

PROGRAMUL PN III-P3 “Premierea participării la Orizont 2020”

RAPORT STIINTIFIC

**Titlu Proiect: Nano-componente pentru sisteme electronice fara fir
inteligente**

Proiect contract : 25 din 01/01/2021

Cod Proiect: PN-III-P3-3.6-H2020-2020-0073

Autori:

**M. Dragoman (director proiect), Martino Aldrigo, Alina Cismaru,
Andrei Avram, Sergiu Iordanescu, Catalin Parvulescu**

Cuprins

1. Introducere ; obiective	3
2. Proiectare si simulare unei antene si a unei arii de antene patch cu GNC	5
3. Fabricare materialelor si caracterizarea lor si fabricatia antenelor	8
4. Masuratori antena NCG	12
5. Concluzii	16
6. Referinte	17

Rezumat

Obiectivele proiectului prevazute pentru fiecare activitate au fost realizate in totalitate. Rezultatele principale obtinute in anul 2021 au fost urmatoarele:

In cadrul IMT au fost simulate, fabricate si caracterizate antene si arii de antene patch cu un material grafenic denumit grafit nanocristalin (NCG) avand frecventa de operare la 24 GHz.

- 1) Simularea antenei a fost efectuata cu un simulator electromagnetic 3D - CST Microwave Studio® utilizand parametrii optimi ai antenei pentru a obtine rezultate bune in ce priveste pierdere la reflexie si castig. A fost utilizata tehnologia in linie coplanara (CPW) cu un substrat HRSi acoperit cu strat subtire dielectric de SiO₂ iar patch antenna este realizata dintr-un strat subtire din NGC, liniile coplanare sunt realizate din aur si pe spatele plachetei a fost depus un strat subtire de aluminiu ca plan reflector. Dimensiunile linii CPW (impedanta de 50 Ω) sunt compatibile cu sistemul de masura pe baza de probe CPW cu un pitch de 150 μm. Rezultatele simularilor demonstreaza ca antenna are o reflexie foarte buna, o rezonanta in banda 24-25 GHz si o eficienta de radiatie de 31% cu castig de 0.3 dBi , un rezultat foarte bun din moment ce antenele cu grafena monostrat au o eficienta de radiatie scazuta de numai 2-3 % si deci un castig redus cu valori negative. Rezultatele au fost obtinute din masuratoarea de conductivitate a NCG care a fost de 16000 S/m. Constatam o variatie a castigului intre -1.62 dBi si 0.85 dBi, in timp de frecventa de rezonanta variaza cu 130 MHz. A fost simulata electromagnetic o arie liniara de antene cu 8 elemente, dat fiind faptul ca castigul creste direct proportional cu numarul de antene. Simularile s-au facut in urmatoarele conditii: aria de antene a fost proiectata in spatiu liber si pe un suport de Plexiglas de 9 mm sub substratul de HRSi (folosit pentru masuratori). Rezultatele simularilor demonstreaza faptul ca aria de 8

antene NCG are performante apropiate cu o arie cu acelasi numar de antene din aur, dar eficienta de radiatie este mai mica in cazul NCG.

- 2) Au fost fabricate antene tip patch si aria de antene cu 8 elemente utilizand tehnologia in linie coplanara pe substrat de HRSi/SiO₂/NCG . Procesul de depunere NCG s-a efectuat în echipamentul NANOFAB 1000 (Oxford Instruments, UK), folosind un process de tip PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition) pe o placheta de Si/SiO₂ (oxid de siliciu crescut termic cu grosimea de 300 nm). Filmul subțire de NCG a fost corodat pentru a realiza antenele patch, rata de corodare fiind de aproximativ 50 nm / min, timpul total de corodare fiind de aproximativ 2 minute. Indepartarea completa a NCG din zonele expuse plasmei de oxigen a fost determinata prin masuratori electrice in 4 puncte. Filmul metalic de Cr/Au (10/490 nm) depus pe fata plachetei a fost configurat folosind un proces de lift-off. Initial, fotorezistul AZ1514 a fost centrifugat și configurat, urmat de o depunere metalica de Cr/Au. Fotorezistul a fost apoi indepartat folosind acetona intr-o baie de ultra-sunete. Pentru a proteja traseele metalice deja configurate în timpul proceselor tehnologice efectuate pe spate, după curățarea plachetei în acetona și IPA, fotorezist AZ1514 a fost centrifugat din nou pe fața plachetei. Un film metalic de Cr/Au (10/490 nm) a fost depus pe spatele plachetei, după care fotorezist AZ1514 a fost centrifugat și configurat. Filmul metalic a fost corodat in solutie specifica, dupa care placheta a fost curatata in acetona si IPA.
- 3) Caracterizarea experimentală a antenelor cu NCG, măsurătorile de câmp apropiat și de câmp îndepărtat au fost realizate utilizând echipamentele de măsură Agilent PNA N5227A, Rodhe Schwarz FSV40-N, și Agilent E8257D. Au fost realizate măsurători ale pierderii la reflexie în funcție de frecvență și de tensiunea de polarizare aplicată pe filmul de NCG. A fost demonstrat faptul că rezultatele simulate corespund cu cele măsurate, cu o rezonanță evidentă în banda 24 GHz.
- 1) Activitatea de diseminare a cuprins 1 lucrare publicată în revista ISI „IEEE Access: M. Aldrigo, M. Dragoman, S. Iordanescu, A. Avram, O.-G. Simionescu, C. Parvulescu, H. El Ghannudi, S. Montori, L. Nicchi, S. Xavier, and A. Ziaei, Tunable 24-GHz antenna arrays based on nanocrystalline graphite, IEEE Access 9, pp. 122443 – 122456 (2021)

1. Introducere

Raportul se refera la continuarea proiectului FP5 NANOSMART.

<https://cordis.europa.eu/project/id/825430> denumit NANO components for electronic SMART wireless systems in cadrul unei finantari de 1 an din partea UEFISCDI pentru a dezvolta cercetari care nu sunt incluse in proiect. Proiectul NANOSMART se refera la realizarea unor module de transmisie si receptie (T/R) la 10 GHz si 24 GHz. Aceste module T/R sunt integrate cu senzori de camp , umiditate si temperatura si care isi modifica functionarea in mod controlat datorita informatiilor primite din mediul exterior de la senzori. Acest scurt proiect a fost impartit in trei obiective :

Obiectiv 1. Proiectare si simulare: proiectare si simulare unei antene patch cu GNC In aceasta activitate, se va proiecta si simula (folosind un simulator electromagnetic 3D – CST Microwave Studio) o antena patch cu GNC cu frecventa de operare in banda ISM 24 GHz, cu datele experimentale sus mentionate si verificate teoretic prin formule care permit calcularea rezistentei de suprafata / conductivitatii unui film de grafena (formula Kubo). Antena va fi proiectata in configuratie CPW pentru masuratori on-wafer si aplicarea unui camp de polarizare orizontal intre traseele de masa laterale ale ghidului CPW si filmul de GNC.

Obiectiv 2. Fabricarea si caracterizarea materialelor: fabricarea filmelor de GNC si a antenelor proiectate in Activitatea 1, caracterizarea experimental a filmelor de GNC (aprilie 2021 – iunie 2021). In aceasta activitate, se vor fabrica si caracteriza experimental filmele de GNC (analiza Raman, AFM, SEM si electrica); de asemenea se vor fabrica antenele proiectate in Activitatea 1. Aceste antene vor fi ulterior echipate cu conectoare SMPM.

Obiectiv 3. Testare: caracterizarea experimental a antenelor cu GNC, masuratori de camp apropiat si de camp indepartat. In aceasta activitate, antenele cu GNC vor fi caracterizate experimental prin masurarea pierderii la reflexie functie de frecventa si de tensiunea de polarizare aplicata pe filmul de GNC. Ulterior, partenerul din consortiu NANOSMART va efectua la randul sau masuratori de camp apropiat si de camp indepartat pentru estimarea radiatiei antenei.

Tinta principala a proiectului este sa obtina antene tunabile la 24 GHz folosind grafena monolayer sau multilayer deoarece acesta este o antena bazata pe acesta isi poate schimba frecventa de lucru prin simpla aplicare a unei tensiuni continue pe grafena [1]. Aceasta proprietate este specifica materialelor 2D [2],[3] deoarece conductivitatea grafenei este variabila functie de tensiunea continua aplicata. Tunabilitatea antenelor in domeniul microundelor este posibila si datorita altor materiale cum ar fi materialele feromagnetice, feroelectrice sau cristalele lichide [4]-[6]. Insa spre deosebire de grafena aceste materiale nu sunt cu usurinta integrabile cu alte

sisteme electronice, in timp ce grafena se transfera cu usurinta pe plachete de Si/SiO₂ de 4inch sau 6 inch. Insa grafena monolayer are o problema si anume conductivitatea sa este mica in comparatie cu metalele si deci antena bazata pe grafena monolayer are proprietati degradate in comparatie cu o antena din metal. Sunt diverse metode de a creste conductivitatea grafenei si a o transforma intr-o structura cu conductivitate apropiate cu metalele : 10⁵–10⁶ S/m [7] - [10], dar in acest caz aceste grafena “metalica” nu isi mai schimba conductivitatea la aplicarea unei tensiuni continue. De aceea, am ales un material grafenic denumit grafit nanocristalin (NCG) cu grosimea de 110 nm si care are o buna conductivitate 10³-10⁴ S/m si a carui conductivitate poate fi modificata de tensiunea continua aplicata si care a fost crescuta de noi pe un substrat de SiO₂ crescut pe o placheta de Si de inalta rezistivitate (HR-Si) prin metoda PECVD [11]. Notam ca conductivitatea NCG este cu ordine de magnitudine mai mare ca a unei grafene monolayer care are conductivitatea de 10⁻² S/m. NCG este policristalin si este format din nanocristale grafenice aranjate aleator si conectate intre ele. Pe baza acestui material care nu a fost niciodata folosit in microunde am proiectat, fabricat si masurat antenele la 24 GHz.

2. Proiectare si simulare unei antene si a unei arii de antene patch cu GNC.

Configuratia antenei este prezentata in Fig. 1.

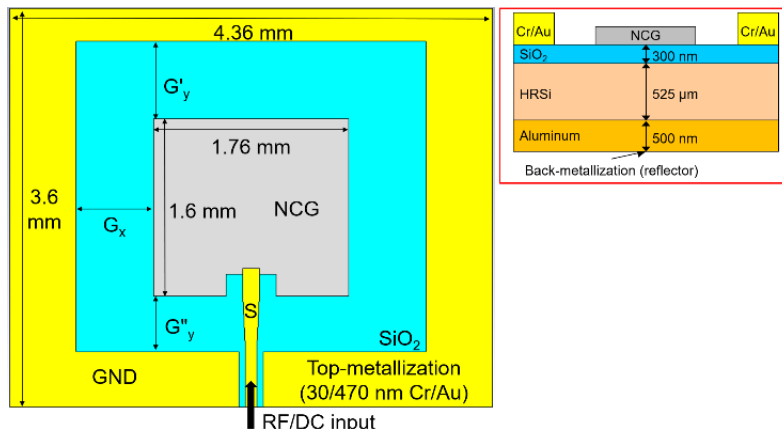
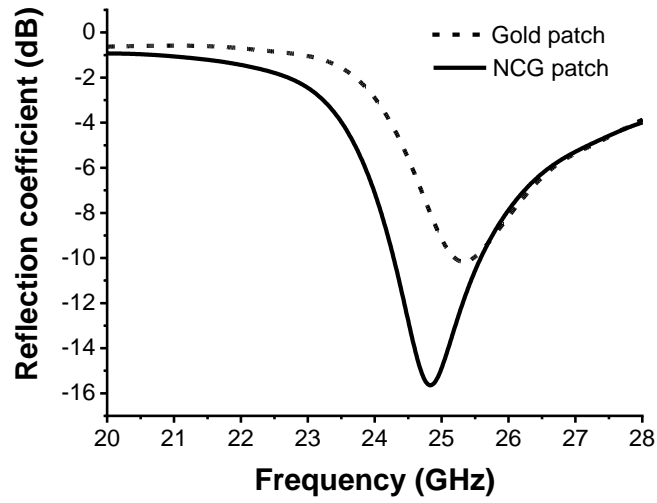


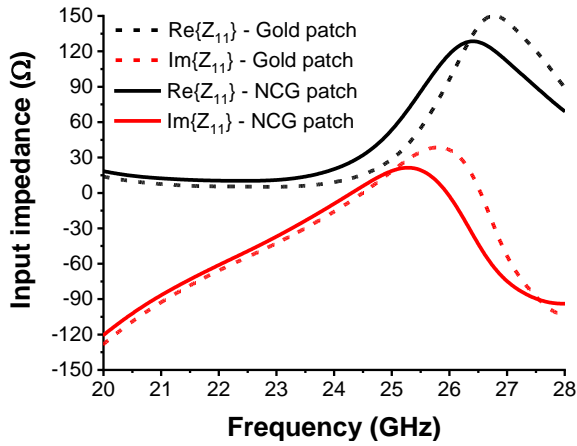
Fig. 1 Antena patch pe NCG pentru 24 GHz

Am considerat urmatoarele dimensiuni : grosimea HR-Si substratului : 525- μ m , SiO₂ are grosimea de 300 nm grown . Metalizarea este realizata (a) pe spatele substratului de Si: Al cu grosimea de 500 de nm (b) metalizarea pe fata plachetei : liniilor coplanare (Cr/Au) 200 nm (marcate cu galben pe figura) cu urmatoarele distante intre liniile exterioare (masa) si linia centrala (semnal): 60-100-60 μ m pentru a fi compatibile cu sistemul de masura cu impedanta de 50 Ω cu probe CPW cu un oitch de 150 μ m . Distantele G_x=G_y=0.7 mm, G_y=0.5 mm au fost alese pentru a permite o polarizare optima in current continuu a antenei NCG prin linia coplanara si o functionare optima a

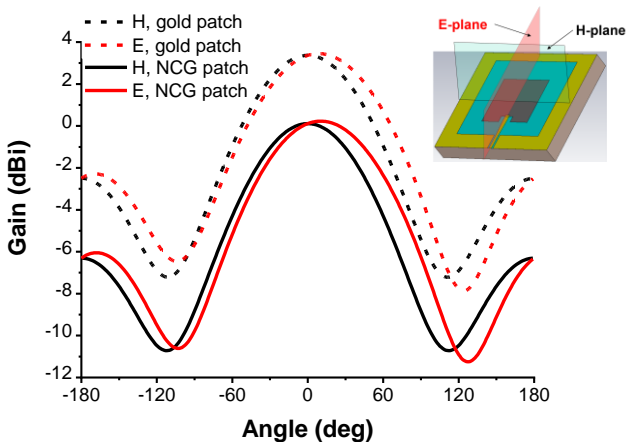
antenei. Simularea a fost efectuată cu un simulator electromagnetic 3D - CST Microwave Studio® și rezultatele simulării sunt prezentate în Fig. 2 a-c.



(a)



(b)



(c)

Fig. 2 Simularea antenei cu NCG la 24 GHz.

Observam ca antenna are o reflexive foarte buna, o rezonanta in banda 24-25 GHz si o eficienta de radiatie de 31 % si un castig de 0.3 dBi , un rezultat foarte bun din moment ce antenele cu grafene monolayer au eficienta scazuta de 2-3 % si deci un castig scazut cu valori negative. Rezulatele au fost obtinute din masuratoarea de conductivitate a NCG care a fost de 16000 S/m. in Fig. 3 am reprezentat castigul cand conductanta NCG variaza de la 4000 S/m si 28000 S/m, care rezulta din masuratori preliminare cand pe NCG se aplica ± 25 V.

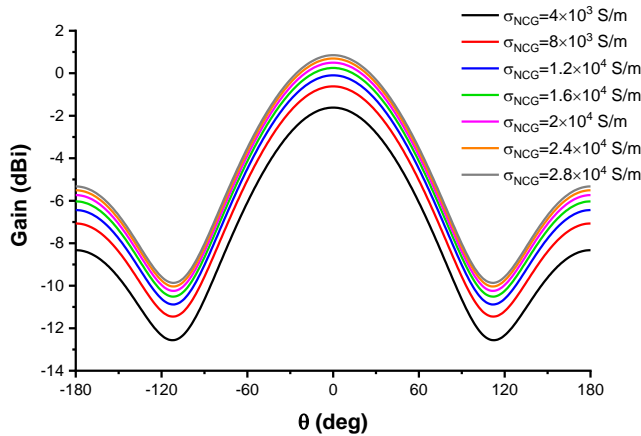
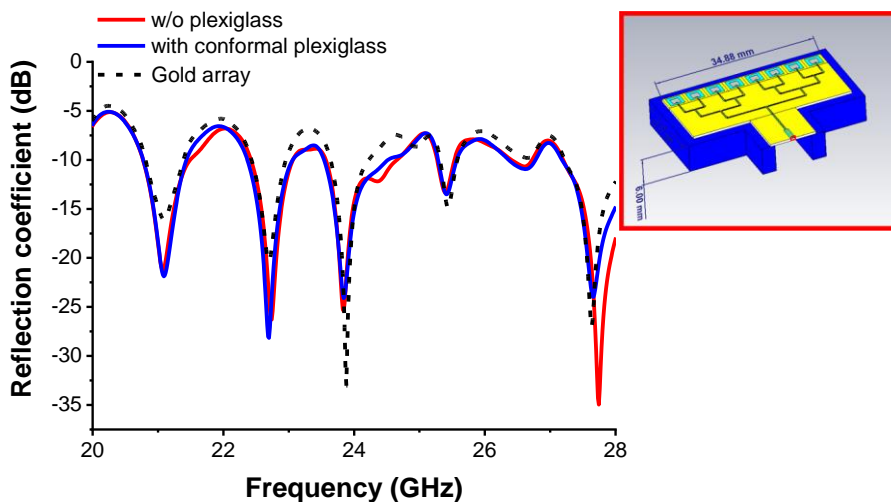


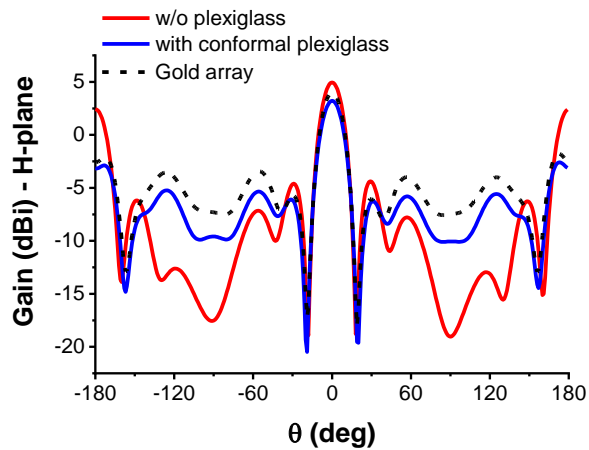
Fig. 3 Castigul antenei NCG cu variatia conductivitatii.

Constatam o variatie a castigului in intervalul -1.62 dBi and 0.85 dBi, in timp de frecventa de rezonanta variaza 130 MHz.

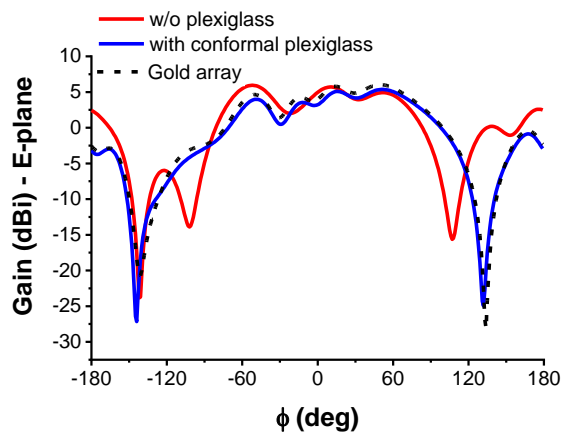
Am simulat o arie liniara de antene cu 8 elemente stiind ca, castigul creste direct proportional cu numarul de antene. Rezultatul acestor simulari este prezentat in Fig. 4 a-c.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Simularea ariei de antene cu 8 antene (a) coeficientul de reflexie (b) castigul in planul E (c) castigul in planul H.

Simularile s-au facut in urmatoarele conditii : aria de antene are un support de Plexiglas de 9mm sub substratul de HR Si folosit pentru masuratori sau fara . Rezulatele simularii sunt prezentate in tabelul I .

Tabelul 1 Rezultatele simularii ariei de antene la 24 GHz.

Type of antenna	Directivitate @ 24 GHz (dBi)	Castig @ 24 GHz (dBi)	Eficienta de radiatie (%)	Eficienta totala (%)
Patch Au	5.29	3.45	65	32
patch NCG	5.39	0.29	31	25
Arie cu antene Au	8.25	4	38	37
NCG arie cu antene NCG	8.31	3.22	31	30

Observam ca aria de 8 antene NCG are performante apropiate cu o arie cu acelasi numar de antene din Au ,dar eficienta de radiatie este mai mica in cazul NCG.

3 Fabricare materialelor si caracterizarea lor si fabricatia antenelor.

Procesul de depunere NCG s-a efectuat cu echipamentul NANOFAB 1000 (Oxford Instruments, UK), folosind un process de tip PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition). Placheta de Si/SiO₂ (oxid de siliciu crescut termic cu grosimea de 300 nm) a fost introdusa in reactor la temperatura de 200 °C si a fost incalzita cu 15 °C/min pana la 900 °C in atmosfera de Ar/H₂ (5%). Dupa atingerea temperaturii de proces, placheta a fost mentinuta in aceleasi conditii timp de 10 min pentru reducerea oxigenului atomic de pe suprafete, dupa care s-a continuat cu un pas de hidrogenare a suprafetei, in atmosfera de Ar/H₂ (10%) timp de 5 min. Depunerea NCG s-a facut în plasma de metan si hidrogen (CH₄ + H₂, raport masic 1:1,25) la temperatura de 900 °C, presiune de 1,5 Torr si putere RF 100 W, rata de depunere aproximativa fiind de 3 nm/min. Dupa oprirea plasmei, placheta este mentinuta in reactor in atmosfera de Ar și racita cu 9°C/min pana la 200 °C, inainte sa fie extrasa din reactor in camera de incarcare. Înainte de expunerea la condiții atmosferice, placheta este lăsată timp de 10 min in camera de incarcare la presiunea de 0,5 mTorr pentru atingerea temperaturii camerei. Pentru a determina tipul filmului carbonic depus, s-a folosit sistemul LabRAM HR 800 (Horiba Jobin Yvon, Japonia). Spectrele au fost achizitionate la lungimea de unda de 633 nm. In Fig.5 sunt prezentate spectrele achizitionate, in timp ce in tabelul 2 sunt parametrii rezultati. Se poate observa ca banda D este poziționata în jurul valorii de 1350 cm⁻¹, in timp ce banda G este deplasata de la pozitia normala 1580 cm⁻¹ la aproximativ 1592 cm⁻¹. Valoarea raportul intensitatii benzilor D și G (I_D/I_G), care ofera estimari asupra defectelor din structura cristalina a grafenei sau grafitului cristalin, este între 2,34 și 2,39, in timp ce deschiderea la semiînălțime (FWHM), care ofera indicatii asupra distributiei structurale, a dimensiunilor medii și dispersiei cristalitelor, este între 70 și 72 cm⁻¹ pentru banda D și între 64 și 78 cm⁻¹ pentru banda G. Deplasarea benzii G către lungimi de unda mai mici si raportul I_D/I_G aflat în intervalul 1,5 – 2,5 indica prezenta unui film de grafit nanocristalin. După cum se poate vede și în figura 1, banda 2D este centrata in jurul valorii de 2700 cm⁻¹. Pentru masurarea rugozitatii filmelor NCG depuse si variatia acesteia in functie de rugozitatea substratului, au fost preparate probe de Si, Si/SiO₂, Si/SiO₂/NCG si Si/NCG. Pentru referinta a fost masurată rugozitatea unei plachete de Si provenita din acelasi lot cu cele folosite ca substrat de crestere. Masuratorile au fost efectuate cu echipamentul NTEGRA Aura (NT-MDT Co., Rusia) pe o arie de 1 μm x 1 μm. Rugozitatea RMS pentru fiecare dintre probe a fost de 0,15 nm pentru Si, 1,13 nm pentru Si/SiO₂, 3,5 nm pentru Si/NCG și 3,7 nm pentru Si/SiO₂/NCG. Din aceste masuratori comparative putem

concluziona ca rugozitatea suprafetei filmului de NCG este datorata exclusiv granulatiei acestuia si nu este indusa de rugozitatea suprafetei substratului.

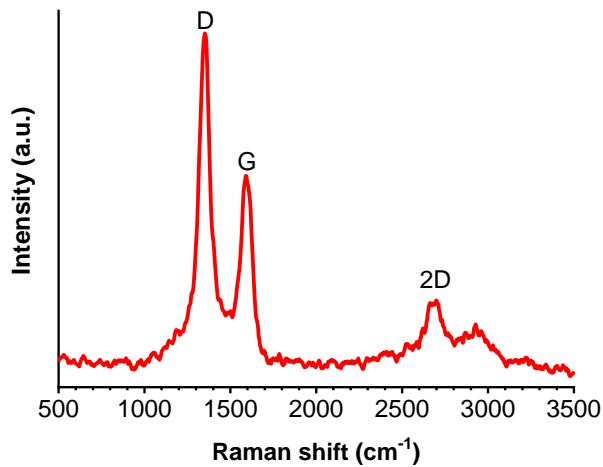


Fig.5. Spectrul Raman al filmului de NCG depus

Tabelul 2 Parametrii Raman

Growth time (min)	I_D/I_G (intensity ratio)	peak (D)	FWHM (D) (cm⁻¹)	FWHM (G) (cm⁻¹)
35	2.34–2.39	70–72	64–78	

Caracterizarea electrica a filmului de NCG s-a facut folosind metoda de masurare in patru puncta (four point probe). Caracterizarea electrica s-a facut atat pe plachete cu diametrul de 100 mm, în centrul acestora, nefiind nevoie de aplicarea unor corectii, stratul masurat fiind de ordinul sutelor de nanometri, cu mult mai subtire decat distanta dintre sonde, iar placheta poate fi considerata cu suprafata infinita. Pentru filmul de NCG cu grosimea de 110 nm, rezistivitatea de suprafata masurata a fost de 579 Ω/cm . Rezistivitatea de volum a filmului a fost calculată la 6.2 $m\Omega \cdot cm$, fiind echivalenta cu o conductivitate de 16150 S/m. Conductivitatea electrica a filmelor de NCG (σ_{NCG}) în funcție de grosime este prezentata in Fig. 6. Incepad cu grosimea de ~250 nm se poate observa o saturare relativa a conductivitatii electrice. Acest fapt este cel mai probabil datorat reducerii influentei substratului asupra conductivitatii filmelor de NCG. O marja de eroare acceptabila pentru aceste masuratori este de aproximativ 6%, luand in considerare eroare de masura a grosimii filmelor, cat si eroare de masura a sistemului de caracterizare electrica in patru puncte.

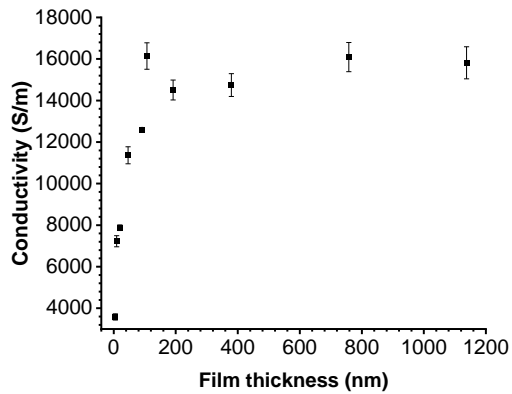
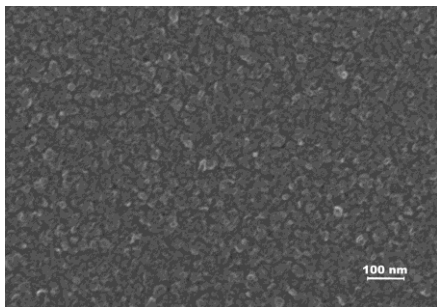
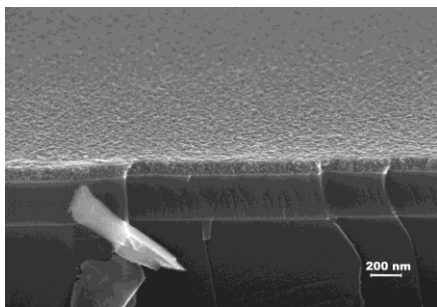


Fig. 6 Conductivitatea electrica a filmelor subtiri de NCG in functie de grosime.

În Fig. 7 sunt prezentate două imagini SEM ale filmului de NCG. Se poate observa un film compact cu structură columnară. In poza de mai sus (Figura 3a) se poate observa structura cristalitelor nano-grafitice specifică acestui tip de material..



(a)



(b)

Fig. 7 Imagini SEM ale filmului NCG

Pentru fabricarea antenelor au fost folosite plachete Float-Zone Hyper Pure Silicon (FZ-HPS) de tip p cu diametrul de 100 mm, orientare cristalografica (100), grosime $525 \pm 25 \mu\text{m}$ și rezistivitate $\rho > 10,000 \Omega \cdot \text{cm}$ achizitionate de la Topsil GlobalWafers A/S (Danemarca).

Procedura de curatare chimica este necesara pentru indepartarea tuturor contaminantilor organici și metalici de pe suprafata plachetelor inainte de inceperea proceselor de fabricare:

- Imersare in acetona la temperatura camerei timp de 10 minute;
- Clatire cu alcool izopropilic (IPA) timp de 10 minute;
- Imersare in solutie Piranha ($H_2SO_4 + H_2O_2$, 10 : 1) la 120 °C timp de 30 minute;
- Clatire cu apa deionizata.

Oxidarea termica a plachetelor a fost facuta in cuptorul de oxidare Thermco 2000 series (Tetron Technologies, UK). Oxidul termic de siliciu a fost crescut in atmosfera umeda la temperatura de 1100 °C, grosimea finala a acestuia fiind de ~300 nm.

Depunerea filmului subtire de NCG a fost facuta în echipamentul pentru depunere din faza de vapori asistata de plasma (PECVD) Nanofab 1000 (Oxford Instruments, UK), in atmosfera de metan si hidrogen ($CH_4 + H_2$, raport masic 1:1,25) la temperatura de 900 °C, presiune de 1,5 Torr si putere RF 100 W, rata de depunere aproximativa fiind de 3 nm/min. Grosimea filmului de NCG depus a fost de aproximativ 110 nm.

Depunerea metalelor a fost facuta in echipamentul Auto 500 (BOC Edwards,UK) prin evapoare cu fascicol de electroni. Grosimea filmului de Cr/Au (depus atat pe fata plachetei pentru fabricarea antenelor cat si pe spate pentru fabricarea reflectoarelor) a fost de 500 nm (10 nm Cr and 490 nm Au).

Fotolitografia a fost făcută folosind echipamentul de aliniere fata-spate MA6 (MicroSuss, Germany). Ca strat de mascare, a fost folosit fotorezistul pozitiv AZ1514, configurat folosind procedura:

- Tratament termic pentru deshidratarea plachetelor la temperatura de 120 °C timp de 10 minute;
- Centrifugarea fotorezistului la 3000 rpm timp de 40 secunde;
- Tratament termic pentru evapoarea solventului la temperatura de 90 °C timp de 45 secunde;

- Expunere la UV (lungime de undă 405 nm) timp de 4 secunde;
- Developare în soluție pe bază de NaOH timp de 50 seconds;
- Tratament termic pentru întărirea fotorezistului la temperatura de 95 °C timp de 2 minute.

Corodarea filmului subțire de NCG s-a făcut în echipamentul de corodare cu ioni reactivi SI220 (Sentech Instruments, Germany) în plasmă de oxigen la puterea de 250 W și presiunea de 150 mTorr.

Rezultate și discuții

Corodarea NCG

Filmul subțire de NCG a fost corodat folosind rețeta descrisă anterior, rata de corodare fiind de aproximativ 50 nm / min, timpul total de corodare fiind de aproximativ 2 minute. Îndepărtarea completă a NCG din zonele expuse plasmei de oxigen a fost determinată prin măsurătorile electrice în 4 puncte.

Configurarea metalului

Filmul metalic de Cr/Au (10/490 nm) depus pe fața plăchetei a fost configurat folosind un proces de lift-off. Inițial, fotorezistul AZ1514 a fost centrifugat și configurat folosind masca 2, urmat de o depunere metalică de Cr/Au. Fotorezistul a fost apoi îndepărtat folosind acetona într-o baie de ultra-sunete. Pentru a proteja traseele metalice deja configurate în timpul proceselor tehnologice efectuate pe spate, după curățarea plăchetei în acetona și IPA, fotorezist AZ1514 a fost centrifugat din nou pe fața plăchetei. Un film metalic de Cr/Au (10/490 nm) a fost depus pe spatele plăchetei, după care fotorezist AZ1514 a fost centrifugat și configurat folosind masca 3. Filmul metalic a fost corodat în soluție specifică, după care plăcheta a fost curățată în acetonă și IPA.

4. Masuratori antena NCG

Echipamente:

Agilent PNA N5227A
Rodhe Schwarz FSV40-N
Agilent E8257D

Caracterizarea unei singure antene s-a facut conform montajului de mai jos (Fig.8)

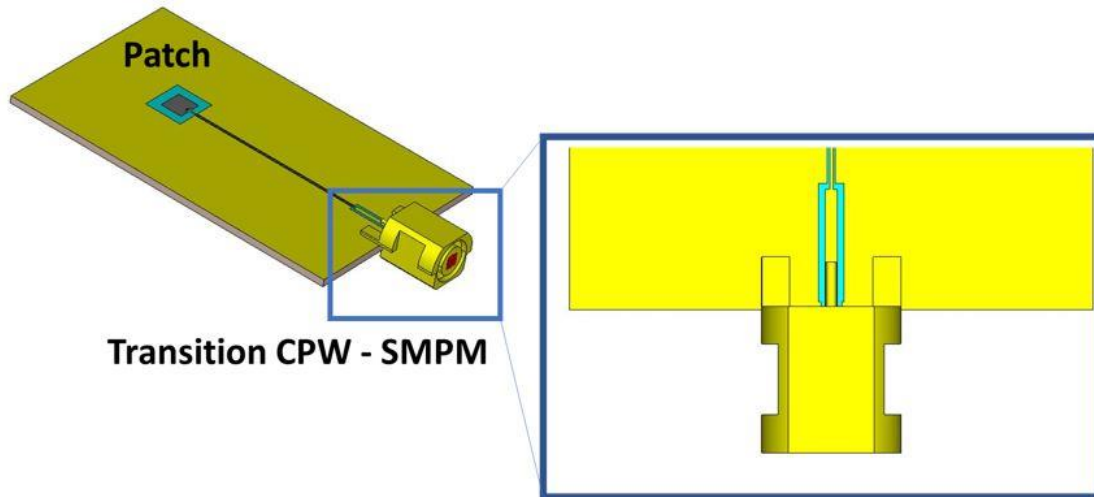


Fig.8 Montarea antenei pe suport de Plexiglas si conectarea ei cu conectorul SMPM.

In Fig. 9 se arata masuratorile parametrului atati simulati cat si masurati. Se constata ca rezultatele simulate corespond cu cele masurate si avem o rezonanta puternica in banda 24 GHz.

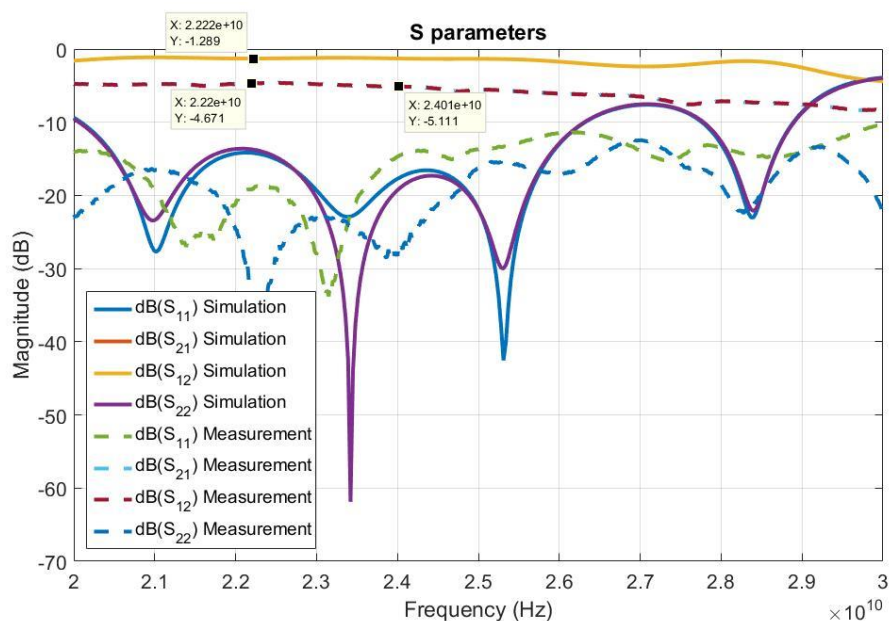


Fig. 9 Parametrii S simulate si masurati.

Pentru a masura diagrama de radiatie s-a folosit configuratia din Fig.10

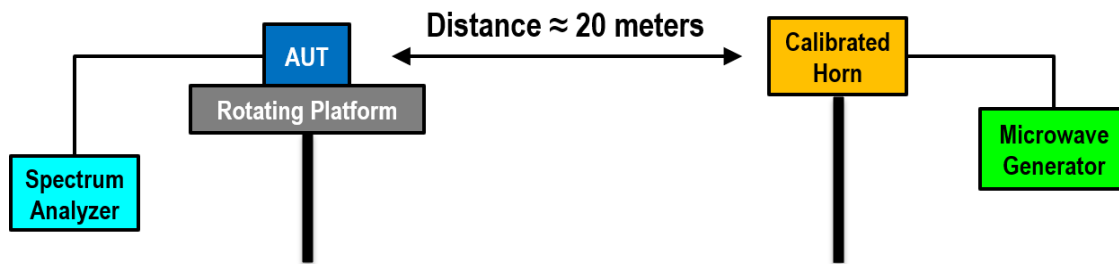


Fig.10 Sistem de masura a diagramei de radiatie.

Diagrama de radiatie in planul E si H sunt prezentate in Fig. 11 in planul E si H.

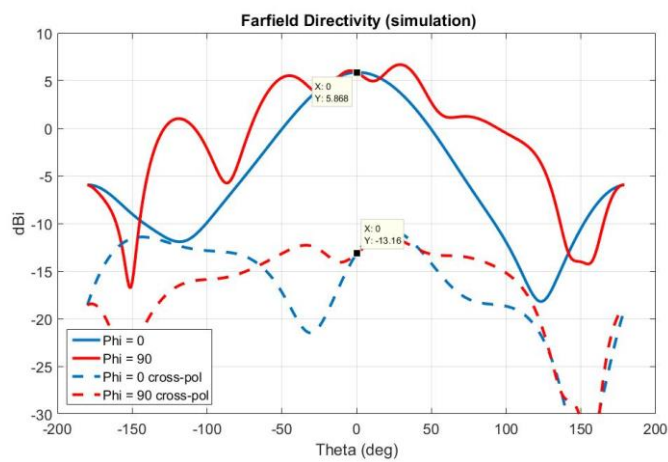


Fig. 11 Diagrama de radiatie in planul E si H a antenei NCG.

Diagrama de radiatie poate fi comparata cu simularea din Fig.12 :

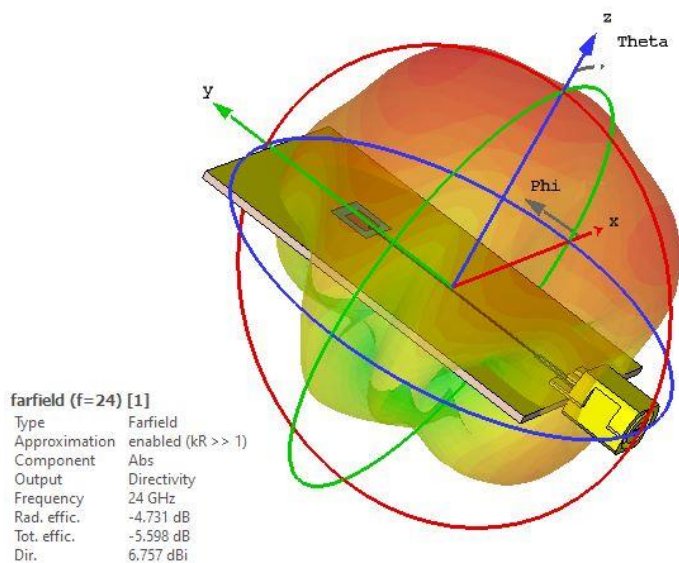


Fig.12 Simularea 3D a caracteristicii de radiatie a antenei NCG.

Aria de 8 antene NCG este prezentata in Fig.13

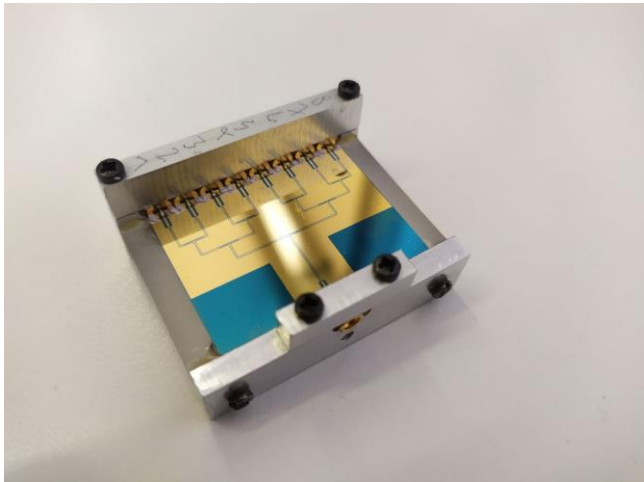


Fig.13 Aria de antene NCG

Masurarea castigului s-a facut in aceleasi conditii ca mai sus si este prezentata in Fig.14. si corespunde cu simularile initiale.

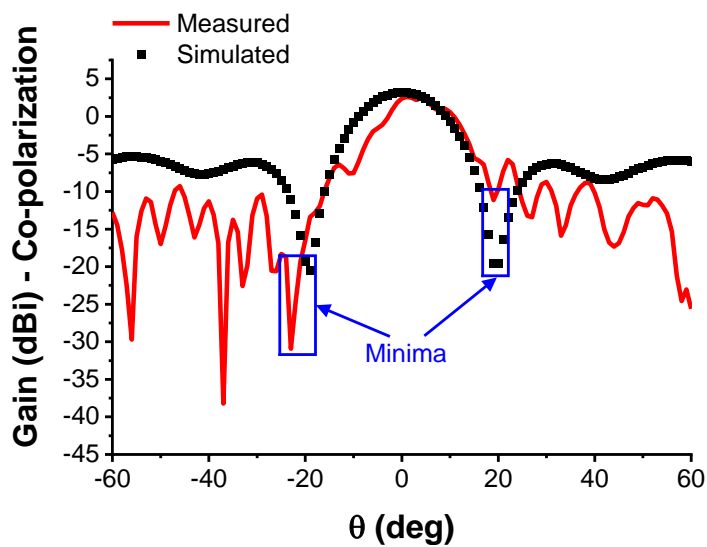


Fig.14 Castigul ariei de antene cu 8 antene NCG

4. Concluzii Proiectul prezinta simularea unei antene si a unei arii de antene bazata pe nano crystalline graphene (NCG). Se prezinta rezultatul simularilor, metodele de fabricatie ale NCG si a antenelor, precum si masuratori privind caracteristicile de radiatie. Rezultatele au fost publicate in [12].

Referinte

- [1] M. Dragoman, D. Neculoiu, A.-C. Bunea, G. Deligeorgis, M. Aldrigo, D. Vasilache *et al.*, “A tunable microwave slot antenna based on graphene,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 106, Art. no. 153101, 2015.
- [2] M. Dragoman, A. Cismaru, M. Aldrigo, A. Radoi, A. Dinescu, and D. Dragoman, “MoS₂ thin films as electrically tunable materials for microwave applications,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 107, Art. no. 243109, 2015.
- [3] M. Dragoman, M. Aldrigo, J. Connolly, I. M. Povey, S. Iordanescu, A. Dinescu *et al.*, “MoS₂ radio: detecting radio waves with a two-dimensional transition metal dichalcogenide semiconductor,” *Nanotechnology*, Vol. 31, No. 6, Art. no. 06LT01, 2020.
- [4] A. Ahmed, I. A. Goldthorpe, and A. K. Khandani, “Electrically tunable materials for microwave applications,” *Appl. Phys. Rev.*, Vol. 2, Art. no. 0111302, 2015.
- [5] T. Wang, W. Jiang, Y. Peng, and G. Wang. 2017. Integration of Ferromagnetic and Ferroelectric Films for Fully Electrically Tunable RF Devices. Presented at 2017 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS). [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/RWS.2017.7885929>.
- [6] S. Pawar, J. Singh, and D. Kaur, “Magnetic Field Tunable Ferromagnetic Shape Memory Alloy-Based Piezo-Resonator,” *IEEE Electron Device Lett.*, Vol. 41, No. 2, pp. 280–283, Feb. 2020.
- [7] C. Fan, B. Wu, R. Song, Y. Zhao, Y. Zhang, and D. He, “Electromagnetic shielding and multi-beam radiation with high conductivity multilayer graphene film,” *Carbon*, Vol. 155, pp. 506–513, Dec. 2019.
- [8] X. Huang, T. Leng, M. Zhu, X. Zhang, J.C. Chen, K.H. Chang *et al.*, “Highly flexible and conductive printed graphene for wireless wearable communications applications,” *Sci. Rep.*, Vol. 5, Art. no. 18298, 2016.
- [9] S. N. H. Sa’don, M. H. Jamaluddin, M. R. Kamarudin, F. Ahmad, Y. Yamada, K. Kamardin *et al.*, “Analysis of graphene antenna properties for 5G applications,” *Sensors*, Vol. 19, No. 22, Art. no. 4835, 2019.
- [10] A. Sarycheva, A. Polemi, Y. Liu, K. Dandekar, B. Anasori, and Y. Gogotsi, “2D titanium carbide (MXene) for wireless communication,” *Sci. Adv.*, Vol. 4, No. 9, Art. no. eaau0920, Sep. 2018.

[11] M. E. Schmidt, C. Xu, M. Cooke, H. Mizuta, and H. M. H. Chong, “Metal-free plasma-enhanced chemical vapor deposition of large area nanocrystalline graphene,” *Mater. Res. Express*, Vol. 1, No. 2, Art. no. 025031, 2014.

[12] M. Aldrigo, M. Dragoman, S. Iordanescu, A. Avram, O.-G. Simionescu, C. Parvulescu, H. El Ghannudi, S. Montori, L. Nicchi, S. Xavier, and A. Ziaei, Tunable 24-GHz antenna arrays based on nanocrystalline graphite, *IEEE Access* 9, pp. 122443 – 122456 (2021)

Director Proiect,
Dragoman Mircea

A handwritten signature in black ink, appearing to be the name 'Mircea' or similar, written in a cursive style.