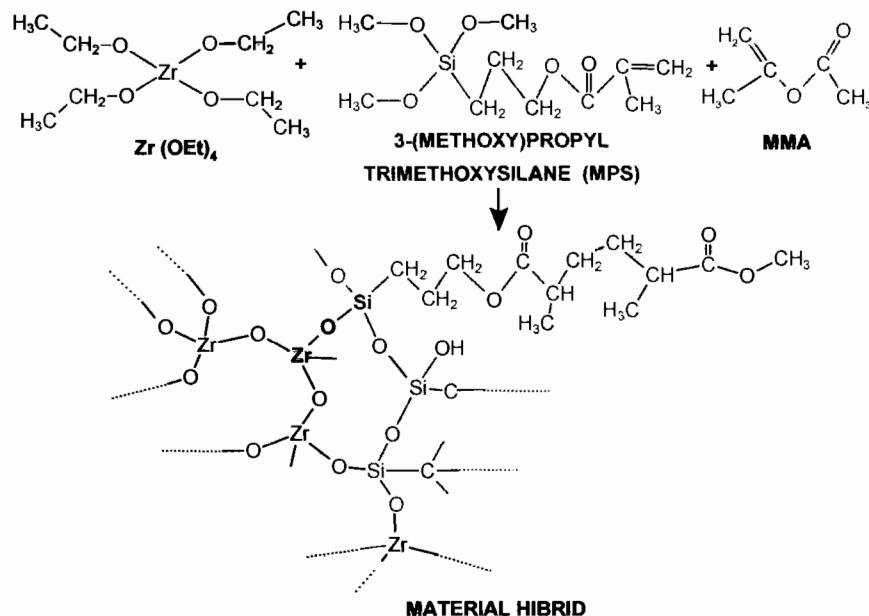


Figura 1. Structura chimică a materialului hibrid format din etoxid de zirconiu ($Zr(OEt)_4$), 3-metacril-oxipropil-trimetoxisilan (MPS) și metilmetacrilat (MMA)

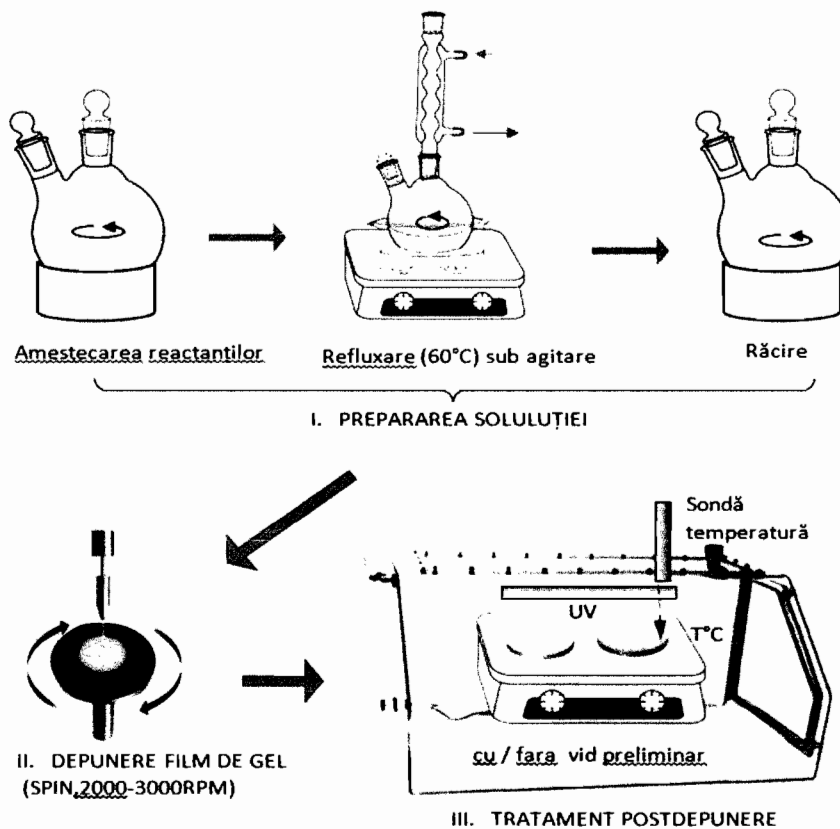


Figura 2. Reprezentarea schematică a etapelor de realizare a filmelor subțiri dielectrice

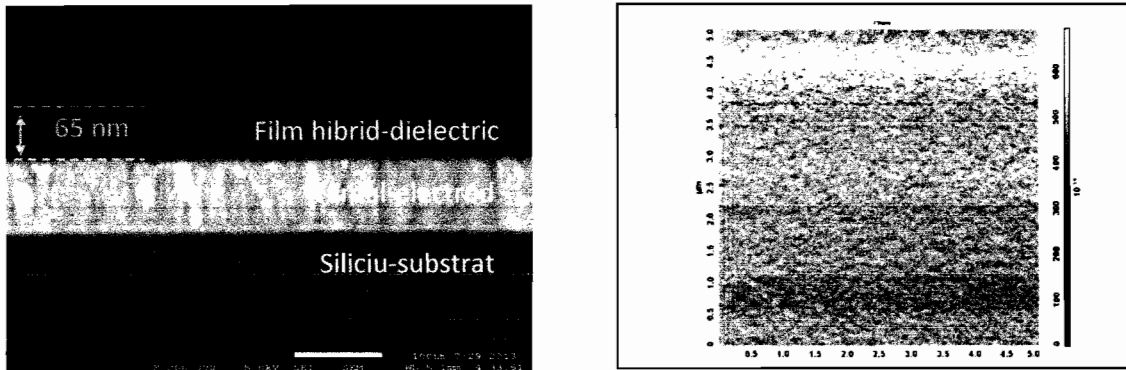


Figura 3. Imagine SEM în secțiune (stanga) și imagine AFM cu compozitia de faze a filmului hibrid (dreapta)

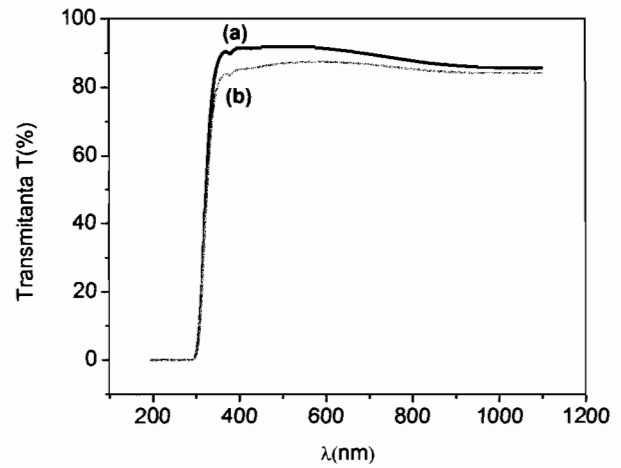
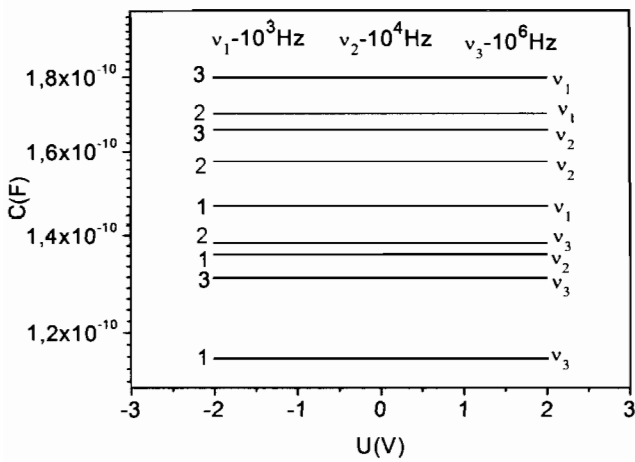


Figura 4 . Curbe C-V măsurate la diferite frecvențe pentru un film hibrid cu trei tratamente postdepunere diferite (1-UV, 2-T și 3-T+UV) (stânga) și curbe de transmitanță optică pentru două compoziții chimice diferite (dreapta)