Artykuł naukowy Science paper Dostępny na stronie / Available online at www.biuletyn.online



Biuletyn Informacyjny OB-RPPD 1-2 (2022) 59-82 https://doi.org/10.32086/biuletyn.2022.04

Zwiększenie możliwości technicznych implantatora jonów w procesach obróbki narzędzi

Increasing technical capabilities of the ion implanter in tool modification processes

Marek Barlak ^{a,*} ,	ORCID: 0000-0003-1416-7461
Jacek Wilkowski ^b ,	ORCID: 0000-0001-5798-6761
Zbigniew Werner ^a ,	ORCID: 0000-0003-1172-0268
Bogdan Staszkiewicz ^a ,	ORCID: 0000-0002-7741-4362
Jerzy Zagórski ^a ,	ORCID: 0000-0001-6311-947X

^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

Implantacja jonów jest stosunkowo prostą metodą modyfikacji właściwości materiałów, wykorzystującą energię kinetyczną jonów rozpędzonych w polu elektrycznym. Może być wykorzystywana do zmiany parametrów próbek w badaniach naukowych, ale również do poprawy właściwości gotowych elementów np. części maszyn czy narzędzi, ze względu na to, że w procesie modyfikacji nie zmieniają się: kształt oraz gabaryty modyfikowanych materiałów. Jednakże, aby zapewnić większą efektywność tej metody, często należy wykorzystywać dodatkowe oprzyrządowanie zwiększające możliwości techniczne implantatora jonów.

W pierwszej części artykułu przedstawiono krótką historię metody implantacji jonów oraz przykłady jej zastosowań w różnych dziedzinach. Druga część artykułu, uwzględniająca aspekt ekonomiczny procesu, przedstawia praktyczne porady dotyczące wykorzystywania różnego rodzaju uchwytów i manipulatorów modyfikowanych próbek/narzędzi, które mogą pomóc w projektowaniu urządzeń i procesów modyfikacji.

Abstract

lon implantation is a relatively simple method of modifying the properties of materials, using the kinetic energy of ions accelerated in an electric field. It can be used to change the parameters of samples in scientific investigations, but also to improve the properties of

finished elements, e.g. machine parts or tools, due to the fact that the modification process does not change the shape and dimensions of the modified materials. However, to make this method more effective, it is often necessary to use additional equipment that increases the technical capabilities of the ion implanter.

The first part of the paper presents a short history of the ion implantation method and examples of its applications in various fields. The second part, taking into account the economics of the process, shows practical tips on the use of various types of modified sample/tool holders and manipulators, which can help to project the process and devices for the tools' modification processes.

Słowa kluczowe: implantacja jonów, implantator, osprzęt, obróbka narzędzi

Keywords: ion implantation, implanter, equipment, tool treatment

Wprowadzenie

Zjawisko bombardowania jonowego było obserwowane przez fizyków już w połowie XIX wieku. W 1854 r. M. Faraday zaobserwował osadzanie metalicznej warstwy materiału na obudowie lampy wyładowczej. Po ponad 30 latach, tj. w 1886 r., F. Goldstein wyjaśnił to zjawisko jako efekt rozpylania powierzchni katody na skutek jej bombardowania dodatnimi jonami, powstajacymi na skutek wyładowania elektrycznego w lampie. W 1911 r. E. Rutherford, mierzac katy rozpraszania czastek α , bombardujacych cienka złota folie, wywnioskował, iż atom składa sie z jadra i krażacych wokół niego elektronów (Pyszniak 2015). Uważa sie, że pierwszym historycznie implantatorem jonów było urzadzenie oparte na wykorzystaniu helu, skonstruowane w 1911 r. w Cavendish Laboratory w Cambridge. i obsługiwane przez wspomnianego wyżej E. Rutherforda i jego współpracowników. W 1949 r. W. Shockley złożył wniosek o patent na "Semiconductor Translating Device", przyznany w 1954 r. (US2666814A), opisujący wytwarzanie złącza p-n za pomoca implantacji jonów, a w 1954 r. złożył kolejny wniosek o patent "Forming of Semiconductor Devices by Ionic Bombardment", przyznany w 1957 r. (US2787564A), podając podstawowy opis urządzenia do implantacji jonów (Bodycote, Macdougall i in. 1969). Według niektórych źródeł działo się to zaledwie kilka lat po tym, jak W.G. Pfann opatentował koncepcję wykorzystania dyfuzji w krzemie i germanie (Doolittle). Uważa się, że John Macdougall jest jednym z wynalazców pierwszej komercyjnie opłacalnej metody implantacji jonów (Palmer, Macdougal). Proces ten w latach 70-ych XX wieku, stosowano do zmiany przewodności elektrycznej obszarów płytek krzemowych, wykorzystywanych do budowy półprzewodnikowych elementów elektronicznych. Badania nad zastosowaniem metody implantacji jonów do modyfikacji właściwości przypowierzchniowych ciała stałego, rozpoczeto w Polsce w 1970 r., w Instytucie Technologii Elektronowej ITE w Warszawie, przy współpracy z Instytutem Fizyki Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej UMCS w Lublinie i Instytutem Badań Jądrowych IBJ w Świerku. Głównym celem prac było

zastosowanie implantacji w technologii przyrządów półprzewodnikowych (Mączka 1994, Rosiński 1995).

Przedstawiana kilkukrotnie na łamach Biuletynu (Wilkowski i in. 2019, Barlak i in. 2019, Barlak i in. 2020a, Barlak i in. 2020b, Wilkowski i Barlak 2021) implantacja jonów, bedaca stosunkowo prosta metoda modyfikacji materiałów, stała sie niejako metoda konkurencyjna do metod dyfuzyjnych. Jest to niskotemperaturowy proces zmiany właściwości chemicznych i fizycznych implantowanego materiału, podczas gdy dyfuzję można określić jako ruch domieszek/zanieczyszczeń wewnatrz materiału, wywołany gradientem jej steżenia, przebiegający tym szybciej im wyższa jest jego temperatura. Rozkład implantowanej domieszki jest jzotropowy i silnie ukierunkowany, podczas gdy zazwyczaj kierunkowe zróżnicowanie w koncentracji domieszki dyfundowanej nie jest tak duże. Zaleta implantacji jonów jest precyzyjna kontrola dawki implantowanej domieszki w szerokim zakresie 10¹¹-10¹⁸ cm⁻² i głebokości położenia jej profilu, co jest utrudnione w procesach dyfuzji. W przypadku implantacji półprzewodników na ogół dochodzi do pojawienia sie uszkodzeń radiacyjnych powierzchni, wymagających usuniecia w kolejnym procesie technologicznym, tzw. wygrzewaniu. Zjawisko to nie występuje w procesach dyfuzyjnych. Implantacja jonów polegająca na bombardowaniu podłoża jonami przyspieszonymi do predkości rzędu od setek do tysięcy kilometrów na sekundę, jest metodą nierównowagową (Barlak i in. 2009, Werner i in. 2016, Nowakowska-Langier i in. 2018, Chodun i in. 2020), w której wprowadzane jony nie tylko zmieniają skład podłożą, ale ze względu na dużą energie, mogą prowadzić do jego różnych fizycznych i chemicznych przemian, w tym do tworzenia powierzchniowych stopów, niezależnych od ograniczeń termodynamicznych, podczas gdy procesy dyfuzyjne są zaliczane do procesów równowagowych. Koszt inwestycyjny implantacji jest stosunkowo wysoki. Nowoczesny implantator jonów kosztuje ok. 2-5 milionów dolarów, w zależności od wielkości i parametrów (Rubin i Poate 2003, Larson i Williams 2011) a wynika to głównie z ceny aparatury próżniowej. Koszt urządzeń dyfuzyjnych jest niższy (PEDIAA).

Zaletą metody implantacji jonów, jest możliwość wprowadzenia praktycznie dowolnego rodzaju jonów do dowolnego podłoża. Ponieważ w procesie modyfikacji nie zmieniają się: kształt oraz gabaryty modyfikowanych materiałów, metoda implantacji bywa wykorzystywana nie tylko do zmiany właściwości/parametrów próbek w badaniach naukowych, ale również do poprawy właściwości gotowych elementów np. części maszyn czy narzędzi. Grubość modyfikowanego obszaru jest ograniczona i wynosi w przypadku klasycznej implantacji od kilku do kilkuset nm. Obszar ten nie jest nałożoną warstwą, a więc nie występuje niebezpieczeństwo wystąpienia jego delaminacji.

Implantacja jonów stała się początkowo kluczowym procesem domieszkowania w komercyjnej produkcji materiałów półprzewodnikowych, a następnie, w procesach wytwarzania urządzeń fotonicznych oraz zaawansowanych materiałów inżynierskich (Larson and Williams 2011). Obecnie, jest stosowana na wielu różnych polach. Oprócz klasycznych zastosowań np. w obszarze tribologii (Kamiński i Budzyński 2017) - Rys. 1 czy

- 61 -

ochrony korozyjnej (Karimi i in. 2002) - Rys. 2, jest wykorzystywana w bardziej oryginalnych/egzotycznych bądź niszowych zastosowaniach (Rodríguez i in. 2002), m.in. w mineralogii, biologii czy przemyśle włókienniczym. Przykładowo:

- naukowcy, głównie z Tajlandii, od wielu lat wykorzystują implantację jonów do minerałów, celem zmiany ich właściwości optycznych, takich jak: termoluminescencja topazów implantowanych metalami przejściowymi (np. Cr, Fe, Co, W), zmiana koloru, zapewnienie "czystszego" koloru, przejrzystości, przepuszczalności i połysku rubinów, szafirów czy korundu, implantowanych tlenem, azotem lub argonem, w celu zwiększenia ich ceny (np. cena rubinów jest determinowana głównie przez ich kolor) (Marques i in. 2000, Marques i in. 2002, Chaiwong i in. 2005, Intarasiri i in. 2009, Intarasiri i in. 2014, Bootkul i in. 2015, Bootkul i in. 2016, Rao i in. 2016, Tippawan i in. 2016),

- istnieje wiele przykładów zastosowania implantacji azotu, argonu lub węgla w hodowli: ryżu, soi, kukurydzy, pszenicy, gryki, pomidorów, batatów, herbaty, orzeszków ziemnych, tytoniu, jatrofy, bawełny, róży, goździków, chryzantem, petunii itp. Traktowanie nasion roślin wiązką jonów o niskiej energii może wywołać m.in. szybszy wzrost różnych gatunków roślin (krótszy okres wegetacji), większą zdolność kiełkowania, wyższe plony, wyższą jakość nasion, dłuższą trwałość, wyższą odporność na wirusy, drobnoustroje czy choroby, wyższą odporność na suszę, ozdobne walory kwiatów, (Atak i in. 2004, Vilaithong i in. 2004, Feng i in. 2005, Wu i in. 2005, Phanchaisri i in. 2007, Song i in. 2007, Yu 2007, Krasaechai i in. 2009, Norarat i in. 2009, Xu i in. 2009, Cao i in. 2010, Xu i in. 2012a, Xu i in. 2012b, Duan i in. 2013, Han i in. 2013, Mahadtanapuk i in. 2013, Zhao i in 2013),

- wyselekcjonowane, zmutowane wiązką jonów bakterie mogą być przydatne w przemyśle spożywczym (poprawa zdolności fermentacyjnej, biokontrola patogenów) lub w rolnictwie (hamowanie wytwarzania konidiów wybranych grzybów, ograniczanie objawów chorobowych). Podobnie, fermentacja może wykorzystywać drożdże, poddane obróbce jonowej, (Wu i in. 2005, Mahadtanapuk i in. 2007, Anuntalabhochai i in. 2009, Mahadtanapuk i in. 2009, Yu i in. 2013),

 przykładem oddziaływania wiązki jonowej na zwierzę może być implantacja azotu do komórki jajowej jedwabnika. Zmodyfikowana poczwarka jedwabnika ujawniała tendencję wzrostową całkowitej zawartości kokonu, liczby warstw i wytrzymałości włókienek (Wu i in. 2005),

- traktowanie wiązką jonów tkanin bawełnianych, polietylenowych czy poliamidowych może zmieniać ich właściwości bakteriobójcze, odporność na ścieranie/zużycie, odporność na mechacenie (pilling), właściwości elektryczne i elektrostatyczne, właściwości palne, hydrofilowość/hydrofobowość/wodoodporność itp. Na przykład implantacja jonów Cu, Pd, Ag lub Pt poprawia właściwości elektryczne i może być stosowana w elektronice tekstylnej. Implantowane jony C, N, AI, Ti i Cr poprawiają właściwości mechaniczne i odporność na mechacenie zmodyfikowanych tekstyliów. Jony C i W zwiększają trudnopalność. Srebro znane jest ze swoich właściwości przeciwdrobnoustrojowych (w tym przeciwbakteryjnych i przeciwgrzybiczych) i jest stosowane w celu poprawy właściwości antybakteryjnych m.in. w bandażach, narzędziach chirurgicznych, cewnikach a także w różnych produktach medycznych i kosmetycznych, takich jak kremy, maści, mydła, w celu zapobiegania lub zwalczania infekcji. Podobnie działającym pierwiastkiem jest cynk (Brown i Oks 2005, Öztarhan i in. 2005, Ermel i in. 2006, Urkac i in. 2007, Chiang i in. 2010, Kitahara i in. 2010, Xu i in. 2010, Jin i in. 2014a, Jin i in. 2014b, Nikolaev i in. 2010, Nikolaev i in. 2014, Shirwaiker 2015, Echeverrigaray i in. 2016, Öktem i in. 2016, Shypylenko i in. 2016).



Rys. 1. Przykład narzędzi do pras Fig. 1. Examples of press tools



Rys. 2. Przykład membran i przetwornika ciśnienia **Fig. 2.** Examples of membranes and pressure transducer

Metoda implantacji jonów może również służyć jako metoda dekoracji np. ekskluzywnych, krótkoseryjnych wyrobów. Na Rys. 3. przedstawiono przykładowe wyniki prac własnych prowadzonych nad dekoracją materiałów ceramicznych i szkła.



Rys. 3. Przykład zdobienia przedmiotów metodą implantacji jonów **Fig. 3.** Example of decoration using the ion implantation method

Materiały i metodyka badań

Proces implantacji jonów

Jak już wspomniano wcześniej, koszt zakupu implantatora nie należy do niskich, a zatem aby obniżyć koszty modyfikacji, procesy implantacji powinny być zoptymalizowane.

Ponieważ implantacja jonów jest najbardziej efektywna dla prostopadłego padania wiązki na implantowany materiał (Wilkowski i in. 2021) należy zadbać o jego prawidłowe (pod odpowiednim kątem) ustawienie pod wiązką, przy pomocy różnego rodzaju uchwytów i/lub manipulatorów. Ustawienie takie powinno być dodatkowo stałe w czasie, aby implantowane elementy nie przemieszczały się podczas procesu pod wiązką, na skutek jej oddziaływania z nimi lub np. w wyniku drgań pomp próżniowych.

Do budowy uchwytów i manipulatorów oraz innego osprzętu umieszczonego w pobliżu wiązki jonów, w celu ochrony komory, jej wyposażenia, jak również implantowanych elementów, należy zastosować materiały, które trudno ulegają rozpylaniu. Najlepsza w tym zastosowaniu jest stal kwasoodporna, ale ze względu na trudności związane z jej obróbką mechaniczną jest często zastępowana np. stopami aluminium, m.in. stopem o symbolu PA6. Stop ten dobrze nadaje się do obróbki skrawaniem, ale np. wykonane w nim gwinty są stosunkowo łatwe do uszkodzenia. Łatwy do obróbki mechanicznej i trwalszy mosiądz nie powinien być używany w tego typu zastosowaniach, ze względu na jego podatność na rozpylanie.

Należy również pamiętać, że jeśli mechanizmy manipulatorów wymagają smarowania, konieczne jest stosowanie smarów przeznaczonych do pracy w próżni, tj. o niskiej lotności i o odpowiedniej lepkości.

W przypadku implantatora z wiązką stałą, czas ekspozycji (implantacji) *t*, wyznaczany na podstawie pomiaru wartości prądu jonowego (z kolektora implantatora) *I*_{*i*}, konieczny do uzyskania dawki zadanej implantowanego pierwiastka *D*, wynosi:

$$t = D \cdot Q \cdot e \cdot S/I_{l} \tag{1}$$

gdzie: *D* - dawka jonów (cm⁻²), *Q* - średni ładunek jonów wiązki (stablicowany dla implantatorów bez separacji masowej), *e* - ładunek elektronu ($e = 1,6\cdot10^{-19}$ C), *S* - pole powierzchni przekroju wiązki (cm²), *I*₁ - prąd jonowy (A).

W przypadku implantatora z wiązką impulsową, czas ekspozycji t wynosi:

$$t = D \cdot Q \cdot e \cdot S / \tau \cdot f \cdot I_1 \tag{2}$$

gdzie: τ - długość impulsu, mierzona w połowie jego wysokości (µs), f - częstotliwość impulsów (Hz).

Wartość ładunku elektronu *e* jest stała, podobnie jak długość impulsu *τ*, która jest cechą implantatora z wiązką impulsową. Czas implantacji jonów może więc zależeć od takich

parametrów jak: dawka jonów, średni ładunek jonów, pole powierzchni przekroju wiązki, częstotliwość impulsów oraz prąd jonowy.

Generalnie, im większa dawka zadana jonów *D*, tym dłuższy jest czas procesu implantacji *t*. Przykładowo, implantacja jonów azotu, do powierzchni 30 cm², przy prądzie wiązki 300 μ A, będzie trwała ok. 11 s dla dawki zadanej 1e15 cm⁻², ok. 2 min. dla dawki 1e16 cm⁻², ok. 18 min. dla dawki 1e17 cm⁻² i ok. 3 h dla dawki 1e18 cm⁻².

Optymalizując proces implantacji, należy pamiętać, że ze względu na zjawisko rozpylania, nie wszystkie jony zostaną wprowadzone do struktury implantowanego materiału (dawka zadana ≠ dawka zatrzymana) - Rys. 4 i dlatego nie warto niepotrzebnie zwiększać wielkości dawek zadanych implantowanych jonów. Pomocne w oszacowaniu dawek implantowanych jonów mogą być programy do modelowania procesów implantacji, jak np. SRIM czy SUSPRE.



Rys. 4. Zależność dawki zatrzymanej od dawki zadanej Ti implantowanego do AlN (Barlak i in. 2005) Fig. 4 The retained dose vs. the implanted dose for Ti implanted to AlN (Barlak i in. 2005)

Wpływ na wartość średniego ładunku jonów wiązki *Q* wiąże się z wyborem odpowiedniego rodzaju implantowanych jonów (jeśli jest to możliwe). Dla azotu jest to wartość 0,67, dla gazów szlachetnych - 1,0, a przykładowo w przypadku pierwiastków innych niż gazowe: 1,0 - dla litu, węgla i antymonu, 2,0 - dla tytanu, chromu, strontu, gadolinu, baru, tulu i iterbu, 3,0 - dla złota oraz 3,4 - dla wolframu (Krivonosienko i in. 2001).

Implantacja dawki jonów azotu na poziomie 1e17 cm⁻², przy prądzie 300 µA, będzie trwała ok. 6 min. dla pola powierzchni przekroju wiązki 10 cm², ok. 12 min. dla 20 cm² i ok. 18 min. dla 30 cm².

Pole powierzchni przekroju wiązki S oraz jego kształt zależy m.in. od zastosowanej diafragmy źródła jonów. Na Rys. 5. przedstawione zostały przykładowe ślady wiązki dla diafragmy z okrągłym otworem i 2 różnych diafragm z otworami w kształcie bieżni lekkoatletycznej. Nieregularne kształty na śladach wiązki spowodowane są kawałkami kwarcu, które zostały użyte podczas testów wielkości wiązki jonowej (kwarc jarzy się pod wpływem wiązki jonowej).

Gęstość prądu wiązki jonów nie jest taka sama wzdłuż całego przekroju. Rozkład gęstości wiązki w przekroju jest zbliżony do krzywej Gaussa. Należy o tym pamiętać przy projektowaniu procesu, aby dawka zatrzymana była taka sama na całej implantowanej powierzchni.

Kiedy konieczne jest dokładne określanie pola implantowanej powierzchni można zastosować przesłony o określonym kształcie i wymiarach okienka - Rys. 5.



Rys. 4. Ślady wiązki jonów dla diafragmy z okrągłym otworem (a) i otworem w kształcie bieżni lekkoatletycznej (b, c)
Fig. 4. Ion beam traces for the diaphragm with the circular aperture (a) and with the running track shape aperture (b, c)



Rys. 5. Przykład prostokątnej przesłony wiązki **Fig. 5.** Example of rectangular beam aperture

Mniejsza częstotliwość impulsów *f* jest zazwyczaj stosowana przy małych dawkach jonów, co umożliwia bardziej precyzyjny pomiar czasu implantacji, podczas implantacji materiałów trudniej przewodzących prąd elektryczny, bądź w przypadku dużych wartości prądu wiązki, stwarzających niebezpieczeństwo znacznego nagrzania implantowanych materiałów, które może wywołać niepożądane zmiany ich mikrostruktury.

Prąd jonowy *I*^{*i*} można regulować w określonym, charakterystycznym dla urządzenia zakresie, zapewniającym stabilną pracę źródła jonów oraz jego zasilaczy. Czas implantacji jest odwrotnie proporcjonalny do prądu jonowego i wynosi np. dla dawki jonów azotu na poziomie 1e17 cm⁻², do powierzchni 30 cm², ok. 54 min. dla 100 μA, ok. 27 min. dla 200 μA i ok. 18 min. dla 300 μA.

Wartość prądu jonowego powinna być dobrana pod kątem rodzaju modyfikowanego materiału, aby jak wspomniano powyżej, nie doprowadzić do zmian w jego mikrostrukturze. Temperatura na powierzchni implantowanego materiału powinna być kontrolowana w sposób ciągły. W przypadku zaistnienia niebezpieczeństwa jej nadmiernego wzrostu, implantację można prowadzić przy mniejszym prądzie, z przerwami bądź przy mniejszej częstotliwości w przypadku implantatorów z wiązką impulsową. Możliwe jest również wykorzystanie manipulatorów okresowo wprowadzających modyfikowany materiał w obszar wiązki. Niestety, wszystkie te zabiegi wydłużają czas trwania procesu.

W praktyce, oprócz pojęcia "prądu wiązki", stosuje się również określenie "gęstość prądu wiązki", które wyraża stosunek prądu wiązki i pola powierzchni przekroju wiązki.

Czas implantacji opisywany wzorami (1)-(2) dotyczy tylko procesu właściwej modyfikacji. Do tego należy doliczyć czas potrzebny na zapowietrzenie komory implantatora, załadunek modyfikowanych materiałów, ustawienie odpowiednich wartości parametrów procesu oraz czas konieczny do uzyskania właściwych warunków do prawidłowego prowadzenia procesu, a zwłaszcza właściwego poziomu próżni w komorze roboczej implantatora, ponieważ zbyt niski poziom próżni może spowodować wyładowania w źródle, a w efekcie - uszkodzenie układu.

Komory robocze implantatorów są odpompowywane dwuetapowo. W pierwszym etapie, do uzyskania próżni wstępnej na poziomie 5e-2 mbar, tj. 5 Pa, używa się pomp rotacyjnych

i/lub pomp Rootsa. W drugim etapie, próżnia na poziomie 5e-6 mbar, tj. 5e-4 Pa, uzyskiwana jest przy pomocy pomp dyfuzyjnych lub turbomolekularnych.

Właściwy poziom próżni, konieczny do rozpoczęcia procesu implantacji jest osiągany w czasie 1-1,5 h, gdy pompa dyfuzyjna jest zimna i w czasie 30-45 min., gdy jest rozgrzana. W przypadku pomp turbomolekularnych, czas osiągnięcia właściwego poziomu próżni skraca się o połowę w odniesieniu do powyższych wartości. Czas odpompowywania jest porównywalny dla różnych urządzeń, ze względu na to, że wydajność pomp dobiera się pod kątem objętości komór roboczych.

Jak wspomniano wcześniej, dla popularnej wartości dawki zadanej implantowanego azotu na poziomie 1e17 cm⁻², przy prądzie 300 µA, dla powierzchni 30 cm², czas implantacji wynosi 18 min. Jest to stosunkowo krótki czas w porównaniu z całkowitym czasem pracy implantatora. Aby poprawić stosunek czasu właściwego procesu implantacji do całkowitego czasu pracy urządzenia, należy stosować odpowiednie manipulatory, przy pomocy których można znacząco zwiększyć np. ilość modyfikowanych narzędzi bez konieczności zapowietrzania i odpompowywania komory. Krótki przegląd różnego rodzaju manipulatorów został przedstawiony w dalszej części niniejszego artykułu, w której pokazano praktyczne rozwiązania montażu i manipulacji modyfikowanych narzędzi.

<u>Oprzyrządowanie</u>

Rys. 6 przedstawia półprzemysłowy implantator jonów gazowych z wiązką stałą. Jest on wyposażony w dość dużą komorę o średnicy 80 cm, długości 120 cm i objętości ok. 600 l. Dodatkowo, jego funkcjonalność zwiększają dwa rękawy (zaznaczone strzałkami), co daje możliwość załadowania np. narzędzi na długości do 90 cm.



Rys. 6. Implantator jonów Fig. 6. Ion implanter

Materiały i narzędzia o niewielkich wymiarach i prostych kształtach jak np. noże wymienne (gdy implantowana jest powierzchnia natarcia), bądź płytki prowadzące do głowic do głębokiego wiercenia (Rys. 7), można implantować umieszczając je bezpośrednio pod pionową wiązką jonów, w sposób uniemożliwiający ich przemieszczanie podczas procesu implantacji. Gdy wiązka jonów jest pozioma konieczne jest zastosowanie odpowiednich uchwytów, pozycjonujących modyfikowane próbki lub narzędzia. Budowa takich uchwytów

może dawać możliwość przesłonięcia części próbki, w celu uzyskania powierzchni referencyjnej w badaniach naukowych. Przykłady prostych uchwytów, wykonanych na potrzeby implantacji zostały przedstawione na Rys. 8-9.



Rys. 7. Przykłady modyfikowanych narzędzi Fig. 7. Examples of the implanted tools



Rys. 8. Przykłady uchwytów próbek **Fig. 8.** Examples of the sample holders



Rys. 9. Przykład uchwytu bez i z zamontowanym wymiennym nożem WC-Co **Fig. 9.** Example of the sample holder without and with the implanted WC-Co indexable knife

Płytki z otworami montażowymi, przedstawione na Rys. 10 mogą być wykorzystywane w przypadku implantacji elementów o większych gabarytach lub do mocowania mniejszych uchwytów. Uniwersalność takiego rozwiązania jest dość duża, zwłaszcza, że oprócz modyfikowanych materiałów, na płytkach można montować dodatkowe elementy, np. termopary.



Rys. 10. Przykłady uniwersalnych płyt montażowych **Fig. 10.** Examples of the universal mounting plates

W przypadkach, gdy modyfikowane powierzchnie prostych w formie narzędzi są usytuowane pod określonym kątem do ich podstawy, należy zastosować uchwyty o budowie uwzględniającej ten kąt. Przykłady takich uchwytów zostały przedstawione na Rys. 11.



Rys. 11. Przykłady uchwytów narzędzi zapewniających implantację pod odpowiednim kątem **Fig. 11.** Examples of tool holders fixing the implanted surface at the appropriate angle

Sytuacja komplikuje się przy modyfikacji narzędzi o bardziej skomplikowanym kształcie, jak np. wiertła, czy noże kształtowe (Rys. 12). Gdy narzędzia są implantowane "od czoła", to godząc się na mniejszą efektywność implantacji, związaną z pochyleniem implantowanych krawędzi, wystarczy umieścić je w polu wiązki, jak pokazano na Rys. 13. W przypadku implantacji powierzchni bocznych, w najprostszym przypadku, zapewniając odpowiedni kąt ustawienia, narzędzia wystarczy umieścić w uchwycie stałym (Rys. 14) lub przesuwnym (Rys. 15). Zazwyczaj, w tym przypadku implantację należy prowadzić w dwóch etapach (obracając narzędzia o 180 stopni). Oczywiście, narzędzia można implantować zarówno "od czoła", jak i z boku, jednakże taka modyfikacja jest czasochłonna i nie zawsze konieczna.

W przypadku gdy wspomniana powyżej implantacja dwuetapowa może być niewystarczającą, należy stosować manipulatory obrotowe lub planetarne (Rys. 16). Przykładem takich narzędzi mogą być piły tarczowe (Rys. 17).



Rys. 12. Przykłady noży kształtowych i wierteł Fig. 12. Examples of the profile cutters and the drills



Rys. 13. Ustawienie wierteł pod wiązką "od czoła" Fig. 13. Setting the drills under the beam "from the front"



Rys. 14. Ustawienie wierteł węglikowych pod wiązką z uwzględnieniem kąta padania wiązki **Fig. 14.** Setting the carbide drills under the beam, taking into account the angle of incidence of the beam



Rys. 15. Noże kształtowe w uchwycie Fig. 15. Profile cutters in the tool holder



Rys. 16. Manipulatory obrotowe i planetarny **Fig. 16.** Rotary and planetary manipulators



Rys. 17. Przykład piły tarczowej i jej zamocowania na manipulatorze obrotowym i stoliku XY **Fig. 17.** Example of a circular saw and its mounting on a rotary manipulator and XY table

Podczas modyfikacji długich narzędzi, jak np. noży do perforacji papieru (Rys. 18), konieczny jest ich przesuw pod wiązką. Do tego celu można wykorzystać manipulator wózkowy (Rys. 19) lub stolik XY (Rys. 20).



Rys. 18. Przykład noży do perforacji papieru **Fig. 18.** Example of paper perforation knives



Rys. 19. Przykład manipulatora wózkowego **Fig. 19.** Example of a trolley type manipulator



Rys. 20. Przykład stolika XY **Fig. 20.** Example of XY table

Wnioski

Rozwój technik modyfikacji i ciągłe poszerzanie obszaru ich zastosowań, wymusza na konstruktorach opracowywanie coraz to nowszych rozwiązań konstrukcyjnych, zapewniających prawidłowy przebieg procesu modyfikacji, większe wykorzystanie możliwości urządzeń do modyfikacji, przy coraz bardziej skomplikowanych formach narzędzi.

Kluczowym może być również posiadanie możliwości technicznych, tj. warsztatu, w którym prototypy uchwytów i manipulatorów mogą być wytwarzane i na bieżąco korygowane. Wydatnie wpłynie to na skrócenie czasu prototypowania i wykonywania oprzyrządowania.

Podziękowania

Składamy je wszystkim osobom i instytucjom, współpracującym z autorami, które na przestrzeni wielu lat dostarczyły narzędzi i osprzętu, którego fotografie mogły być wykorzystane w tym artykule w celach edukacyjnych.

Literatura

Anuntalabhochai, S., Chandej, R., Sanguansermsri, M., Ladpala, S., Cutler, R.W., Vilaithong, T., 2009. Ion-beam-induced gene transfer in *Saccharomyces cerevisiae*. Surface and Coatings Technology 203, 2521-2524. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.02.067

Atak, Ç., Alikamanoğlu, S., Açık, L., Canbolat, Y., 2004. Induced of plastid mutations in soybean plant (*Glycine max* L. Merrill) with gamma radiation and determination with RAPD. Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis 556, 35-44. DOI: 10.1016/j.mrfmmm.2004.06.037

Barlak, M., Olesińska, W., Piekoszewski, J., Chmielewski, M., Jagielski, J., Kaliński, D., Werner, Z., Sartowska. B., 2005. Ion implantation as a pre-treatment method of AIN substrate for direct bonding with copper. Vacuum 78, 205-209. DOI: 10.1016/j.vacuum.2005.01.027

Barlak, M., Piekoszewski, J., Werner, Z., Pakieła, Z., Sartowska, B., Składnik-Sadowska, E., Waliś, L., Kierzek, J., Starosta, W., Kolitsch, A., Gröetzchel, R., Bocheńska, K., 2009.

The influence of distribution of titanium alloyed into carbon ceramics by the intense plasma pulses on their surface wettability with liquid copper. Vacuum 83 S81-S85. DOI: 10.1016/j.vacuum.2009.01.027

Barlak. M., Wilkowski, J., Werner, Z., 2019. Wybrane problemy modelowania głębokościowych profili pierwiastków, implantowanych do narzędzi wykorzystywanych w obróbce materiałów drzewnych. Biuletyn Informacyjny OB-RPPD 3-4, 118-134. DOI: 10.32086/biuletyn.2019.5

Barlak. M., Wilkowski, J., Werner, Z., 2020a. Modelowanie procesów multiimplantacji jonów azotu do narzędzi WC-Co wykorzystywanych w obróbce materiałów drzewnych. Biuletyn Informacyjny OB-RPPD 1-2, 56-67. DOI: 10.32086/biuletyn.2020.05

Barlak. M., Wilkowski, J., Werner, Z., Zagórski, J., Staszkiewicz, B., Szkarłat, F., 2020b. Wpływ implantacji CO₂ na okres trwałości narzędzi WC-Co wykorzystywanych w obróbce materiałów drzewnych. Biuletyn Informacyjny OB-RPPD 3-4, 178-187. DOI: 10.32086/biuletyn.2020.08

Bootkul, D., Chaiwai, C., Tippawan, U., Wanthanachaisaeng, B., Intarasiri, S., 2015. Analysis and modification of blue sapphires from Rwanda by ion beam techniques. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B: Beam Interactions with Materials and Atoms 365, 288-293. DOI: 10.1016/j.nimb.2015.07.029

Bootkul, D., Tengchaisri, T. Tippawan, U., Intarasiri, S., 2016. Analysis and modification of natural red spinel by ion beam techniques for jewelry applications. Surface and Coatings Technology 306, 211-217. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.05.084

Brown, I., Oks, E., 2005. Vacuum arc ion sources: recent developments and applications. IEEE Transactions on Plasma Science 33, 1931-1943. DOI: 10.1109/TPS.2005.860088

Cao, Y., Yao, J., Li, J., Chen, X., Wu, J., 2010. Breeding of high lipid producing strain of Geotrichum robustum by ion beam implantation. Electronic Journal of Biotechnology 13. DOI: 10.2225/vol13-issue6-fulltext-4

Chaiwong, C., Yu, L.D., Schinarakis, K., Vilaithong, T., 2005. Optical property modification of ruby and sapphire by N-ion implantation. Surface and Coatings Technology 196, 108-112. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2004.08.115

Chiang, W.C., Tseng, I.S., Møller, P., Hilbert, L.R., Tolker-Nielsen, T., Wu J.K., 2010. Influence of silver additions to type 316 stainless steels on bacterial inhibition, mechanical properties, and corrosion resistance. Materials Chemistry and Physics 119, 123-130. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2009.08.035

Chodun, R., Nowakowska-Langier, K., Wicher, B., Kwiatkowski, R., Zaloga, D., Dypa, M., Zdunek, K., 2020. The state of coating-substrate interfacial region formed during TiO₂ coating deposition by Gas Injection Magnetron Sputtering technique. Surface and Coatings Technology 398, 126092. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126092

Duan, H., Yu, Y., He, Y., Zhou, Y., Lu, L., 2013. Mutagenic effects of low energy ion s on root tip cell s of tomato (*Lycopersicum esculentum*). Plant Omics 6, 355-358.

Echeverrigaray, F.G., Echeverrigaray, S., Delamare, A.P.L., Wanke, C.H., Figueroa, C.A., Baumvol, I.J.R., Aguzzoli C., 2016. Antibacterial properties obtained by low-energy silver implantation in stainless steel surfaces. Surface and Coatings Technology 307, 345-351. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.09.005

Feng, H., Wu, L., Yu, L., Han, W., Liu, X., Yu Z., 2005. Mutagenic effect of a keV range N⁺ beam on mammalian cells. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 234, 477-486. DOI: 10.1016/j.nimb.2005.03.005

Han, Y., Xu, L., Yang, P., Ren, S., 2013. Study on the Growth and the Photosynthetic Characteristics of low energy C^+ ion implantation on peanut. PLoS ONE 8, e68769. DOI: 10.1371/journal.pone.0068769

Intarasiri, S., Bootkul, D., Yu, L.D., Kamwanna, T., Singkarat, S., Vilaithong, T., 2009. Gemological modification of local natural gemstones by ion beams. Surface and Coatings Technology 203, 2788-2792. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.02.122

Intarasiri, S., Wijaikhum, A., Bootkul, D., Suwannakachorn, D., Tippawan, U., Yu, L.D., Singkarat, S., 2014. Development of vertical compact ion implanter for gemstones applications. Applied Surface Science 310, 94-99. DOI: 10.1016/j.apsusc.2014.03.060

Intarasiri, S., Bootkul, D., Tippawan, U., Songsiriritthigul, P., 2016. Color improvement of rubies by ion beam technique. Surface and Coatings Technology 306, 205-210. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.05.083

Jin, G., Cao, H., Qiao, Y., Meng, F., Zhu, H., Liu X., 2014a. Osteogenic activity and antibacterial effect of zinc ion implanted titanium. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 117, 158-165. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2014.02.025

Jin, G., Qin, H., Cao H.,, Qian, S., Zhao, Y., Peng, X., Zhang, X., Liu, X., Chu, P.K., 2014b. Synergistic effects of dual Zn/Ag ion implantation in osteogenic activity and antibacterial ability of titanium. Biomaterials 35, 7699-7713. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2014.05.074

Kamiński, M., Budzyński, P., 2017. Implantacja jonowa jako sposób konstytuowania warstwy wierzchniej podzespołów silników spalinowych. Autobusy 12, 937-940.

Karimi, M.V., Sinha, S.K., Kothari, D.C., Khanna, A.K., Tyagi, A.K., 2002. Effect of ion implantation on corrosion resistance and high temperature oxidation resistance of Ti deposited 316 stainless steel. Surface and Coatings Technology 158-159, 609-614.

Kitahara, N., Sato, T., Isogawa, H., Ohgoe, Y., Masuko, S., Shizuku, F., Hirakuri K.K., 2010: Antibacterial property of DLC film coated on textile material. Diamond and Related Materials 19, 690-694. 10.1016/j.diamond.2010.03.013

Krasaechai, A., Yu, L.D., Sirisawad, T., Phornsawatchai, T., Bundithya, W., Taya, U., Anuntalabhochai, S., Vilaithong, T., 2009. Low-energy ion beam modification of horticultural plants for induction of mutation. Surface and Coatings Technology 203, 2525-2530. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.02.068

Krivonosienko, A.W., Nikolaev, A.G., Li, S., 2001. Технические описание и инструкция по эксплуатаци ионного источника "Титан-3" (Technical descriptions and operating instructions of the ion source "Titan-3"), Российская Академия Наук - Институт Сильноточной Электроники, Tomsk, in Russian.

Larson, L.A., Williams, J.M., 2011. Ion implantation for semiconductor doping and materials modification. 4, 11-40. DOI: 10.1142/S1793626811000616

Macdougall, J.D., Manchester, K.E., Roughan, P.E., 1969. High value implanted resistors for microcircuits. Proceedings of the IEEE 57, 1538-1542. DOI: 10.1109/PROC.1969.7333

Mahadtanapuk, S., Yu, L.D., Cutler, R., Vilaithong, T., Anuntalabhochai, S., 2007. Mutation of *Bacillus licheniformis* using low-energy ion beam bombardment. Surface and Coatings Technology 201, 8029-8033. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.08.148

Mahadtanapuk, S., Sanguansermsri, M., Yu, L.D., Vilaithong, T., Anuntalabhochai, S., 2009. Cloning of antifungal gene from *Bacillus licheniformis* by application of low energy Ion beam bombardment. Surface and Coatings Technology 203, 2546-2549. 10.1016/j.surfcoat.2009.02.072

Mahadtanapuk, S.. Teraarusiri, W., Phanchaisri, B., Yu, L.D., Anuntalabhochai, S., 2013. Breeding for blast-disease-resistant and high-yield Thai jasmine rice (*Oryza sativa* L. cv. KDML 105) mutants using low-energy ion beams. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 307, 229-234. DOI: 10.1016/j.nimb.2013.01.088

Marques, C., Falcãom A., da Silva, R.C., Alves, E., 2000. Annealing behaviour of natural topaz implanted with W and Cr ions. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 166-167, 204-208. DOI: 10.1016/S0168-583X(99)00655-2

Marques, C., Falcãom A., da Silva, R.C., Alves, E., 2002. Structural and optical characterization of topaz implanted with Fe and Co. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 191, 312-316. DOI: 10.1016/S0168-583X(02)00582-7

Mączka. D., 1994. Separacja izotopów i implantacja jonowa w Zakładzie Fizyki Jonów i Implantacji IF UMCS. Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska Lublin - Polonia 49, 173-190.

Nikolaev, A.G., Savkin, K.P., Yushkov, G.Y., Oks, E.M., Oztarhan, A., Akpet, A., Kocabas, E.H., Urkac, E.S., Cireli, I., 2010. Modification of the textile materials by vacuum arc ion source implantation. Proceedings of the 10th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows (10th CMM) 401-404.

A.G., Nikolaev, G.Y., Yushkov, E.M., Oks, A., Oztarhan, A., Akpek, E., Hames-Kocabas, E.S., Urkac, I.G., Brown, 2014. Modification of anti-bacterial surface properties of textile polymers by vacuum arc ion source implantation. Applied Surface Science 310, 51-55. DOI: 10.1016/j.apsusc.2014.04.002

Nowakowska-Langier, K., Chodun, R., Minikayev, R., Okrasa, S., Strzelecki, G.W., Wicher, B., Zdunek, K., 2018. Phase composition of copper nitride coatings examined by the use of X-ray diffraction and Raman spectroscopy. Journal of Molecular Structure 1165, 79-83. DOI: 10.1016/j.molstruc.2018.03.107

Norarat, R., Semsang, N., Anuntalabhochai, S., Yu L.D., 2009. Very low-energy and lowfluence ion beam bombardment of naked plasmid DNA. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 267, Pages 1650-1653. DOI: 10.1016/j.nimb.2009.01.095

Öztarhan, A., Brown, I., Bakkaloglu, C., Watt, G., Evans, P., Oks, E., Nikolaev, A., Tek Z., 2005. Metal vapour vacuum arc ion implantation facility in Turkey. Surface and Coatings Technology 196, 327-332. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2004.08.178

Öktem, T., Özdogan, E., Namligöz, S.E., Öztarhan, A., Tek, Z., Tarakçioglu, I., Karaaslan A., 2016. Investigating the applicability of metal ion implantation technique (MEVVA) to textile surfaces. Textile Research Journal 76, 32-40. DOI: 10.1177/0040517506059708

Phanchaisri, B., Chandet, R., Yu, L.D., Vilaithong, T., Jamjod, S., Anuntalabhochai, S., 2007. Low-energy ion beam-induced mutation in Thai jasmine rice (*Oryza sativa* L. cv. KDML 105). Surface and Coatings Technology 201, 8024-8028. 10.1016/j.surfcoat.2006.02.057

Pyszniak, K., 2015. Wykorzystanie zjawisk towarzyszących bombardowaniu jonowemu w diagnostyce procesu implantacji, Rozprawa doktorska, Narodowe Centrum Badań Jądrowych Świerk, Otwock

Rao, K.S., Sahoo, R.K., Dash, T., Magudapathy, P., Panigrahi, B.K., Nayak, B.B., Mishra, B.K., 2016. N and Cr ion implantation of natural ruby surfaces and their characterization. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 373, Pages 70-75. DOI: 10.1016/j.nimb.2016.03.017

Rodríguez, R.J., Medrano, A., Rico, M., Sánchez, R., Martínez, R., García J.A., 2002. Niche sectors for economically competitive ion implantation treatments. Surface and Coatings Technology 158-159, 48-53. DOI: 10.1016/S0257-8972(02)00211-6

Rosiński, W., 1995. Zastosowanie implantach jonów do modyfikacji właściwości technicznej warstwy wierzchniej metali. Materiały Elektroniczne 23, 5-23.

Rubin, L., Poate, J., 2003. Ion implantation in silicon technology. The Industrial Physicist, June/July, 12-15.

Song, M., Wu, Y., Zhang, Y., Liu, B.M., Jiang, J.Y., Xu, X., Yu Z.L., 2007. Mutation of rice (*Oryza sativa* L.) LOX-1/2 near-isogenic lines with ion beam implantation and study of their storability. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 265, 495-500. 10.1016/j.nimb.2007.09.035

Shockley W., 1954. Semiconductor translating device. US2666814A patent.

Shockley W., 1957. Forming of semiconductor devices by ionic bombardment. US2787564A patent.

Shypylenko, A., Pshyk, A.V., Grześkowiak, B., Medjanik, K., Peplinska, B., Oyoshi, K., Pogrebnjak, A., Jurga, S., Coy E., 2016. Effect of ion implantation on the physical and mechanical properties of Ti-Si-N multifunctional coatings for biomedical applications. Materials & Design 110, 821-829. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.08.050

Tippawan, U., Chulapakorn, T., Bootkul, D. Pangkason, C., Intarasiri, S., 2016. onmodification of implanted corundumby UV-Vis-NIR Investigation ion natural Surface and Coatings Technology 306. 358-363. spectroscopy. DOI: 10.1016/i.surfcoat.2016.08.028

Urkac, E.S., Oztarhan, A., Tihminlioglu, F., Kaya, N., Ila, D., Muntele, C., Budak, S., Oks, E., Nikolaev, A., Ezdesir, A., Tek Z., 2007. Thermal characterization of Ag and Ag + N ion implanted ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE). Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 261, 699-703. DOI: 10.1016/j.nimb.2007.04.102

Vilaithong, T., Yu, L.D., Apavatjrut, P., Phanchaisri, B., Sangyuenyongpipat, S., Anuntalabhochai, S., Brown I.G., 2004. Heavy ion induced DNA transfer in biological cells. Radiation Physics and Chemistry 71, 927-935. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2004.04.136

Werner, Z., Barlak, M., Ratajczak, R., Konarski, P., Markov, A.M., Heller, R., 2016. Electron-beam pulse annealed Ti-implanted GaP. Journal of Applied Physics 120, 085103. DOI: 10.1063/1.4961518

Wilkowski, J., Barlak, M., Böttger, R., Werner, Z., 2019. Wpływ separacji jonów azotu w procesie implantacji warstwy wierzchniej ostrzy WC-Co na ich trwałość podczas frezowania płyty wiórowej. Biuletyn Informacyjny OB-RPPD 3-4, 135-147. DOI: 10.32086/biuletyn.2019.6

Wilkowski, J., Barlak, M., 2021. Wpływ chropowatości powierzchni narzędzi WC-Co do obróbki materiałów drzewnych na modelowane parametry głębokościowych profili implantowanego azotu. Biuletyn Informacyjny OB-RPPD 3-4, 157-169. DOI: 10.32086/biuletyn.2021.08

Wu, Y., Zhang, Y., Yu, W., Song, M., Yu, Z.L., 2005. The progress of the research and application of ion implantation biotechnology in China. Solid State Phenomena 107, 37-42. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.107.37

Xu, G., Wang, X., Gan, C., Fang, Y., Zhang, M., 2012a. Biological effects of low energy nitrogen ion implantation on *Jatropha curcas* L. seed germination. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 287, 76-84. DOI: 10.1016/j.nimb.2012.05.038

Xu, J., Ding, G., Li, J., Yang, S., Fang, B., Sun, H., Zhou Y., 2010. Zinc-ion implanted and deposited titanium surfaces reduce adhesion of *Streptococccus mutans*. Applied Surface Science 256, 7540-7544. DOI: 10.1016/j.apsusc.2010.06.002

Xu, L., Yang, P.L., Han, Y.G., Zhang T., Ren S.M., 2009. The biological effects of low energy C⁺ ion implantation on peanu. Proceedings of the 2009 International Conference on Engineering Computation 265-268. DOI: 10.1109/ICEC.2009.72

Xu, X., Liu, B., Zhang, L., Wub, Y., 2012b. Mutagenic effects of heavy ion irradiation on rice seeds. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 290, 19-25. DOI: 10.1016/j.nimb.2012.08.028

Yu, L.D., Wongkham, W., Prakrajang, K., Sangwijit, K., Inthanon, K., Thongkumkoonb, P., Wanichapichart, P., Anuntalabhochai S., 2013. Nano-ranged low-energy ion-beaminduced DNA transfer in biological cells. Applied Surface Science 275, 136-141. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.01.066

Yu, Z., 2007. Study on the interaction of low-energy ions with organisms. Surface and Coatings Technology 201, 8006-8013. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.09.316

Zhao S.P., Huang Q., Liang Q., Zhang S., Jiao Z., Huang W.Z., 2013. Biological effects of low energy N⁺ beams implantation on calluses of autotetraploid rice. Journal of Integrative Agriculture 12, 2045-2055. DOI: 10.1016/S2095-3119(13)60331-7

Źródła internetowe

- Doolittle, A., Lecture 3 Diffusion Reading: Chapter 3. https://alan.ece.gatech.edu > ECE6450 > Lectures (dostęp 20.05.2022)
- Doolittle, A., Lecture 5 Ion Implantation Reading: Chapter 5. https://alan.ece.gatech.edu > ECE6450 > Lectures (dostęp 20.05.2022)
- Ermel, V., Frey, H., Kurrat, M., Lehmann, K.H., Mayr, M., Thomas H., 2006. Conductivity of ion implanted textile. https://www.academia.edu/29232413/Conductivity_of_lon_ Implanted_Textile (dostęp 20.05.2022)
- John Macdougall. Ion implantation. https://www.invent.org/inductees/john-macdougall (dostęp 20.05.2022)
- Palmer, R.B., SEMI oral history interview. https://www.semi.org/ko/Oral-History-Interview-Robert-Palmer (dostęp 20.05.2022)
- What is ion implantation? https://blog.bodycote.com/2017/08/02/what-is-ion-implantation/ (dostęp 20.05.2022)
- Madhusha, Difference between ion implantation and diffusion. https://pediaa.com/differencebetween-ion-implantation-and-diffusion/ (dostęp 20.05.2022)
- Shirwaiker R., 2015. Silver shines as antibacterial for medical implants. https://phys.org/news/2015-03-silver-antibacterial-medical-implants.html (dostęp 20.05.2022)

SRIM. Interactions of ions with matter, http://www.srim.org/ (dostęp 20.05.2022) SRIM. http://www.srim.org/ (dostęp 20.05.2022)

Artykuł recenzowany / Reviewed paper Zgłoszony / Submitted: 28.06.2022 Opublikowany online / Published online: 30.06.2022