



Modelowanie procesów multiimplantacji jonów azotu do narzędzi WC-Co wykorzystywanych w obróbce materiałów drzewnych

The modelling of the multi-implantation processes of nitrogen ions to WC-Co tools used in wood materials machining

Marek Barlak^{a,*}, ORCID: 0000-0003-1416-7461
Jacek Wilkowski^b, ORCID: 0000-0001-5798-6761
Zbigniew Werner^a, ORCID: 0000-0003-1172-0268

^aNarodowe Centrum Badań Jądrowych Świerk w Otwocku, Departament Fizyki Materiałów, Zakład Technologii Plazmowych i Jonowych, ul. Andrzeja Sołtana 7, 05-400 Otwock, Polska

^bSzkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Instytut Nauk Drzewnych i Meblarstwa, Katedra Mechanicznej Obróbki Drewna, ul. Nowoursynowska 159, 02-787 Warszawa, Polska

*Osoba do korespondencji: marek.barlak@ncbj.gov.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki modelowania procesów multiimplantacji jonów azotu do wymiennych noży WC-Co, stosowanych w obróbce materiałów drzewnych. Modelowanie przeprowadzono zarówno dla nieseparowanej wiązki jonów $N^+ + N_2^+$, jak i dla wiązek separowanych N^+ i N_2^+ . Przedstawione zostały także wyniki modelowania dla średniej krotności jonizacji oraz dla przypadku rozszerzonej implantacji. Najdłuższy obszar plateau oraz najkorzystniejszy stosunek plateau do całości głębokościowego profilu uzyskano w przypadku jonów N^+ .

Abstract

The paper presents the results of the modelling of multi-energy ion implantation processes of nitrogen to WC-Co indexable knives for wood-based materials machining. The modelling was performed for implantation of $N^+ + N_2^+$ ions, for implanters without and with mass separation. Additionally, modelling for average charge state and for the extended implantation case was executed. The best results, i.e. flat and long plateau region and the most favourable plateau/multi ratio were obtained for N^+ ions.

Słowa kluczowe: węgiel spiekany WC-Co, multiimplantacja jonów azotu, modelowanie, SRIM

Keywords: WC-Co cemented carbide, nitrogen ion multi-implantation, modelling, SRIM code

Wprowadzenie

Kompozyty WC-Co stanowią połączenie twardych i kruchych węglików WC oraz stosunkowo miękkiego i ciągliwego metalicznego spoiwa Co. W rezultacie daje to połączenie kilku korzystnych właściwości materiałowych, takich jak wytrzymałość, twardość, sztywność, odporność na kruche pękanie, czy odporność na zużycie w temperaturze do 400°C (Milman i in. 1997, Sheikh-Ahmad i Bailey 1999, Pirso i in. 2004, Bonny i in. 2004, Choi i in. 2010, Olovsjö i in. 2013). Niestety, trwałość narzędzi wykonanych z tego materiału jest wciąż niewystarczająca. Istnieje kilka metod ulepszenia tej właściwości. Implantacja jonów jest stosunkowo prostym, tanim i szybkim sposobem poprawy właściwości tribologicznych części maszyn lub narzędzi skrawających (Barlak i in. 2016, Barlak i in. 2017). Zmodyfikowany obszar nie jest nałożoną warstwą, dlatego nie występuje problem adhezji. Nie pojawia się też problem zmiany wymiarów modyfikowanego elementu, a w związku z tym implantację jonów można zastosować również do modyfikacji narzędzi gotowych do użycia (Straede 1996; Mikkelsen i in. 2002; Rodríguez i in. 2002). Jednakże, szerokość zmodyfikowanego regionu jest niewielka. Przykładowo, wartości zasięgu rzutowanego i rozrzutu zasięgu w przypadku implantacji jonów N⁺ o energii 70 keV wynoszą około 60 nm. Zasięg można zwiększyć przykładowo poprzez implantację jonów o mniejszym promieniu atomowym i/lub przez wprowadzenie do układu dodatkowej energii, np. poprzez podgrzewanie implantowanego materiału i w ten sposób zintensyfikowanie zjawiska dyfuzji (Fayeulle i in. 1986).

Multiimplantacja jonów jest stosowana w badaniach od kilkudziesięciu lat, głównie do kształtowania struktur elektronicznych lub optycznych, takich jak struktura „low-high-low”, „box profile” lub „horse head” oraz kształtowania obszarów plateau wprowadzanych pierwiastków, a przez to zwiększanie ich zasięgu (Dening i Weiyuan 1987, Magruder i in. 2001, Magruder i in. 2002, Naumova i in. 2003, Phelps GJ 2004, Magruder i in. 2004, Posselt i in. 2005, Fu i in. 2007, Tsuji i in. 2007, Piekoszewski i in. 2009, Wang i in. 2009, Werner i in. al. 2009, Zhao i in. 2010, Magruder i in. 2011, Zhang i in. 2013, Lazar i in. 2015, Becerra i in. 2017, Liu i in. 2018, Teranishi i in. 2018, Chen i Lin 2019 , Wang i in. 2019, Zhao i in. 2019).

Multiimplantacja jest sumą kilku typowych procesów implantacji jonów, których wartość energii zmniejsza się w kolejnych etapach (David i in. 2002, Lazar i in. 2015). Zmniejszająca się wartość energetyczna jest bardzo ważna z punktu widzenia uszkodzeń mikrostruktury modyfikowanego materiału i zmian chemicznych w implantowanym obszarze.

Dening i Weiyuan (Dening i Weiyuan 1987) zaproponowali metodę „equivalent area”, służącą prognozowaniu efektów multiimplantacji, opartą na rachunku całkowym. Innym

podjęciem jest podejście empiryczne. W niniejszej publikacji przedstawiono propozycję takiego podejścia do modelowania/wyznaczania możliwie długich obszarów plateau implantowanego azotu w podłożu W-C-Co, zarówno dla wiązek bez separacji masowej, jak i wiązek z separacją (Barlak i in. 2019). Teoretyczne rozwiązanie tego problemu może pomóc w projektowaniu rzeczywistych procesów multiimplantacji np. jonów azotu do narzędzi WC-Co, stosowanych do obróbki materiałów drzewnych.

Materiały i metodyka badań

Modelowanie głębokościowych profili multiimplantacji obejmowało 2 etapy:

1. modelowanie kształtu klasycznych głębokościowych profili azotu w podłożu W-C-Co,
2. wyeksportowanie uzyskanych wyników do arkusza kalkulacyjnego w celu dalszej obróbki.

Modelowanie kształtu głębokościowych profili implantowanego azotu prowadzono przy użyciu programu na licencji *freeware*, o nazwie SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter), opartego o symulacyjną metodę Monte Carlo, opisanego szerzej w (SRIM 2020, Barlak 2019).

Materiał modyfikowanego podłoża został zdefiniowany jako mieszanina pierwiastków W-C-Co o składzie: 90,86% wolframu, 5,94% węgla i 3,2% kobaltu wagowo, tj. 47,4% wolframu, 47,4% węgla i 5,2% kobaltu atomowo i o gęstości 15,2 g/cm³. Wartości te są zgodne z wartościami deklarowanymi dla dostępnych komercyjnie noży typu KCR08 (Ceratzit, Austria).

Modelowanie przeprowadzono zarówno dla wiązek nieseparowanych (jony $N^+ + N_2^+$ o udziale 1:1 oraz ekwiwalentu wiązki ACS (ang. *average charge state*)), jak i separowanych masowo (jony N^+ i N_2^+), dla 100 000 jonów, padających prostopadle do powierzchni implantowanego podłoża. Wartości napięcia przyspieszającego jony przyjęto w zakresie od 10 do 70 kV (wartości typowe dla klasycznych implantatorów jonów gazów), z krokiem 5 kV. Wartości energii poszczególnych rodzajów jonów przedstawiono w Tabeli 1.

W przypadku implantacji jonów $N^+ + N_2^+$, wiązka zawiera 50% jonów typu N^+ o wartości energii x i 50% jonów typu N_2^+ o wartości energii $0,5x$. Ze względu na to, że w takim przypadku, 2 ładunki elementarne przypadają na 3 atomy, średni stan naładowania dla ekwiwalentu ACS jest na poziomie 0,67. W przypadku implantacji jonów typu N^+ wartość ich energii jest równa wartości napięcia przyspieszającego, pomnożonego przez 1 ładunek elementarny, zaś w przypadku implantacji jonów N_2^+ wartość energii każdego jonu, ze względu na zasadę zachowania energii, jest dwukrotnie mniejsza od wartości napięcia przyspieszającego, pomnożonego przez 1 ładunek elementarny.

Tabela 1. Wartości energii jonów odpowiadające wartościom napięcia przyspieszającego dla wszystkich rozpatrywanych przypadków wiązek azotu

Table 1. The ion energy values corresponding to the values of acceleration voltage for all considered cases of nitrogen beams

Napięcie przyspieszające (kV)	Rodzaj implantowanych jonów			
	Implantator bez separacji masowej		Implantator z separacją masową	
	N ⁺ +N ₂ ⁺ (50%+50%)	ACS (100%)	N ⁺ (100%)	N ₂ ⁺ (100%)
	Energia (keV)			
10	10+5	6,7	10	5
15	15+7,5	10,05	15	7,5
20	20+10	13,4	20	10
25	25+12,5	16,75	25	12,5
30	30+15	20,1	30	15
35	35+17,5	23,45	35	17,5
40	40+20	26,8	40	20
45	45+22,5	30,15	45	22,5
50	50+25	33,5	50	25
55	55+27,5	36,85	55	27,5
60	60+30	40,2	60	30
65	65+32,5	43,55	65	32,5
70	70+35	46,9	70	35

Z modelowaniem związane są ograniczenia, których występowania użytkownik musi być świadomy. Programy modelujące procesy implantacji jonów zazwyczaj nie uwzględniają różnych typowych zjawisk fizyko-chemicznych jak np. dyfuzja, rozpylanie, zachodzenie reakcji chemicznych, czy segregacja lub aglomeracja atomów (Kelly i Miotello 1996). Ponadto, implantacja jonów należy do metod nierównowagowych, a zatem, w implantowanych materiałach istnieje możliwość wystąpienia różnorodnych dodatkowych mechanizmów, jak np. mechanizmy radiacyjnie wzmożonej dyfuzji (ang. *radiation-enhanced diffusion*) lub mechanizmy ostrzy termicznych (ang. *thermal spike*) (McHargue i in. 1994).

Innego typu ograniczeniem w przypadku multiimplantacji jonów obarczony jest dobór ustawień programu. W publikacji (Barlak 2019) wspomniano, że program SRIM dzieli oś odciętych na 49 odcinków (50 punktów). Z tego powodu, dla dokładnego odwzorowania kształtu profilu implantowanego pierwiastka oraz jego „zmiszczenia się” w przyjętym zakresie wartości osi odciętych, konieczny jest właściwy dobór jej skali. Zasady tej nie można zastosować w przypadku modelowania profili w 1 etapie prac modelowania multiimplantacji. W tym przypadku, konieczne jest zdefiniowanie skali dla profilu modelowanego dla największej wartości napięcia przyspieszającego. Tak zdefiniowana skala będzie obowiązywała dla wszystkich pozostałych profili. Takie podejście do problemu spowoduje, że profile dla niższych wartości napięcia przyspieszającego będą mniej dokładne, ale jednocześnie dużo łatwiejsza będzie ich obróbka w arkuszu kalkulacyjnym.

W drugim etapie prac, obliczone wcześniej profile zostały wyeksportowane do arkusza kalkulacyjnego Microsoft Excel 2010 i zestawione w celu selekcji, sumowania i empirycznego określenia implantowanej dawki poszczególnych procesów implantacji jonów, dla uzyskania dawki łącznej o wartości $1e17 \text{ cm}^{-2}$. Oprócz multiimplantacji dla poszczególnych rodzajów wiązek, tj. $N^+ + N_2^+$, ACS, N^+ i N_2^+ , zaproponowano przypadek N^+ , rozszerzony o dodatkową implantację jonami N_2^+ dla napięcia 10 kV (energia jonów 5 keV). Określono plateau dla wszystkich przypadków zaproponowanych multiimplantacji. Wartości liczbowe granic plateau przyjęto jako nie mniejsze niż minimalne wartości „płaskiej” części profili. Obliczono, grubość obszaru „płaskiego”, średnią wartość plateau oraz odchylenie standardowe i błąd standardowy dla tej wartości. Ponadto wyznaczono udział obszaru plateau w całości profilu poprzez porównanie odpowiednich wartości całek pod krzywą.

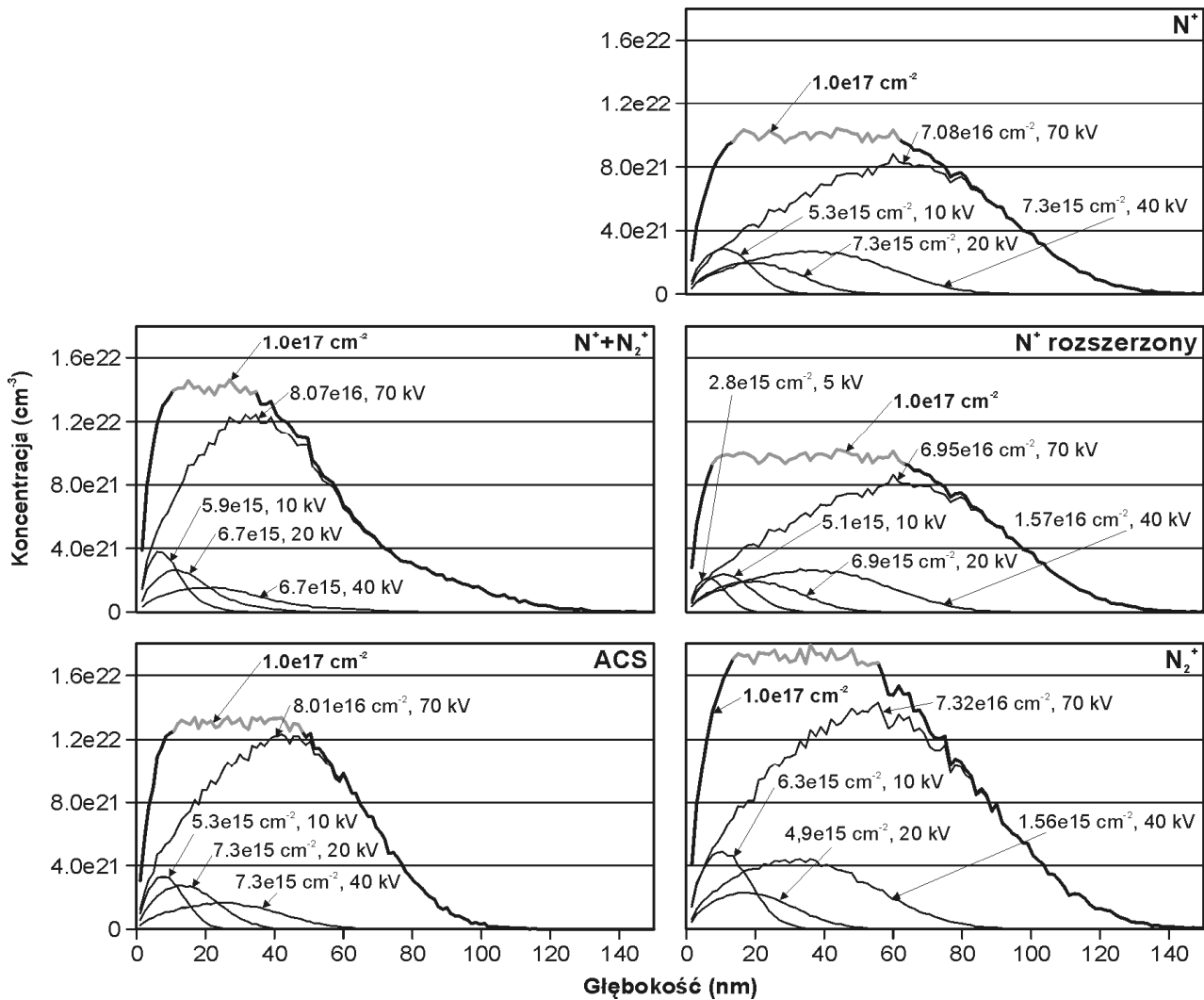
Wyniki badań i analiza

Na rys. 1 przedstawione zostały wyznaczone profile multiimplantacji dla wiązek $N^+ + N_2^+$, N^+ i N_2^+ oraz ekwiwalentu ACS i przypadku N^+ rozszerzonego. Po lewej stronie przedstawiono wyniki dla wiązek nieseparowanych masowo, po prawej - dla separowanych. W każdym przypadku, oprócz uzyskanego profilu multiimplantacji, przedstawiono jego składowe wraz z informacjami o wartości dawki zadanej i wartości napięcia przyspieszającego, dla której były modelowane.

Jak łatwo zauważyć, zazwyczaj wystarczą 4 procesy pojedynczych implantacji dla uzyskania prawidłowego profilu multiimplantacji. Ponadto, ze względu na specyfikę procesów implantacji (im niższe napięcie przyspieszające, tym większe wartości maksymalnej koncentracji objętościowej implantowanego pierwiastka oraz mniejsze wartości zasięgu rzutowanego i rozrzutu zasięgu) największe dawki powinny być stosowane dla największej wartości napięcia przyspieszającego.

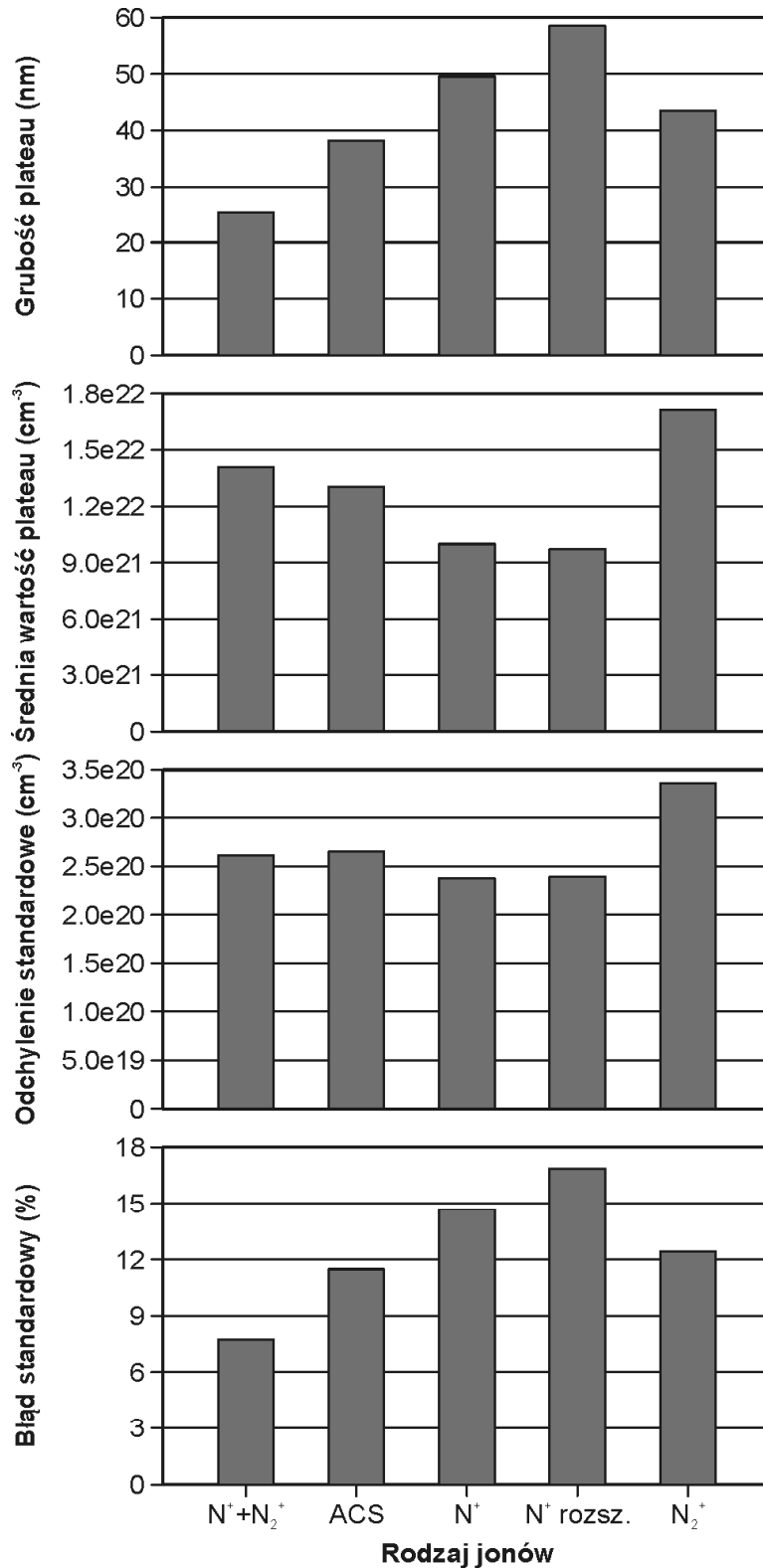
Obszary plateau zaznaczono kolorem szarym. Najszersze obszary są dla przypadków implantacji N^+ i N^+ rozszerzonego, najwęższy - dla przypadku $N^+ + N_2^+$. Profil multiimplantacji dla $N^+ + N_2^+$ znacząco odbiega od profilu ACS, co oznacza, że wartość średniej krotności jonizacji nie jest dobrym ekwiwalentem w przypadku multiimplantacji.

Warto również zwrócić uwagę na różną wartość koncentracji dla obszarów plateau, najwyższą w przypadku jonów N_2^+ i najniższą w przypadku N^+ . Ma to również związek ze wspomnianą wcześniej specyfiką procesu implantacji.



Rys. 1. Profile multiimplantacji i składowych z wartościami dawki zadanej i napięcia przyspieszającego
Fig. 1. The multi-profiles and the component profiles with the values of the implanted fluences and the acceleration voltage

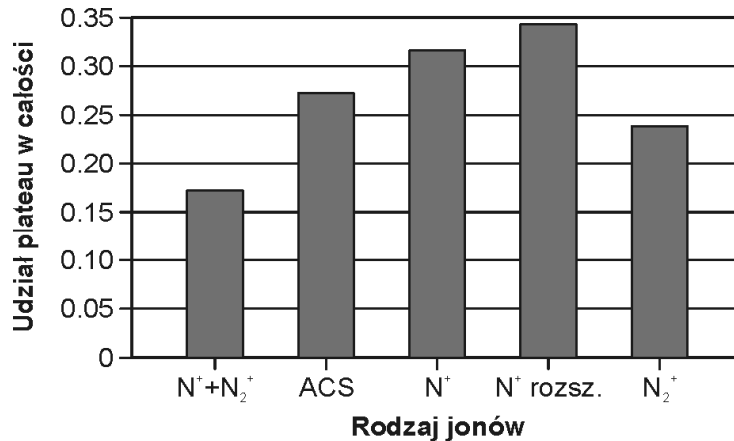
Na rys. 2 przedstawiono wartości grubości obszaru plateau, średnie wartości plateau oraz odchylenie standardowe i błąd standardowy dla tej wartości. Wartości grubości obszaru plateau potwierdzają wcześniejsze obserwacje i analizy rys. 1 - największa grubość jest dla przypadków N⁺ i N⁺ rozszerzonego, najmniejsza - dla przypadku N⁺+N₂⁺. Również średnie wartości plateau są zgodne z poprzednimi obserwacjami. Względne wartości odchylenia standardowego są zbliżone w przypadku N⁺+N₂⁺, ACS, N⁺ i N⁺ rozszerzonego, jednakże bezwzględne wartości błędu standardowego dla tych przypadków pokazują nawet dwukrotne różnice. Najmniej „płaski” jest obszar plateau w przypadku N⁺ rozszerzonego, najbardziej „płaski” - w przypadku N⁺+N₂⁺.



Rys. 2. Grubość plateau, średnia wartość plateau, odchylenie standardowe i błąd standardowy dla wszystkich rozważanych przypadków implantacji jonów

Fig. 2. The thickness of plateau, the average value of the plateau, the standard deviation and standard error values for all considered cases of the ion implantation

Na rys. 3 przedstawiono udział obszaru plateau w całości profilu. Jak łatwo zauważyć z punktu widzenia plateau, najbardziej korzystny jest profil multiimplantacji dla przypadku N^+ rozszerzonego, a najmniej korzystny - dla $N^+ + N_2^+$. Również w przypadku tych zależności, łatwo zauważyć, że ekwiwalent ACS nie jest dobrym odpowiednikiem w przypadku modelowania multiimplantacji.



Rys. 3. Udział obszaru plateau w całości profilu dla wszystkich rozważanych przypadków implantacji jonów

Fig. 3. The plateau/multi ratio values for all considered cases of the ion implantation

Wnioski

Na podstawie wyników modelowania procesów multiimplantacji jonów azotu do materiału W-C-Co można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Wiązki bez separacji masowej są mniej skuteczne w porównaniu z wiązkami separowanymi, tzn. modelowane obszary plateau są w ich przypadku krótsze. Dla przedstawionych przypadków, wyznaczona grubość plateau dla implantacji jonów $N^+ + N_2^+$ była dwukrotnie mniejsza w porównaniu z przypadkiem implantacji jonów N^+ .
2. Skuteczność wiązek separowanych masowo zależy od rodzaju implantowanych jonów. Grubość plateau dla przypadku implantacji jonów N^+ była o ok. 14% większa w porównaniu z przypadkiem implantacji jonów N_2^+ .
3. Skuteczność może być zwiększona przez rozszerzenie procesu multiimplantacji. Dodatkowy proces implantacji w przypadku jonów N^+ może zwiększyć grubość plateau o około 20%.
4. Profile ACS nie są dobrym odpowiednikiem w przypadku multiimplantacji jonów wiązkami bez separacji masowej.
5. Średnia wartość plateau, tj. koncentracja implantowanych jonów, zależy od ich rodzaju. Należy mieć to na uwadze przy projektowaniu poziomu koncentracji implantowanych jonów.

6. Najlepsze wyniki modelowania multiimplantacji uzyskano dla przypadku N^+ rozszerzony. Grubość plateau była największa i jednocześnie udział plateau w całości był najbardziej korzystny. Niestety, wartość błędu standardowego była również największa.

Literatura

Barlak M., Wilkowski J., Werner Z., 2016: Ion implantation changes of tribological and corrosion resistance properties of materials used in wood industry. *Annals of Warsaw University of Life Science - SGGW, Forestry and Wood Technology* 94, 19-27.

Barlak M., Wilkowski J., Boruszewski P., Werner Z., Pałubicki B., 2017: Changes of functional properties of materials used in wood industry after ion implantation process. *Annals of Warsaw University of Life Science - SGGW, Forestry and Wood Technology* 97, 133-139.

Barlak M., Wilkowski J., Werner Z., 2019: The selected problems of the modelling of the depth profiles of the elements implanted to the tools used in wood material machining. *Biuletyn Informacyjny OB-RPPD* 3-4, 118-134, in Polish. <https://doi.org/10.32086/biuletyn.2019.5>

Becerra H.M., Gloria V.V., Lizárraga-Medina E.G., Rangel-Rojo R., Salazar D., Oliver A., 2017: Development of optical waveguides through multiple-energy ion implantations. *Ion Implantation - Research and Application* 101-123. 10.5772/67829

Bonny K., De Baets P., Perez Y., Vleugels J., Lauwers B., 2010: Friction and wear characteristics of WC-Co cemented carbides in dry reciprocating sliding contact. *Wear* 268, 1504-1517. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.02.029>

Chen H.-Y., Lin Y.-S., 2019: Enhancement of second-harmonic generation in thermally poled fused silica by multi-energy argon ion implantation. *Optical Materials* 95, 109217. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.109217>

Choi S.-H., Kang S.-D., Kwon Y.S., Lim S.G., Cho K.K., Ahn I.-S., 2010: The effect of sintering conditions on the properties of WC-10wt%Co PIM compacts. *Research on Chemical Intermediates* 36, 743-748. <https://doi.org/10.1007/s11164-010-0176-8>

David M.L., Ratchenkova A., Oliviero E., Denanot M.F., Beaufort M.F., Declémy A., Blanchard C., Gerasimenko N.N., Barbot J.F., Radiation damage in He implanted silicon at high temperature using multi-energies. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 198, 83-89. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(02\)01517-3](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(02)01517-3)

Dening W., Weiyuan W., 1987: A study of multi-energy ion implantation, *Journal of Electronics* 4, 39-45. <https://doi.org/10.1007/BF02893129>

Fayeulle S., Treheux D., Guiraldenq P., 1986: Nitrogen implantation in tungsten carbides. *Journal of Materials Science* 21, 1814-1818. <https://doi.org/10.1007/BF01114744>

Fu G., Wang K.-M., Wang X.-L., Lu F., Lu Q.-M., Shen D.-Y., Ma H.-J., Nie R., 2007: Formation of planar optical waveguide by multi energy Si ion implantation into Nd:YVO₄ crystal. *Surface and Coatings Technology* 201, 5427-5430. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.07.050>

Kelly R., Miotello A., 1996: Metal-ceramic ion-beam mixing: a quest for general principles. *Surface and Coatings Technology* 83, 134-145. [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(95\)02782-3](https://doi.org/10.1016/0257-8972(95)02782-3)

Lazar M., Laariedh F., Cremillieu P., Planson D., Leclercq J.-L., 2015: The channeling effect of Al and N ion implantation in 4H-SiC during JFET integrated device processing. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 365, 256-259. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.07.033>

Liu T., Kong W.-J., Qiao M., Cheng Y., 2018: Maintain Raman property in ZnS single crystal waveguide formed by multienergy He ion implantation at 633 nm. *Results in Physics* 11, 822-825. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.10.031>

Magruder III R.H., Weller R.A., Weeks R.A., Wehrmeyer J., Zuhr R.A., Hensley D.K., 2001: Effects of ArF excimer irradiation on single energy and multi energy Ge ion implanted silica. *Journal of Non-Crystalline Solids* 280, 169-176. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(00\)00372-0](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(00)00372-0)

Magruder III R.H., Weeks R.A., Weller R.A., Zuhr R.A., 2002: Effects of multi-energy Si and O ion implantation on the optical properties of silica. *Journal of Non-Crystalline Solids* 304 224-232. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(02\)01027-X](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(02)01027-X)

Magruder III R.H., Weeks R.A., Weller R.A., 2003: Luminescence and absorption in type III silica implanted with multi-energy Si, O and Ar ions. *Journal of Non-Crystalline Solids* 322, 58-67. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(03\)00175-3](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(03)00175-3)

Magruder R.H., Weeks R.A., Weller R.A., Galyon R., 2004: Photoluminescence and absorption in multi-energy Ge implanted type III silica. *Journal of Non-Crystalline Solids* 345-346, 284-292. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2004.08.097>

Magruder III R.H., Weeks R.A., Morimoto Y., 2011: Si related defects in the VUV in silicon multi-energy implanted type III silica. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 269 2532-2538. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2011.06.021>

McHargue C.J., Jospin D.L., White C.W., 1994: Ion beam mixing in insulator substrates. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 91, 549-557. [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(94\)96284-7](https://doi.org/10.1016/0168-583X(94)96284-7)

Mikkelsen N.J., Pedersen J., Straede C.A., 2002: Ion implantation - the job coater's supplement to coating techniques. *Surface and Coatings Technology* 158-159, 42-47. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00208-6](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00208-6)

Milman. Yu.V., Chugunova S., Goncharuck V., Luyckx S., Northrop I.T., 1997: Low and high temperature hardness of WC-6 wt%Co alloys. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 15, 97-101. [https://doi.org/10.1016/S0263-4368\(97\)81231-0](https://doi.org/10.1016/S0263-4368(97)81231-0)

Naumova O.V., Antonova I.V., Popov V.P., Stas V.F., 2003: Heterostructures formed on silicon by high-dose multi-energy hydrogen implantation. *Microelectronic Engineering* 66, 422-426. [https://doi.org/10.1016/S0167-9317\(02\)00945-0](https://doi.org/10.1016/S0167-9317(02)00945-0)

Olovsjö S., Johanson R., Falsafi F., Bexell U., Olsson M., 2013: Surface failure and wear of cemented carbide rock drill buttons - The importance of sample preparation and optimized microscopy settings. *Wear* 302, 1546-1554. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.078>

Phelps G.J., 2004: Dopant ion implantation simulations in 4H-silicon carbide. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering* 12, 1139-1146. <https://doi.org/10.1088/0965-0393/12/6/008>

Piekoszewski J., Kempniński W., Barlak M., Werner Z., Łoś S., Andrzejewski B., Stankowski J., Piekara-Sady L., Składnik-Sadowska E., Szymczyk W., Kolitsch A., Grötzschel R., Starosta W., Sartowska B., 2009: Superconductivity of Mg–B layers prepared by a multi-energy implantation of boron into magnesium and magnesium into boron bulk substrates followed by the furnace and pulsed plasma annealing. *Surface and Coatings Technology* 203, 2694-2699. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.02.097>

Pirso J., Letunoviš S., Viljus M., 2004: Friction and wear behaviour of cemented carbides. *Wear* 257, 257-265. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.06.218>

Posselt M., Mäder M., Lebedev A., Grötzschel R., 2005: Multiple implantations into Si: Influence of the implantation sequence on ion range profiles. *Applied Physics Letters* 87, 043109. <https://doi.org/10.1063/1.2005388>

Rodriguez R.J., Garcia J.A., Sanchez R., Perez A., Garrido B., Morante J., 2002: Modification of surface mechanical properties of polycarbonate by ion implantation. *Surface and Coatings Technology* 158-159, 636-642. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00322-5](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00322-5)

Sheikh-Ahmad J.Y., Bailey J.A., 1999: High-temperature wear of cemented tungsten carbide tools while machining particleboard and fiberboard. *Journal of Wood Science* 45, 445-455. <https://doi.org/10.1007/BF00538952>

Straede C.A., 1996: Application of ion implantation in tooling industry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 113, 161-166. [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(95\)01380-6](https://doi.org/10.1016/0168-583X(95)01380-6)

Teranishi N., Fuse G., Sugitani M., 2018: A review of ion implantation technology for image sensors. *Sensors* 18, 2358. [10.3390/s18072358](https://doi.org/10.3390/s18072358)

Tsuji H., Arai N., Gotoh N., Minotani T., Kojima K., Adachi K., Kotaki H., Ishibashi T., Gotoh Y., Ishikawa J., 2007: Germanium nanoparticles formed in silicon dioxide layer by multi-energy implantation and oxidation state of Ge atoms. *Journal of Physics: Conference Series* 61 1196-1201. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/61/1/236>

Wang D., Chen Z.Q., Zhou F., Lu W., Maekawa M., Kawasuso A., 2009: Ferromagnetism and microstructure in Fe⁺-implanted ZnO. *Applied Surface Science* 255 9371-9375. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.07.038>

Wang J., Zhang X., Fang F., Chen R., 2019: Diamond cutting of micro-structure array on brittle material assisted by multi-ion implantation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 137, 58-66. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2018.10.005>

Werner Z., Szymczyk W., Piekoszewski J., Seah M.P., Ratajczak R., Nowicki L., Barlak M., Richter E., 2009: Stoichiometric MgB₂ layers produced by multi-energy implantation of boron into magnesium. *Surface and Coatings Technology* 203, 2712-2716. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.02.103>

Zhang S.-M., Cai L.-T., Liu Q.-X., Liu X.-H., Ming X.-B., 2013: Optical waveguide in stoichiometric lithium niobate by multi-low-energy helium ion implantation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 307, 438-441. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2012.12.071>

Zhao J.-H., Wang X.-L., Chen F., 2010: 1×4-Branch waveguide power splitters in lithium niobate by means of multi-energy O ion implantation. *Optical Materials* 32, 1441-1445. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2010.05.016>

Zhao J., Ye L., Liu Y., Li S., Fu G., Yue Q., 2019: Optical properties and surface blistering visualization on multiple-energy He-implanted Yb:YGG crystal by annealing treatment. *Results in Physics* 15, 102621. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102621>

Źródła internetowe

SRIM - <http://www.srim.org/> (dokument elektroniczny, stan na dzień 30.04.2020)

Artykuł recenzowany / Reviewed paper

Zgłoszony / Submitted: 05.05.2020

Opublikowany online / Published online: 03.07.2020