

Anexa 8.1.B

NOTA DE FUNDAMENTARE
DIRECTII STRATEGICE DE CDI IN DOMENIUL NANOMATERIALELOR SI
NANOTEHNOLOGIILOR

1. Definirea directiei strategice**1.1 Denumire: FOTONICA****2. Motivarea propunerii****2.1 Situatia pe plan european a domeniului nanofotonicii**

Consortiul MONA („Merging Optics and Nanotechnologies”) a dezvoltat un Roadmap pentru fotonica si nanotehnologia din Europa in urma unui studiu de 2 ani prin intermediul unor interviuri cu experti din domeniu, unor simpozioane si workshop-uri. Roadmap-ul ofera o perspectiva asupra viitorului materialelor, echipamentelor, proceselor si aplicatiilor din domeniu. De asemenea, subliniaza pozitia Europei si perspectivele ei cu privire la nanofotonica si ofera recomandari pentru actiuni viitoare. MONA trebuie sa serveasca ca o informatie de baza pentru programele viitoare din FP7. In particular, rezultatele MONA pot fi folosite pentru construirea unor strategii de cercetare, atat pentru nanotehnologii, cat si pentru fotonica.

Sase tari si regiuni Europene au fost implicate in MONA, sub conducerea CEA-LETI, cu asistenta oferita de organizatii importante industriale si de cercetare-dezvoltare din domeniu, cum sunt, Acreo, AIXTRON, Alcatel-Thales, ASMI, the European Photonics Industry Consortium (EPIC), IMEC, OpticsValley, Schott, VDI Technologiezentrum (VDI TZ) si Yole Développement.

Roadmap-ul realizat de MONA identifica nanomaterialele cu cel mai puternic impact asupra nanofotonicii. Acestea sunt:

- **puncte cuantice si fire cuantice in Si, materiale III-V si II-VI**
- **nanestructuri plasmonice**
- **nanestructuri cu contrast mare de indice in Si si III-V**
- **nanotuburi de carbon**
- **integrarea electronicii cu fotonica**
- **nanoparticule in sticla sau polimeri.**

Echipamentele si metodele folosite sunt cruciale pentru imbunatatirea performantelor dispozitivelor nanofotonice. Metodele care vor avea cel mai mare impact potential asupra nanofotonicii si in acelasi timp au potential pentru producerea in masa sunt: **MOCVD, CNT CVD, sinteza coloidala, fabricarea de nanofosforuri, sinteza sol-gel, OVPD, litografia UV, nanoimprimarea si corodarea**. Metodele si echipamentele cu aplicabilitatea cea mai larga sunt: **MOCVD, MBE si chimia coloidala**, ca abordari tehnologice “bottom up” si **litografiile UV, e-beam si nanoimprimarea**, ca abordari tehnologice „top down”.

Recomandarile cheie ale MONA sunt:

- Oferirea de servicii suport de cercetare-dezvoltare si de echipament pentru **domeniul display-urilor** deoarece in Europa exista competente puternice in domeniile nanotuburilor de carbon, substraturilor de sticla si sistemelor de afisare. Mai mult, Europa poate beneficia de dezvoltarea sistemelor de afisare rigide cu OLED prin oferirea de servicii de cercetare-dezvoltare, material si echipament. De asemenea, mai sunt posibilitati de inovare netransferate inca industriei si in domeniul afisoarelor flexibile.
- Dezvoltarea de **puncte cuantice pentru celulele solare**. Piata fotovoltaicelor este in crestere.
- Mentinerea programelor de cercetare-dezvoltare in **domeniul detectiei in vizibil si infrarosu** pentru diferite aplicatii. In acest domeniu exista industrie importanta in Europa (STM, e2v). Mai mult, in detectia in infrarosu, Europa are jucatori cheie cum este Sofradir. Aceste companii pot sa fie interesate de punctele cuantice III-V ca o alternativa la MCT si QWIP conventionale.

- **Intensificarea programelor de cercetare-dezvoltare pentru iluminare.** Exista o piata larga pentru nanofotonica, care asigura o dezvoltare industriala de succes. Mai mult prezenta a doi mari jucatori europeni (Osram si Philips), reprezinta un mare beneficiu.
- Mentinerea programelor de cercetare-dezvoltare in domeniul **datacom/telecom**, in special pentru integrarea chip-urilor electronice si optice.
- Mentinerea programelor de cercetare-dezvoltare in domeniul fibrelor microstructurate, punctelor cuantice II-VI si plasmonicii, pentru **senzori bazati pe nanofotonica** (de exemplu, instrumente bazate pe rezonanta plasmonilor de suprafata au fost comercializati cu succes in Suedia de firma Biacore)
- Mentinerea competentei in cercetare-dezvoltare din domeniul **interconexiunilor optice**. Acest efort trebuie continuat pentru a putea concura cu SUA, unde DARPA, companii mari din domeniul microelectronicii (Intel, IBM) si firme mai noi (Luxtera, Kotura) sunt foarte active.

Roadmap-ul MONA identifica dispozitivele cheie pentru aplicatiile majore, care sunt prezentate in Anexa 1.

N.B. Roadmap-ul MONA a fost dezvoltat in contextul unei contributii si competitii la nivel mondial. Cooperari strategice cu activitati de roadmap din Japonia, Korea, Taiwan si SUA au asigurat relevanta acestui roadmap.

2.1.1 Nanotehnologiile si Fotonica – prezent si viitor

- Se considera ca optica si nanotehnologiile se intalnesc in domeniul in care structuri laterale, straturi, unitati moleculare, straturi interne si suprafete, cu dimensiuni critice sau tolerante mai mici decat 100 nanometri, scazand pana la ordinul de marime al atomilor, sunt produse, studiate si utilizate pentru, generarea, transmisia, manipularea, detectia si utilizarea luminii.

Au fost identificate noua domenii de **aplicatii**, in care nanofotonica va avea un impact major:

1. Senzori
2. Datacom/Telecom
3. Stocare de date
4. Afisare cu ecran plat
5. Imagistica
6. Instrumentatie
7. LED-uri si iluminare
8. Interconexiuni optice
9. Fotovoltaice

MONA a identificat mai mult de 50 de **dispozitive** diferite pentru care se asteapta ca nanofotonica sa aiba un impact semnificativ. In Anexa 2, sunt prezentate aceste aplicatii si dispozitive.

Din analiza MONA reies cele mai importante dispozitive nanofotonice pe care ar trebui sa se concentreze industria europeana. Pentru afisaje, dispozitivele nanofotonice cu un impact mare sunt iluminatoare pentru LCD cu CND sau LED-uri. OLED-urile sunt un caz particular. Desi impactul tehnologic nu va fi asa puternic, exista o concurenta mare in Europa care justifica alegerea OLED-urile ca dispozitive cheie si pentru FPD-uri sau iluminare. Pentru aplicatii de iluminare, importante sunt LED-urile cu fire cuantice II-VI (ZnO) si cristalele fotonice III - V. Pentru telecomunicatii, efortul ar trebui sa se concentreze pe dispozitivele fotonice cu Si (laseri, ghiduri de unda, comutatoare si detectori), fibre optice active (amplificatoare) cu nanoparticule si dispozitive nanofotonice integrate folosind tehnica CMOS. Interconexiunile optice ar trebuie sa beneficieze de dezvoltarea laserilor si portilor logice cu nanocristale de Si, dispozitivelor nanofotonice folosind tehnica CMOS si laserilor cu nanocristale din grupa III-IV. Pentru fotovoltaice, un impact mare vor avea celulele solare cu nanocristale din grupa III-V. Fotodetectoarele de infrarosu cu nanocristale din grupa III-V (QDIP) si plasmonica au un rol important in imagistica. Marcaje fluorescente cu nanocristale si senzori de indice de refractie sau biologici folosind plasmonica vor fi foarte importanti pentru generatia urmatoare de biosenzori.

Au fost identificate provocarile in domeniul **nanomaterialelor**. In Anexa 3, se prezinta: dezvoltarea cercetarii fundamentale, cresterea productiei si reducerea costurilor, accesul la procesul de

fabricatie, stabilirea standardelor industriale pentru punctele si firele cuantice semiconductoare si pentru cristalele fotonice/ nanostructurile cu contrast de indice mare.

2.1.2 Tehnologii si echipamente pentru Nanofotonica: provocari si impact

Echipamentul si procesele sunt strans legate de performanta dispozitivelor nanofotonice si mare parte din progresele realizate in domeniul nanofotonicii permit noi dezvoltari in sectorul echipamentelor. Mai mult, noile concepte din nanofotonica vor stimula dezvoltarea de noi echipamente si procese. Pentru nanofotonica, am divizat echipamentul in doua moduri: bottom-up si top-down. In general, echipamentul utilizat in nanofotonica este asemanator cu cel utilizat in micro-nanofotonica. Acesta este un motor foarte puternic si poate juca un rol important pentru aducerea nanofotonicii la un nivel industrial matur.

Tehnologiile bottom-up sunt acele tehnologii care depun activ orice material pentru a forma nanostructuri. In cel mai simplu caz, aceste tehnologii sunt utilizate doar pentru a forma un film subtire care cere ulterior tehnici de nanostructurare top-down. Oricum, cele mai sofisticate includ modalitati de formare directa a nanostructurilor. Tehnologiile bottom-up au fost extrase din toate sub-roadmap-urile focalizate pe nanomateriale specifice pentru aplicatii specifice. In plus, tehnologiile bottom-up au fost de asemenea examinate independent de aplicatiile specifice. Multe din aceste tehnologii exista deja ca tehnologii la scara non-nano. Exista insa cerinte specifice care trebuie indeplinite pentru a produce nanostructuri.

Tehnologiile analizate au fost urmatoarele:

- MOCVD (Depunere chimica din vapori metal-organic)
- MBE (Epitaxie cu fascicul molecular)
- Alte procese CVD
 - o CVD cu nanotuburi de carbon
 - o CVD cu SiO_x
 - o CVD cu nanofire de Si
 - o HVPE (Epitaxie din faza de vapori hibrida)
- Procese auxiliare
 - o Depunere directa de nanoparticule
 - o Sinteza chimica moleculara
 - o Ablatie laser
 - o Fabricare de nanofosfori
 - o Sinteza Sol-gel
 - o Piroliza
 - o Formare de particule de TiO₂
 - o Electrodepunere
 - o Depunere din faza de vapori cu ZnO
 - o Spin-coating
 - o Printare cu jet de cerneala
 - o OVPD (Depunere organica din faza de vapori)
 - o PECVD (CVD imbunatatit cu plasma)
 - o Ablatie laser pulsata

Tehnologiile top-down sunt acelea care definesc nanostructura fara a depune vreun material. Asta inseamna ca, de obicei, un film subtire, care a fost depus in prealabil, este structurat lateral. Abordarea aleasa sa analizeze tehnologiile top-down este echivalenta cu segmentul bottom-up. Tehnologiile au fost extrase din toate sub-roadmap-urile si au fost concentrate pe anumite nanomateriale pentru anumite aplicatii. In plus, acestea au fost investigate independent de aplicatii particulare. La fel ca tehnologiile bottom-up, multe din cele 28 tehnologii exista deja ca si nanotehnologii. Totusi, pentru a produce nanostructuri trebuie sa fie satisfacute anumite necesitati.

Tehnologiile analizate sunt urmatoarele:

- Lithografie:
 - o Fotolitografie
 - o UV indepartat
 - o EUV
 - o Litografie cu raze X
 - o Litografie cu fascicul de electroni
 - o Litografie nanoimprint
 - o Litografie cu fascicul de ioni
 - Corodare
 - MOCVD, CNT CVD, sinteza coloidala, fabricare de nanofosfori, sinteza sol-gel, OVPD, UV, litografie, nanoimprint si corodare.
- Echipamentele si procesele cu cea mai mare raspandire .
- MOCVD, MBE si chimie coloidala ca tehnologii bottom-up si litografie UV, cu fascicule de electroni si nanoimprint ca tehnologii top-down.

Alte tehnologii noi pentru nanofotonica apar in:

- optica in camp apropiat, materialele confinate cuantic, structurile plasmonice, structurile cu contrast de indice mare;
- diodele laser, LED-uri, senzori, afisoare, fotovoltaiice, sisteme cu un singur foton, fotonica siliciului.

2.2 Experienta si rezultate in fotonica pe plan national in domeniul fotonicii. Este vorba despre cele mai importante rezultate vizibile, identificabile (publicatii, cooperari internationale, interactiuni cu industria).

3. Resurse

a. **Organizatii si colective** (deja cu rezultate in domeniu, cu potential pentru dezvoltare si/sau utilizare in domeniu): Baza de date NANOPROSPECT arata ca 19 organizatii au indicat fotonica ca domeniu cu rezultate notabile sau ca o orientare spre fotonica in viitor, intre care 14 institute de cercetare 4 universitati si o firma. Nu s-au exprimat inca trei actori in nanofotonica care activeaza in Romania: companiile Honeywell si Alcatel, precum si Universitatea Bucuresti – Facultatea de Fizica.

b. **Resurse umane:** Se constata ca organizatiile mentionate au colective care actioneaza in domeniul nanofotonicii sau care isi pot orienta activitatea rapid catre nanofotonica.

c. **Infrastructura de nivel mondial:** Exista un numar insemnat de echipamente noi, performante, care pot fi utilizate in nanofotonica. Echipamentele si metodele folosite sunt cruciale pentru imbunatatirea performatelor dispozitivelor nanofotonice. Metodele care vor avea cel mai mare impact potential asupra nanofotonicii si in acelasi timp au potential pentru producerea in masa sunt: MOCVD, CNT CVD, sinteza coloidala, fabricarea de nanofosforuri, sinteza sol-gel, OVPD, litografia UV, nanoimprimarea si corodarea. Metodele si echipamentele cu aplicabilitatea cea mai larga sunt: MOCVD, MBE si chimia coloidala, ca abordari tehnologice “bottom up” si litografiile UV, e-beam si nanoimprimarea, ca abordari tehnologice „top down”.

d. **Parteneriate** (CD national, CD international, industrie): Exista un numar mare de proiecte internationale si interne care privesc nanofotonica. Toate sunt recente, majoritatea sunt in desfasurare.

4. Analiza datelor si propuneri de orientari strategice

(ale celor care lucreaza in domeniu: unde suntem competitivi, cum pot fi exploatare resursele existente in economie, in cooperarea internationala).

19 organizatii au indicat fotonica ca domeniu cu rezultate notabile sau ca o orientare spre fotonica in viitor. Ele sunt: Institute de cercetare – 14; Firme – 1; Universitati – 4.

Din lista de mai sus lipsesc patru actori in nanofotonica care activeaza in Romania: companiile Honeywell si Alcatel, precum si Univ. Politehnica, Fac. de Electronica, Universitatea Bucuresti – Facultatea de Fizica, care pana in acest moment nu au completat baza de date. Din lista de mai sus se vede ca masa critica a nanofotonicii din Romania se afla in institutele de cercetare; universitatile contribuie la nanofotonica cu centre de nanotehnologii care s-au dezvoltat in ultimii ani. Firmele importante ca Honeywell sau Alcatel-Lucent au deja parteneriate cu institute de cercetare si universitati.

Se constata ca exista un numar mare de proiecte internationale si interne care privesc nanofotonica. Toate sunt recente, majoritatea in desfasurare.

Se constata ca cercetatorii romani abordeaza teme avansate si de mare impact in nanofotonica: dispozitivele si circuitele nanofotonice pentru comunicatii performante sau sensori. De asemenea, celulele solare si alte metode de colectarea si conservarea energiei pe baza circuitelor nanofotonice. (EU-NoE-PHOREMOST)

Se constata ca organizatiile au colective care actioneaza in domeniul nanofotonicii sau care isi pot orienta activitatea rapid catre nanofotonica. Numarul de specialisti trebuie sa creasca cu cel putin 25% in urmatorii 5 ani si cu peste 100 % pana in 2020 aceasta insemnand si crearea unor noi institute dedicate nanotehnologiilor, aparitia unor noi firme multinationale pe piata romaneasca si noi catedre universitare dedicate nanofotonicii.

Resursele cele mai mari care insemnana specialisti si echipamente se afla in institutele de cercetare. Exista un numar insemnat de echipamente noi, performante, care pot fi utilizate in nanofotonica.

Parteneriatele organizatiilor care activeaza in domeniul nanofotonicii au fost introduse in baza de date fara a se specifica in ce subdomeniu al nanostiintelor functioneaza acestea. Totusi, se poate observa ca organizatiile studiului nostru se cunosc, au incheiate acorduri de parteneriat si au proiecte in comun. In plus exista numeroase parteneriate cu industria de nanofotonica; remarcam Honeywell, Thales, Siemens AG, Alcatel.

Existenta unui numar redus de brevete arata ca nanofotonica in Romania are o puternica componenta de cercetare insa transferul tehnologic si existenta firmelor de nanofotonica in Romania sunt insuficiente. De aceea, institutele de cercetare care reprezinta principala forta in domeniul nanofotonicii au ca parteneri in primul rand firme din UE si mai putin firme romanesti.

- Se poate spune deci ca in domeniul nanofotonicii exista institute performante (INCD-INFPLR, IMT, INCD-FM, INCD-Optoelectronica, Inst. Petru Poni-Iasi) firme puternice (Thales, Honeywell, Alcatel si Siemens), universitati cu centre dedicate nanotehnologiile (Universitatea Bucuresti –Fac. Fizica, Universitatea Politehnica Bucuresti –Fac. Electronica, Univ. “Dunarea de jos” din Galati).
- Consideram ca datele din ancheta permit realizarea la scara nationala a unui pol al nanofotonicii pe Platforma Magurele, care implica pe de o parte o utilizare eficienta a echipamentelor existente si pe de alta parte asigura pe termen lung intarirea parteneriatelor dintre universitati, institute de cercetare si firme.
- Se recomanda intarirea legaturilor cu platformele europene de nanofotonica (PHOREMOST si METAMORPHOSE) si participarea la actiunile organizate de acestea.
- Se recomanda apeluri de proiecte anuale in domeniul nanofotonicii si investitii constante in acest domeniu pana la nivelul anilor 2020 care sa vizeze urmatoarele domenii de cercetare prioritara:

Orientari strategice – Program prioritar

1. nanofotonica bazate pe siliciu sub forma de fire, puncte, sau straturi monoatomice
2. circuite fotonice in niobat de litiu si in cristale fotonice
3. laseri cu puncte cuantice, surse de “single photons”, comunicatii cuantice
4. nanosenzori fotonici in constructii, aviatie, sanatate, industria automotiva
5. display-uri active cu nanolaseri si cu LED-uri eficiente cu puncte cuantice
6. nano-materiale si nano-proces cu laseri ultra-intensi (proiectele CETAL, ELI)

Anexa 1. Roadmap-ul MONA - dispozitive cheie pentru aplicatiile majore

Aplicatia (piata in 2009)	Dispozitivele cheie	Pozitia UE		Riscul	Recomandari tehnice	Beneficii
		R&D	Indu strie			
Displayuri (90×10^9 \$)	CNT	+++	+	Mare	Cresterea calitatii productiei	Cresterea performatelor (putere consumata scazuta, calitate crescuta a imaginii)
	OLED	++	+	Scazut	Cresterea incapsularii	Display-uri mai subtiri si flexibile
Fotovoltaic e (50×10^9 \$)	Celule solare bazate pe puncte cuantice III-V	+++	+	Mediu	Un mai bun control al sintezei punctelor cuantice	Eficienta crescuta
Imagistica (10×10^9 \$)	Senzori CMOS bazati pe plasmonica	+++	++	Mare	Cresterea sensibilitatii cuplajului foton- plasmon	Cresterea sensibilitatii in vizibil
	Senzori bazati pe puncte cuantice III-V	+++	+++	Scazut	Cresterea raspunsului	Cresterea performatelor. Proces de fabricare mai simplu
Iluminare (6.8×10^9 \$)	LED-uri bazate pe fire cuantice de ZnO	++	++	Mediu	Imbunatatirea dopajului p, a injectarii de purtaatori si calitatii productiei	O calitate excelenta a materialelor
	LED-uri cu cristale fotonice III-V	+++	+++	Mediu	Obtinerea de procese cu costuri mici	Optimizarea extractiei luminii
Data/Telec om (4.5×10^9 \$)	Dispozitive fotonice cu contrast de indice mare in Si	+++	+	Mediu	Cresterea incapsularii si a cuplarii PIC-urilor. Integrarea cu SI. Nevoia de tehnologii standard pentru o serie larga de functionalitati.	Costuri scazute. Dispozitive mai compacte.
	Fibre active cu nanoparticule	++	++	Mediu	Imbunatatirea productiei si a performantelor.	Pierderi scazute

	Integrarea electronica/fotonica	+++	++	Mediu	Costuri mici, abordari la scala wafer-ului pentru incorporarea dispozitivelor III-V pe Si	Costuri scazute, interconexiuni optice performante.
	Interconexiuni in Si	+++	++	Mare	Probleme de fabricare (Compatibilitate CMOS)	Performanta marita si compactizare
Senzori (4.2×10^9 \$)	Marcare fluorescenta cu puncte cuantice II-VI	++	+	Scazut	Controlul distributiei de dimensiuni	Sensibilitate crescuta pentru biosenzori. Timp de viata mai lung.
	Biosenzori plasmonici	++	+	Mediu	Integrarea cu tehnologii existente (Si), integrarea pe chip.	Sensibilitate crescuta. Senzori foarte mici (matrici dense de senzori).
Interconexiuni optice (0.8×10^9 \$)	Surse laser cu puncte cuantice III-V	++	++	Mediu	Cresterea productibilitatii si compatibilitatii CMOS, stabilitatea termica.	Dispozitive compacte. Performante mari. Pot fi folosite echipamente de fabricare microelectronice.
	Surse laser bazate pe puncte cuantice de Si	+++	+	Mare	Controlul dimensiunii si a densitatii nanocristalelor de Si	Compactizare si performante ridicate.
	Conexiuni cip-cip	+++	++	Scazut	Solutii cu cost redus	Proces matur.
	Conexiuni cu surse hibrid integrate	+++	++	Mediu	Capacitatea de fabricare (Compatibilitate CMOS)	Compactizare si performante ridicate.
	Conexiuni complete Si	+++	++	Mare	Capacitatea de fabricare (Compatibilitate CMOS)	Compactizare si performante ridicate.

Anexa 2. Nanotehnologii si Fotonica – Dispozitive si aplicatii

Aplicatii	Dispozitive
Date / Telecomunicatii	Surse laser, Fibre pentru transmisie, Multiplexori, convertori de frecventa, filtre, linii de intarziere, comutatori, modulatori, emiator-receptor, Ghiduri de unda, Amplificatoare, Dispozitive tampon,

	Absorbanti saturabili, Dispozitive cu contrast mare de indice, Detectori.
Interconexiuni optice	Surse laser, Modulatoare, tranzistoare, Ghiduri de unda cu contrast mare de indice, Ghiduri de unda metalice, Porti optice, Cupluri (conicitate inversa sau retea), Legaturi (chip la chip, hibride, bazate pe siliciu), Detectori (Ge sau bazati pe elemente din III-V).
Afisaje	Laser in verde, FED, Iluminare de fond a LCD (CNT sau LED), SED, Invelis organic AR, OLED, Nanofosfori, Crislale lichide sau afisaj cu proiectie (din Si)
Iluminare	LED : vizibil (alb, albastru, verde), UV ; OLED CNT FE
Stocare de date	Stocare optica (SIL, SuperRens), Stocare de date cu densitate ultraintalta, Laser cu puncte cuantice (quantum dots – QDs), Memorie cu puncte cuantice.
Imagistica	Dispozitiv de imagistica in UV, VIS, IR, Dispozitive pasive (filtre color, microlentile...)
Fotovoltaice	DSSC, Celule solare organice, Celule solare din Si bazate pe QD-uri, Celule solare bazate pe elemente chimice din grupele II si VI
Senzori	Marcare fluorescenta, Biosenzori, Senzori pentru masurarea concentratiei lichidelor, gazelor si pentru masurarea presiunii si a tensiunii, Senzori optici, Analizori de spectru
Echipamente	SNOM (varfuri de sondare, superlentile din SiC), Litografie SP

Anexa 3. Nanomaterialele

	C&D fundamentala	Cresterea productiei si reducerea costurilor	Accesul la procesul de fabricatie	Standardele industriale
Puncte si fire cuantice semiconductoare in:				
- siliciu in nanostructuri coloidale	x			
- materiale din grupele III- V incluzand nanostructuri	x			

coloidale				
- materiale din grupele II-VI incluzand nanostructuri coloidale	x	x		
Nanostructuri plasmonice / metalice incluzand nanostructuri (metal)	x			x (conectori optici)
Cristale fotonice / Nanostructuri cu contrast de indice mare in:				
- siliciu		x	x	x
- III - V		x	x	x
- alte materiale (fibre microstructurate)		x		
Nanostructuri organice	x	x		
Nanotuburi de carbon (CNT)		x		
Integrarea materialelor / structurilor cu interconectori electronici / Fotonica siliciului	x	x	x	x
Nanoparticule in sticla sau polimer		x		
Metamateriale	x			