

MODELLING AND SIMULATION OF ELECTRON AND ION BEAM MACHINING

BÎȚOI Ion-Vlăduț-Valentin, COCOȘATU Bogdan, IUGA Ana-Cristina
 Facultatea: IIR Specializarea: TCM, Anul de studii: 2020-2021, e-mail: vladvalentin04@gmail.com

Conducător științific: Prof. Dr. Ing. **Daniel GHICULESCU**

ABSTRACT: This paper deals with the modeling and simulation of electron and ion beam machining. A dedicated software was used for finite element modelling and simulating device working. In this application the coil was modeled to simulate the variation of the magnetic flux and how it affects the trajectory of the beam by changing the number of coils and the intensity. Also, an ion implantation system was modelled and simulated where the effects on the surface of the product were analyzed. The obtained results showed that for low intensities it is recommended to be used for drilling operations, and for high intensities it is recommended for heat treatments, and the ions are less affected by the magnetic field of the coil as opposed to electrons.

CUVINTE CHEIE: electron, ion, machining, magnetic flux, modelling.

1. Introducere

Rezolvarea unor probleme tehnologice din industria constructoare de mașini nu se mai poate face fără utilizarea unor tehnologii neconvenționale avansate, printre care prelucrarea cu fascicule laser, de electroni, de ioni și microunde ocupă un loc tot mai important [1]. Prelucrarea cu fascicul de electroni și ioni au în comun emisia electronilor de către catod care ionizează molecule de gaz. Aceste tehnologii permit realizarea unei game foarte diverse de prelucrări cum sunt: litografie, găurire, sudură, tăiere și tratamente termice.

2. Stadiul actual

Prelucrările cu fascicule dirijate se dovedesc deosebit de eficiente în ramurile de vârf ale tehnicii: mecanica fină, microelectronica, construcția navelor cosmice, tehnica nucleară etc [1].

Prelucrarea cu fascicul de electroni (Electron Beam machining - EBM) este un proces de prelucrare termică în care electronii de mare viteză concentrați într-un fascicul îngust sunt folosiți pentru încălzirea, topirea sau vaporizarea instantanee a materialului. Fasciculul este ușor focalizat și deviat de lentilele de focalizare electromagnetice și lentilele de deviere (fig. 1).



Fig. 1 Matrici de acoperire la durificarea superficială cu fascicul electronic [1]

Densitatea de putere este, de asemenea, ușor de controlat prin modificarea tensiunii de accelerație. Prin urmare, fasciculul de electroni permite diferite tipuri de prelucrare termică. Din acest motiv, poate fi aplicată găurirea precisă și sudură de înaltă precizie cu o zonă de fuziune profundă în domeniul industrial [2].

Elementul primar, care stă la baza fenomenelor fizice ce au loc la EBM (electron beam machining), este particula elementară cu sarcină negativă, electronul, caracterizat prin: sarcina $e^- = 1,602 \cdot 10^{-19} C$; masa $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} kg$; sarcina specifică $e^-/m_e = 1,759 \cdot 10^{11} C/kg$.

Electronii liberi se pot obține prin încălzirea suprafeței unui metal cu o anumită cantitate de energie, care se transferă electronilor, iar aceștia părăsesc suprafața metalului, având loc așa numita emisiune termoelectronică. Densitatea medie de curent realizată - ce depinde de caracteristicile termofizice ale emitorului respectiv (catod), temperatura de încălzire, proprietățile suprafeței catodului și se poate determina cu ajutorul relației lui Richardson -Dashman:

$$q_e = ATe^{e\psi_0/kT} \quad (1)$$

unde: A este constanta de emisie; T - temperatura absolută a emitorului permit creșterea productivității [K]; $e\psi_0$ - energia specifică a emitorului [J]; k - constanta lui Boltzmann [3].

Schema unui echipament de prelucrare cu fascicul de electroni se prezintă în fig. 2. Se compune dintr-un tun cu fascicul de electroni, o bobină electromagnetică, o bobină de deviere, o masă XY și un sistem de vid [2].

Cea mai mică dimensiune a fasciculului este de ~ 13,5 nm datorită limitei de lungime de undă cauzată de oscilația fotonului.

Similar cu prelucrarea cu fascicul de electroni, prelucrarea cu fascicul de ioni (Ion Beam Machining – IBM) are la bază emisia electronilor de către catod care, ulterior, ionizează molecule de gaz de tip argon, xenon, neon etc., ionii astfel obținuți fiind puternic accelerați de către un câmp electric. Ionizarea moleculelor de gaz se mai poate obține și prin descărcare în gaz [5].

Principiile de bază pentru aplicațiile IBM se bazează pe interacțiunea particulelor încărcate cu câmpuri electromagnetice prin forța Lorentz și principiile de detectare ale acestor particule [6].

Efectul fizic al bombardamentului ionic se determină prin randamentul de pulverizare, exprimat ca raportul dintre numărul de atomi ejectați din piesă și numărul de ioni incidenți și care se determină cu ajutorul relației [3]:

$$\eta_e = 26,6 (\Delta m/A)/It \quad (2)$$

unde: Δm este pierderea de masă din piesa supusă bombardamentului ionic [μg]; A - masa atomică a atomilor materialului piesei prelucrate [μg]; I - intensitatea curentului ionic [μA]; t - timpul cât piesa este supusă bombardamentului ionic [ore].

În general, echipamentul de prelucrare a fasciculului de ioni constă din surse de ioni, accelerator prin care ionii au accelerat electrostatic până la energia dorită, camera de vid și ținta de prelucrat, figura 3 [2]. Instalațiile au în componență următoarele elemente: un tub de sticlă termorezistentă, în care este înglobată camera de ionizare, anodul și catodul, cuplați la tensiunea de accelerare, și care, constructiv, formează camera de accelerare.

Fasciculul ionic trece prin camera de bombardare, unde s-a creat vid de $10^{-4} \dots 10^{-5}$ Pa și acționează asupra piesei de prelucrat [1]. Procedul este eficient la prelucrarea materialelor dure și extradure; se pot realiza microsuduri sau suduri pe piese agabaritice, frezarea unor canale cu dimensiuni de 5 - 20 μm , prelevarea straturilor subțiri (<10 μm), găuriri de ordinul a 4...6 μm [3].

3. Etape ale modelării și simulării fasciculelor de electroni și ioni

Cu ajutorul programului Comsol Multiphysics 4.2 dedicat pentru analiza cu element finit, s-a realizat acest studiu prin accesarea succesivă: 2D Axisymmetric⇒Magnetic fields⇒Stationary.

Etapele de modelare în Comsol Multiphysics sunt prezentate în continuare:

Etapa 1. În parametrizarea modelului sunt evidențiate dimensiunile (fig. 4).

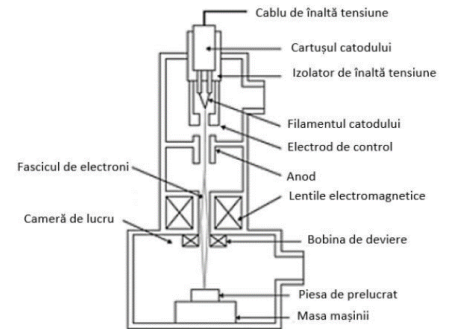


Fig. 2 Echipament de prelucrare cu fascicul de electroni [2].

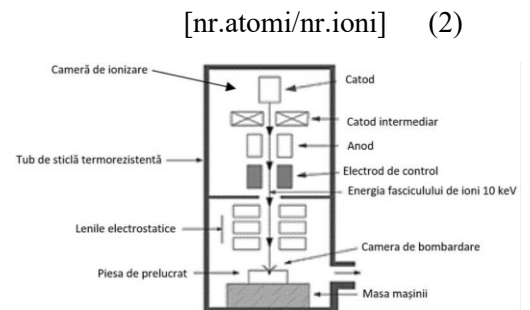


Fig. 3 Schema de principiu a instalației de prelucrare cu fascicul de ioni [7]

Etapa 2. Geometrizarea este reprezentată în figura 5.

Name	Expression	Value	Description
Nc	1000	1000	Numar de spire
rbe	10	10	raza exterioara bobina
hb	2.5	2.5	inaltime bobina
rbi	6	6	raza interioara bobina
rcol	20	20	raza colimator
hcol	50	50	inaltime coloana
scol	35	35	distanța de tinta în coloana
hc	2.5	2.5	inaltime catod
rc	2.5	2.5	raza catod
dic	7.5	7.5	distanța catod_bobina
E0	500[V]	8.011E-17 J	energia initiala
V0	(2*E0/me_const)*0.5	1.326E7 m/s	viteza initiala a electronilor
tpar	0.001*hcol/V0	2.639E-9 s/m	timpul de parcurgere a distantei tinta

Fig. 4 Parametrii adăugați în *Global definitions*

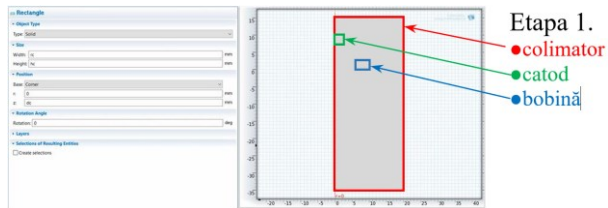


Fig. 5 Geometrizare

Etapa 3. Alocarea materialului: Colimatorului și catodului se vor atribui materialul aer, iar bobinei cuprul (conform fig. 6).

Etapa 4. Se introduc condițiile la limită din *Multi-turn coil domain* și se vor adăuga la proprietăți, numărul de spire (Nc) și intensitatea (Ic) indicate anterior la parametri (fig. 7).

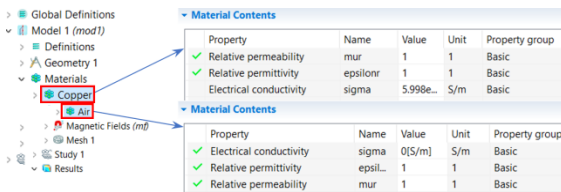


Fig. 6 Alocarea materialelor și proprietățile acestora.

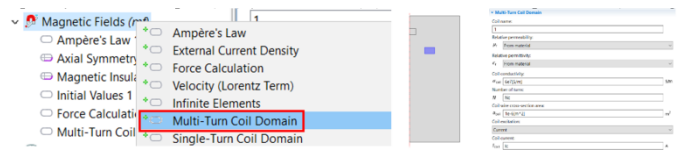


Fig. 7 Multi-turn coil domain

Etapa 5. Discretizarea se realizează cu elemente triunghiulare, precise (alegând Extra fine) și este prezentată împreună cu calitatea corespunzătoare obținută - prin accesarea funcției *Statistics* din meniul *Mesh* – figura 8. Elementele sunt mai fine pentru a crește precizia.

Etapa 6. Rularea modelului și vizualizarea variației parametrilor de interes au fost realizate în regim staționar pentru o singură bobină (fig. 9).

Traectoria electronilor în timp ce trec prin câmpul magnetic generat de bobină este reprezentată în fig. 16. Electronii se focalizează într-un punct pe axa longitudinală z. Distanța focală este dată de relația [8]:

$$f = K \frac{V}{i^2}$$

unde K = constantă bazată pe geometria bobinei și numărul de rotații; V = tensiunea de accelerare; i = curentul bobinei.

Etapa 7. Pentru a studia variația fluxului magnetic, s-a mai adăugat o bobină (sistem Helmholtz - [9]), conform figurii 10.

Etapa 8. Pentru această etapă, s-au parcurs pașii ca la prima bobină, iar pentru a evidenția fluxul magnetic s-a folosit Study ⇒ Stationary ⇒ Compute (conform fig. 11).

Etapa 9. Se realizează aceiași pași din studiul 1 dar cu ajutorul Comsol Multiphysics 5.5, în următoarea ordine: 3D⇒*Magnetic fields* ⇒ *Stationary* (studiul 1) pentru a putea continua cu *Charged Particle Tracing* ⇒ *Time dependent*, iar la parametri, se adaugă aceia din fig. 11.

Etapa 10. Se adaugă forța magnetică exercitată de câmpul magnetic asupra electronului, folosindu-se modulul *Magnetic flux density* (fig. 12) din studiul anterior (fig. 13).

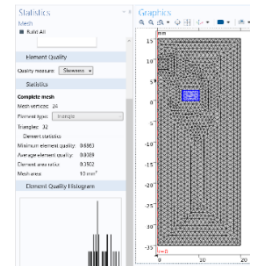


Fig. 8 Selectarea Mesh-ului

$$[\text{mm}] \quad (3)$$

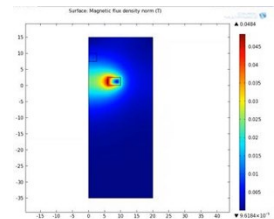


Fig 9. Rularea modulului de calcul



Fig. 10 Rularea modulului de calcul

tp	5e-9	5E-9	timp de studiu
Jsz	60000	60000	densitate de curent pe suprafata
Np	1000	1000	Nr.Particule lansate

Fig. 11 Parametrii adăugați

Etapa 11. În cazul de față se definește zona de intrare a particulelor împreună cu setările aferente studiului. Au fost specificate: suprafața 14, repartizarea uniformă a particulelor, numărul de particule lansate de pe suprafața 14 și viteza inițială a electronilor (fig. 14).

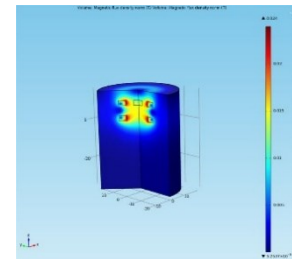


Fig. 12 Fluxul magnetic pentru două bobine

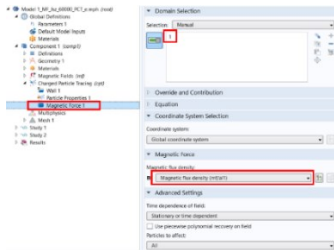


Fig. 13 Forța magnetică

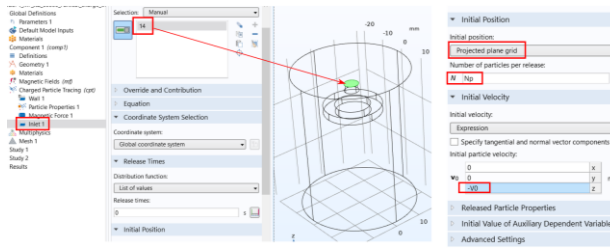


Fig. 14 Zona de intrare a particulelor și setările de intrare fascicul

Etapa 12. Se stabilește perioada de timp a studiului și se specifică faptul că se preiau valorile din studiul 1 (fig. 15).

Etapa 13. În figura 16 emisia specifică este reprezentată de-a lungul traiectoriei medii a fascicului ca expresie a culorii și ca expresie a razei tubului. Traiectoria nominală atinge grosimea maximă la scurt timp după intrarea în obiectiv și este îngustată în locul în care este focalizat fasciculul.

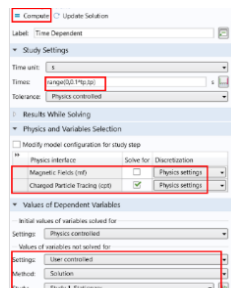


Fig. 15 Inițializarea simulării

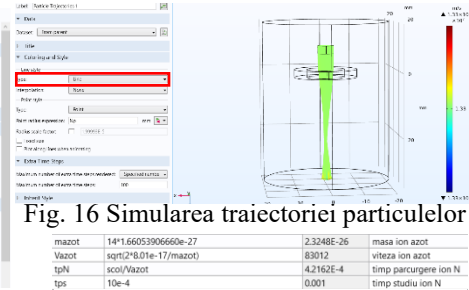


Fig. 16 Simularea traiectoriei particulelor

Etapa 14. Se realizează aceiași pași din studiul 2, cu ajutorul programului Comsol Multiphysics 5.5 cu mențiunea că se adaugă acei parametri din fig. 17 și se modifică masa, viteza particulelor și numărul de sarcini, conform caracteristicilor (fig. 18).

Fig. 17 Parametrii

mazot	14*1.66053906660e-27	2.3248E-26	masa ion azot
Vazot	sqrt(2)*8.01e-17/mazot	83012	viteza ion azot
tpN	scol/Vazot	4.2162E-4	timp parcurgere ion N
tps	10e-4	0.001	timp studiu ion N

Fig. 18 Proprietățile particulelor

Particle mass: m_p mazot kg

Charge Number: $Z = -3$ ionul N

4. Modelarea și simularea implantării ionice

În această etapă, se are în vedere modelarea și simularea unui sistem de implantare ionică. Parametrii folosiți pentru simularea acestui program sunt unghiul fascicului θ și energia (fig. 19). Se utilizează interfața Fluid flow \Rightarrow free molecular flow. Crearea geometriei sistemului de vacuum s-a realizat cu Autodesk Inventor Professional 2021.

Pentru a putea crea waferul a fost nevoie de introducerea unui plan (fig. 20), iar modelarea acestuia este reprezentată în figura 21. Plăcuța este din siliciu, iar de pe aceasta se eliberează CO_2 prin intermediul suprafeței din fig. 22.

Fig. 19 Parametrii modelului

Name	Expression	Value	Description
theta	35	35	Wafer angle
pumpspeedcryo	12000[l/s]	12 m ³ /s	Pump speed for cryo
pumpspeedturbo	1500[l/s]	1.5 m ³ /s	Pump speed for turbo

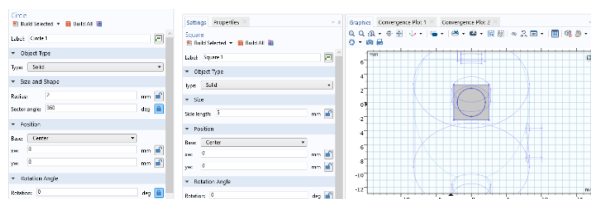


Fig. 21 Modelarea plăcuței de tip wafer

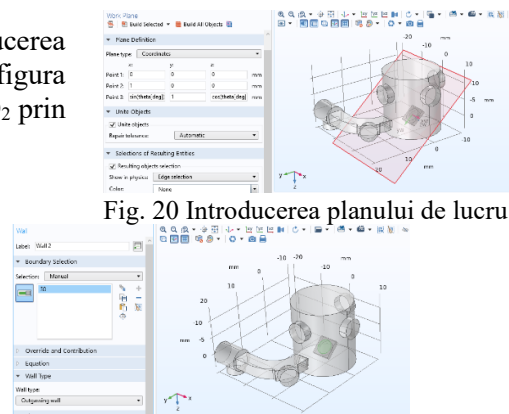


Fig. 20 Introducerea planului de lucru

Fig. 22 Suprafața prelucrată

5. Rezultate

Se dorește variația fluxului magnetic modificând intensitatea ($I_c \pm 0,2A$) și numărul de spire ($N_c \pm 100$ spire) conform cărora s-au definit variațiile fluxului magnetic (fig. 23).

Se dorește variația deviației traiectoriei electronilor și ionilor, în graficele Poincaré în fig. 25, pentru electroni și în fig. 26, pentru ioni, modificând densitatea de curent pe suprafață (J_{sz}), folosind planurile de secțiune din fig. 24.

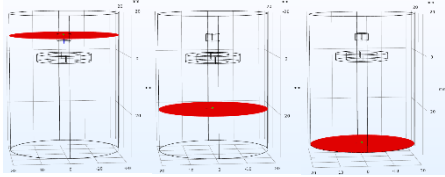


Fig. 24 Plane de secțiune $Z = \{7; -20; -35\}$ mm pentru grafice Poincaré, nostru resp. albastru

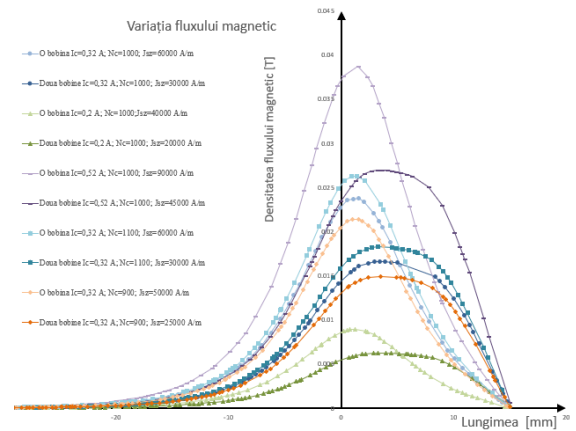


Fig. 23 Graficul variațiilor fluxului magnetic

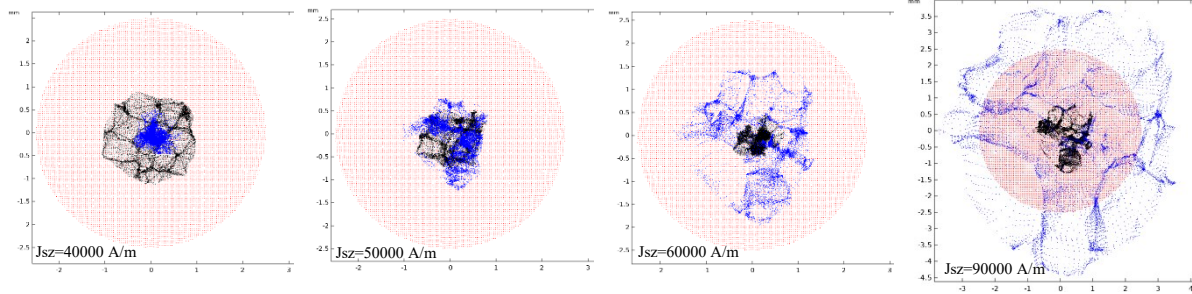


Fig. 25 Grafice Poincaré pentru dispunerea fasciculusului de electroni

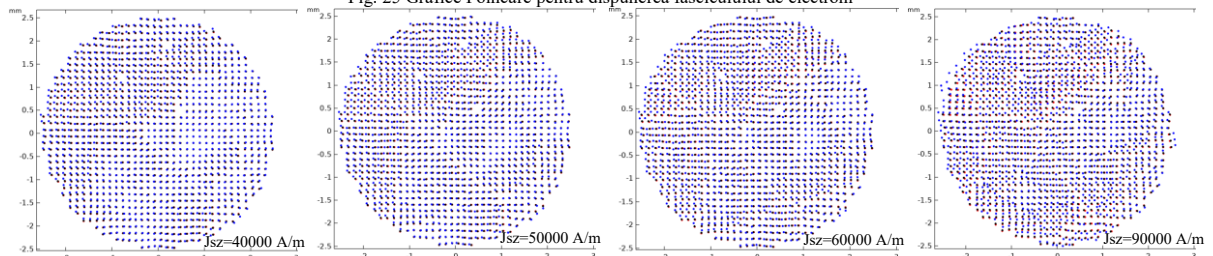
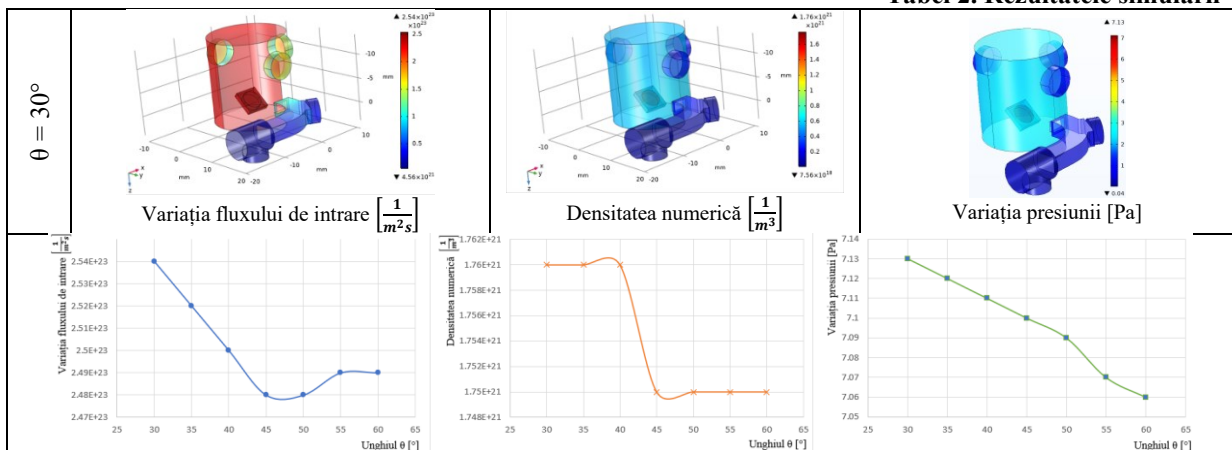


Fig. 26 Grafice Poincaré pentru dispunerea fasciculusului de ioni

Pentru a putea studia variația fluxului de intrare, densitatea numerică respectiv variația presiunii s-a modificat incremental unghiul θ cu 5° , rezultând valorile din tabelul 2.

Tabel 2. Rezultatele simulării



6. Concluzii:

Rezultatele modelării și simulării cu metoda elementelor finite au condus la următoarele concluzii: (1) Fluxul magnetic de dirijare a fasciculului de electroni și de ioni variază direct proporțional cu intensitatea curentului în bobină și numărul de spire al bobinei, având o variație mai mare atunci când variază numărul de spire, comparativ cu variația curentului; (2) La utilizarea bobinelor Helmholtz se obține o uniformizare mai mare a fluxului magnetic față de folosirea unei singure bobine, variația intensității sau numărul de spire, influențând mai puțin fluxul magnetic; (3) La analiza variației deviației traiectoriei electronilor și ionilor, cu cât crește densitatea de curent cu atât se dispersează mai mult fasciculul pe suprafața țintă; (4) bobina Helmholtz dispersează uniform fasciculul pe suprafața de capăt, acest fenomen fiind mai avantajos pentru o operație de tratament termic; (5) Distribuția ionilor este mai puțin afectată de caracteristicile bobinei pentru că ionii de azot au o masă mult mai mare decât a electronilor, de aceea pentru a putea controla traiectoria ionilor este necesară creșterea intensității curentului în bobină; (6) La analiza procesului de implantare ionică, s-a obținut o valoare maximă a fluxului de intrare a ionilor pe suprafața semifabricatului (wafer) la valori mai reduse ale unghiului de înclinare a wafer-ului; (7) Rezultatele obținute la modelarea computerizată sunt în acord cu datele din lucrările de referință din stadiul actual.

7. Bibliografie

- [1]. Marinescu, N.I., et al. (2018), Vol. 2, “Tehnologii cu fascicule de electroni, ioni și microunde”, Pag.211-217, ISBN 978-606-23-0760-8; Editura Printech, București
- [2]. Sami Chatti, Luc Laperrière, Gunther Reinhart, Tullio Tolio, (2019), “Encyclopedia of Production Engineering” Pag.582-583, ISBN 978-3-662-53121-1; Editura Springer.
- [3]. Ghiculescu, D., Curs “Tehnologii de fabricare cu fascicule și oscilații”, disponibil la: <https://curs.upb.ro/>, accesat la: 22.03.2021
- [4]. Kim, J., Lee, W.J. & Park, H.W. (2016), “The state of the art in the electron beam manufacturing processes.” Vol. 17, No. 11, Pag. 1575-1585, ISSN 2234-7593; KSPE and Springer.
- [5]. Seong-Hyun Kim, Sung-Taek Jung, Hyun-Jeong Kim, Seung-Yub Baek, Jin-Seok Kim, Eun-Goo Kang (2019), “A study on the preparation method of vaporized amplification sheets and electron beam machining characteristics.” Pag.234-240, ISSN 1526-6125; Elsevier.
- [6]. Rotaru, I.A., (2020) “Teză de doctorat Dezvoltarea de tehnici pentru analiza fasciculelor de ioni și manipularea ionilor”, Universitatea Politehnica din București, Facultatea de Științe Aplicate, București.
- [7]. Bijoy, B. (2016), “Electrochemical Micromachining for Nanofabrication, MEMS and Nanotechnology”, Pag. 14, ISBN 978-0-323-32737-4; Elsevier.
- [8]. ***, “Magnetic Lens”, disponibil la: <https://www.comsol.com/model/magnetic-lens-10185>, accesat la: 19.04.2021.
- [9]. Yang, K.C. (2016), “High frequency Helmholtz coils generate magnetic fields”, EDN, disponibil la: <https://www.edn.com/high-frequency-helmholtz-coils-generate-magnetic-fields/>, accesat la 28.04.2021