

Modyfikacja właściwości folii PET przy wykorzystaniu naświetlania jonami K⁺

Streszczenie. Cienkie (3 μm) folie PET implantowano jonami K⁺ (150 keV, dawki 10^{14} cm^{-2} do 10^{16} cm^{-2}). Zaobserwowano niszczenie różnego rodzaju wiązań chemicznych i powstanie struktur grafitopodobnych a także wzrost absorpcji modyfikowanych próbek w widmie UV-VIS oraz zwężenie przerwy energetycznej z około 4 eV aż do 0.55 eV (10^{16} cm^{-2}). Implantacja spowodowała spadek oporności powierzchniowej warstwy zmodyfikowanej o około 6 rzędów wielkości oraz wzrost stałej dielektrycznej folii: od kilku procent dla dawki 10^{14} cm^{-2} do ~65 % dla dawki 10^{16} cm^{-2} .

Abstract. Thin (3 μm) PET foils were implanted with K⁺ ions (150 keV, fluences from 10^{14} cm^{-2} to 10^{16} cm^{-2}). Destruction of various chemical bonds and formation of graphite-like structures as well as the increase of absorbance in UV-VIS spectra and narrowing of the energy bandgap from ~4 eV to 0.55 eV (10^{16} cm^{-2}) were observed. Ion implantation leads to the reduction of sheet resistance by 6 orders of magnitude as well as to the increase of dielectric constant of the sample by several percent (10^{14} cm^{-2}) up to 65 % for the maximal fluence. (Modification of PET polymer foils by K⁺ ion irradiation).

Słowa kluczowe: implantacja jonowa, modyfikacja polimerów, FTIR, spektroskopia ramanowska.

Keywords: ion implantation, polymer modification, FTIR, Raman spectroscopy.

Wstęp

Polimery od lat są materiałami cenionymi w rozmaitych gałęziach przemysłu z racji ich takich właściwości jak niski koszt produkcji, wysoka wytrzymałość połączona z niewielką gęstością, plastyczność. Materiały te zazwyczaj są dobrymi izolatorami, co utrudnia ich zastosowanie w mikroelektronice, ponadto ich własności elektryczne bywają niekiedy nieprzewidywalne [1]. Kolejne ograniczenia tych materiałów wynikają z ich niskiej odporności na niekorzystne czynniki środowiskowe (jak promieniowanie UV czy substancje żrące), bądź niewielkiej wytrzymałości na zużycie mechaniczne. Jedną z metod modyfikacji własności fizycznych i chemicznych polimerów, skutecznie stosowaną od lat m.in. wobec metali i półprzewodników, jest implantacja jonowa. Przede wszystkim pozwala ona w znacznym stopniu zwiększyć ich przewodnictwo, a niekiedy przekształcić je w półprzewodniki [2]. Dzięki naświetlaniu strumieniem jonów osiąga się istotną poprawę własności powierzchniowych takich jak zwilżalność czy twardość [3-5]. Należy też wspomnieć, że implantacja jonowa jest efektywną metodą poprawiania biokompatybilności tworzyw sztucznych [6-8].

Przyjmuje się, że charakter modyfikacji wprowadzanych do polimeru przez strumień rozpędzonych jonów w trakcie implantacji silnie zależy od dominującego mechanizmu hamowania. W trakcie zderzeń elastycznych charakterystycznych dla hamowania jądrowego (dla stosunkowo niewielkich energii pocisku) dochodzi do zrywania wiązań między atomami i pękania łańcucha polimerowego, co skutkuje degradacją polimeru objawiającą się np. złuszczeniem, czy sproszkowaniem jego zewnętrznej warstwy. W trakcie hamowania elektronowego nachodzi do intensywnego wzbudzenia wyżej leżących poziomów energetycznych, jonizacji i formowania rodników. Proces ten skutkuje intensywnym sieciowaniem zewnętrznej warstwy polimeru, której twardość znacznie wzrasta, możliwe jest także jej kurczenie się, co skutkuje np. pojawieniem się pęknięć [9]. Oba procesy prowadzą do intensywnego odgazowania zmodyfikowanej warstwy tworzywa, przy czym niektórzy autorzy [1] przypisują dominującą rolę w uwalnianiu gazów hamowaniu elektronowemu, inni zaś przeciwnie, elektronowemu [10].

W literaturze można znaleźć szereg doniesień dotyczących modyfikacji własności szerokiego wachlarza polimerów poprzez implantacje jonową: polietylenu (PE) [11,12], poliwęglanu (PC) [13,14] polietereketonu (PEEK) [15], polimetakrylanu metylowego (PMMA) [16,17], różnego typu elastomerów [9,18,19] i oczywiście politereftalanu etylenu (PET).

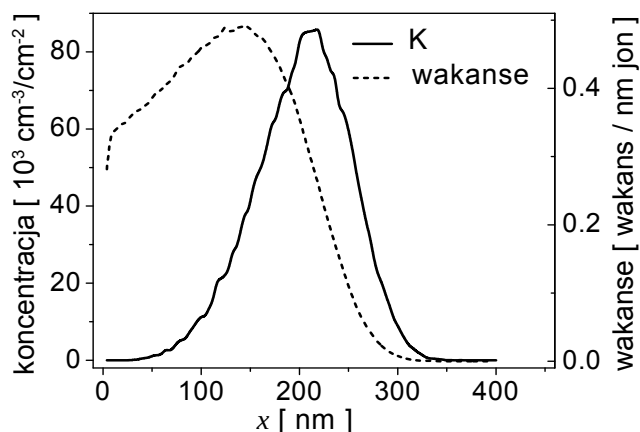
Możliwość modyfikacji właściwości PET, polimeru znanego jako Lawsan bądź Dacron, implantowanego wiązkami jonów gazów szlachetnych [20-24] bądź metali [25-27] od lat przyciągały uwagę licznych grup badawczych. Najpowszechniej obserwowanym efektem jest drastyczne zmniejszenie oporności naświetlonego polimeru poczynając od poziomu charakterystycznego dla materiałów nieprzewodzących ($\sim 10^{16} \Omega \text{ cm}$) w przypadku polimeru niemodyfikowanego o kilka rzędów wielkości w przypadku implantacji o bardzo wysokich dawkach, nawet rzędu 10^{17} jonów/ cm^2 . Spadek oporności jest bezpośrednim skutkiem powstawania klasterów węglowych tworzących sieć perkolacyjną a ostatecznie przewodzącej warstwy zwęglonej na powierzchni tworzywa. Z efektem tym wiąże się także widoczne gołym okiem poczernienie polimeru, zwiększenie absorpcji w zakresie UV-VIS oraz zwężenie się przerwy energetycznej, spowodowane obecnością stanów energetycznych pochodzących od skupisk atomów węgla. Efekty te były obserwowane przez zespół autorów tej publikacji w próbkach naświetlanych jonami gazów szlachetnych o różnych masach [28] oraz jonami lekkiego pierwiastka metalicznego, sodu [29]. Znaczne, rzędu 30 % (a więc odpowiadające znacznej modyfikacji warstwy o grubości ~ 1 mikrometra) zmniejszenie wysokości wierzchołków w widmach FTIR potwierdziło wyniki pomiarów SIMS-TOF [30] sugerujące, że rzeczywiste zasięgi implantacji Na⁺ w PET znacznie przekraczające zasięgi implantacji przewidywane przez program SRIM.

Celem badań było sprawdzenie, jak zmiana masy pocisku, a co za tym idzie wzrost udziału hamowania jądrowego wpłynie na modyfikację bombardowanego polimeru. Ponadto warte sprawdzenia wydaje się czy oporność nieimplantowanej strony próbki ulegnie radykalnej zmianie także w przypadku mniejszego zasięgu wnikania jonów K⁺. Artykuł zawiera opis zmian w strukturze chemicznej naświetlonego polimeru bazujący na pomiarach z wykorzystaniem spektroskopii ramanowskiej i FTIR.

Spektroskopia optyczna w zakresie widzialnym i UV pozwoliła także prześledzić zmiany w przezroczystości próbek poddanych naświetlaniu i wyznaczyć zmiany w szerokości przerwy energetycznej wywołane powstaniem klasterów węglowych w zmodyfikowanej warstwie polimeru. Artykuł zawiera także wyniki pomiarów zmian oporności próbki oraz jej stałej dielektrycznej.

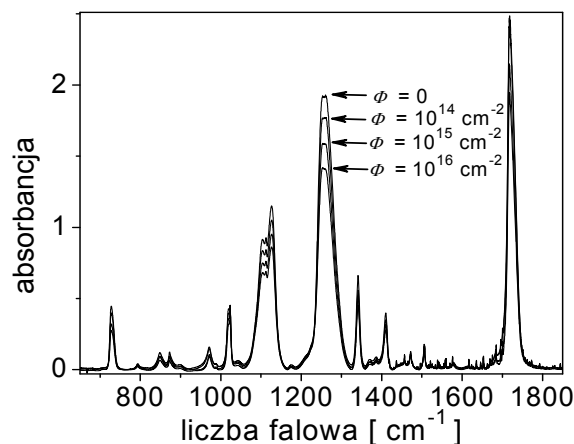
Opis eksperymentu

Bardzo cienkie folie PET zakupione w firmie Goodfellow (grubość 3 μm , gęstość około 1.4 g/cm³) zostały naświetlone wiązką jonów K⁺ o energii 150 keV. Intensywne wiązki jonów uzyskano z wykorzystaniem plazmowego źródła jonów z wewnętrznym parownikiem [31-33]. Substancją roboczą był chlorek potasu KCl. Naświetlania wykonano w temperaturze pokojowej z dawkami 10^{14} cm⁻², 10^{15} cm⁻² oraz 10^{16} cm⁻². Gęstość prądu jonowego bombardującego tarczę utrzymywano poniżej 0.5 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Folia PET umieszczona została umieszczona w uchwycie w postaci dwu pierścieni o wewnętrznej średnicy ok. 30 mm, tak by ułatwić wszelkie manipulacje i zapobiec nadmiernemu marszczeniu się tworzywa w trakcie implantacji.



Rys. 1. Rozkłady głębokościowe zaimplantowanych atomów potasu i wytworzonych wakansów obliczone przy pomocy programu SRIM.

Rozkłady głębokościowe wprowadzonej domieszki oraz wytworzonych wakansów obliczone zostały z wykorzystaniem programu SRIM [34]. Rozkłady te zaprezentowano na Rysunku 1. Średni zasięg jonów K⁺ wynosił w rozpatrywanym przypadku 200 nm przy średnim odchyleniu rzędu 50 nm. Maksimum symulowanego szerokiego rozkładu wytworzonych domieszek znajdowało się na głębokości około 140 nm.



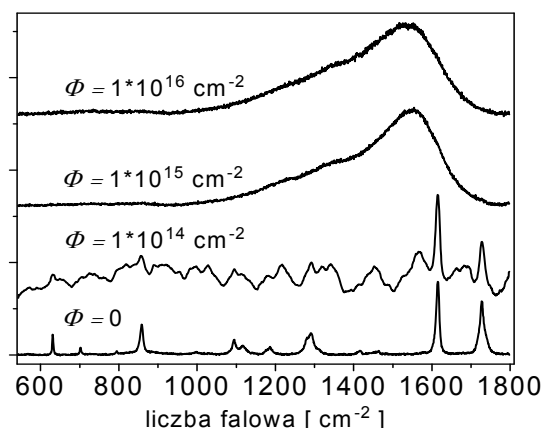
Rys. 2. Widma FTIR uzyskane dla próbek PET zaimplantowanych różnymi dawkami jonów K⁺.

Niemniej jednak, mając na uwagę niedawno opublikowane wyniki pomiarów rozkładów głębokościowych dla Na zaimplantowanego do PET można się spodziewać, że podobne rozbieżności, to jest znaczne niedoszacowanie zasięgu jonów przez SRIM ma miejsce dla jonów K⁺. Należy w tym miejscu wspomnieć, że wyniki pomiarów własności optycznych próbek PET implantowanych Na [29] sugerują, że rzeczywista grubość zmodyfikowanej warstwy polimeru jest co najmniej dwukrotnie grubsza niż zasięg przewidywany w symulacjach.

Widma absorpcyjne próbek w zakresie promieniowania widzialnego i bliskiego ultrafioletu zostały zmierzone przy pomocy spektrometru Cary 50 (produkcji firmy Agilent). Pomiary FTIR (Fourierowskiej spektrometrii w podczerwieni) wykonano przy pomocy spektrometru Nicolet iS50R (produkcji firmy ThermoScientific). Widma ramanowskie uzyskano używając zestawu inVia firmy Renishaw. Wykorzystano wzbudzenie laserem o długości fali 514 nm. Oporności próbki, zarówno powierzchniową jak objętościową wyznaczono przy użyciu źródła mierzącego Agilent B2911A i zestawu szlifowanych elektrod koncentrycznych. Ten sam zestaw elektrod został też zastosowany do pomiarów impedancyjnych z użyciem analizatora impedancji Hioki IM3570.

Dyskusja wyników

Jak to już było wcześniej wspomniane, bombardowanie jonowe wywołuje szereg zmian w strukturze chemicznej polimerów. W przypadku bombardowania stosunkowo ciężkim pociskami jakimi są jony K⁺, dominującym mechanizmem jest hamowanie jądrowe - dla energii 150 keV stosunek zdolności hamowania elektronowego i jądrowego S_e/S_n wynosi 0.97 (według programu SRIM). Można się zatem spodziewać silnej degradacji struktury cząsteczkowej polimeru w zmodyfikowanej warstwie. Oznaki tego procesu można rozpoznać na widmach FTIR prezentowanych na rysunku 2. Najdobitniej zrywanie wiązań widoczne jest w przypadku złożonych modów zginających grupy -CH oraz rozciągających wiązania O-C (~1100-1130 cm⁻¹) oraz pierścienia i O-C (~1250 cm⁻¹). W przypadku tych wierzchołków ich wysokość maleje nawet o 25% (dla najsilniej modyfikowanych próbek), co może świadczyć o praktycznie całkowitym zniszczeniu tego typu wiązań w zaimplantowanej warstwie. Najsilniejszy sygnał pochodzi od modów rozciągających wiązania podwójnego O=C (~1720 cm⁻¹) jednakże zmiany wywołane naświetlaniem nie są aż tak silne jak w przypadku bombardowania jonami Na⁺. Zauważalna jest zmiana wysokości wierzchołków 1410 cm⁻¹, 727 cm⁻¹, 1018 cm⁻¹ odpowiadających rozciąganiu i zginaniu wiązania C-C w pierścieniu, oraz różnym modom zginającym grupy C-H.

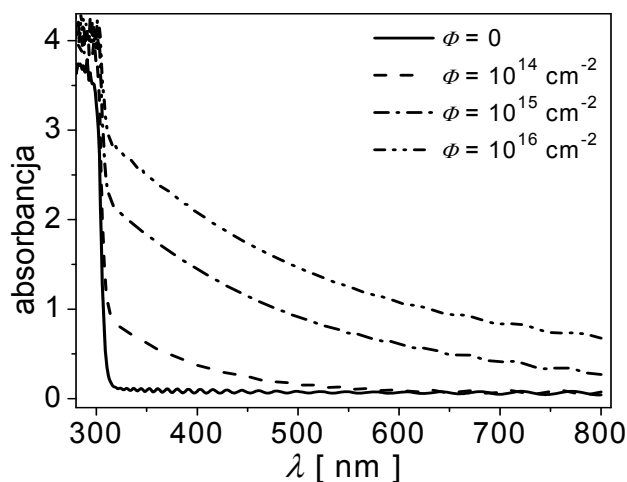


Rys. 3. Widma ramanowskie zmierzone dla próbek PET naświetlanych różnymi dawkami jonów K⁺.

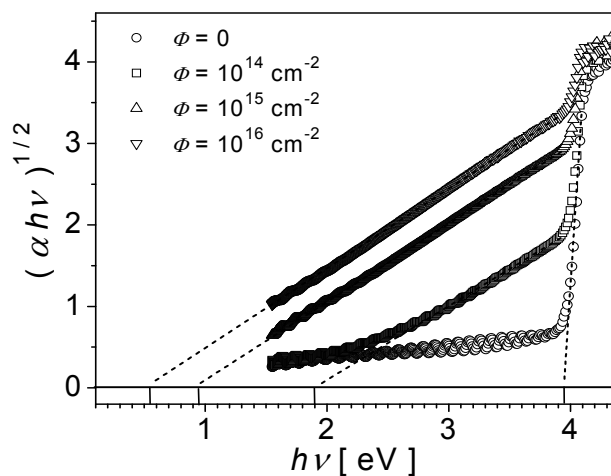
Podobne zachowanie widać dla modu wachlarzowego grupy CH_2 (1340 cm^{-1}). Zmiany te zazwyczaj sugerują zazwyczaj [35] nie tylko zniszczenie dotychczasowych wiązań, lecz także możliwość pojawienia się nowych podstawników.

Zmiany w mikrostrukturze bombardowanego polimeru są jeszcze dobitniej widzialne na widmach ramanowskich (rys. 3.). Nawet najmniejsza rozpatrywana dawka naświetlenia powoduje praktyczne zniknięcie z widma charakterystycznych dla niemodyfikowanej próbki wierzchołków [36] takich jak 632 cm^{-1} (zginanie C-C-C w płaszczyźnie pierścienia aromatycznego), 857 cm^{-1} (mod „oddychający” pierścienia), 1097 cm^{-1} oraz 1118 cm^{-1} (rozciąganie wiązania C-O i zginanie grupy -CH), 1286 cm^{-1} (mod złożony: rozciąganie pierścienia i wiązania O-C). Jedynymi drganiami, których wyraźne sygnatury są widoczne w widmie ramanowskim próbki implantowanej z dawką 10^{14} cm^{-2} są: rozciąganie wiązania C=C w pierścieniu (1613 cm^{-1}) oraz wiązania C=O (1727 cm^{-1}). Tak jak w przypadku implantacji jonami Na^+ [29] zmniejszenie intensywności wierzchołków jest o wiele bardziej zauważalne niż w przypadku implantacji jonami gazów szlachetnych [28], między innymi z tego powodu, że warstwa zmodyfikowana w przypadku bombardowania cięższymi pociskami leży bliżej powierzchni próbki. Dalsze zwiększanie dawki implantacji (powyżej 10^{15} cm^{-2}) skutkuje całkowitym wyeliminowaniem wierzchołków charakterystycznych dla PET. Pojawiają się natomiast szerokie pasma - dominujące w pobliżu 1600 cm^{-1} i wyraźnie słabsze, w pobliżu 1350 cm^{-1} widoczne przede wszystkim jako asymetryczne poszerzenie poprzedniego pasma. Omawiane pasma, noszące oznaczenia G i D są charakterystyczne dla struktur grafitopodobnych, utworzonych z atomów węgla o hybrydyzacji sp^2 . Powstawanie struktur grafitopodobnych w matrycy opartej o atomy o hybrydyzacji sp^3 jest charakterystyczne dla implantowanych polimerów [21-24]. Jest ono konsekwencją zarówno zrywania wiązań i pękania łańcuchów polimeru na skutek zderzeń elastycznych w procesie hamowania jądrowego jak i silnych wzbudzeń prowadzących do wytwarzania rodników i rozrywania najsłabszych wiązań w cząsteczkach w skutek hamowania elektronowego. Oba wspomniane mechanizmy skutkują intensywną emisją gazów, oraz postępującym wzrostem udziału struktur zbudowanych z atomów węgla. Struktury te złożone są zazwyczaj z łańcuchów i pierścieni, zaś pasmo D jest oznaką modów „oddychających” wspomnianych pierścieni, podczas gdy pasmo G wynika z drgań rozciągających zarówno pierścieni jak i łańcuchów zbudowanych z atomów węgla w konfiguracji sp^2 . Warto zauważyć, że wraz ze wzrostem dozy implantacji maksimum pasma G odsuwa się od jego położenia dla czystego grafitu (1582 cm^{-1}) w stronę niższych wartości liczby falowej. Świadczy to o rosnącym wraz z dawką implantacji udziale łańcuchów węglowych w grafitopodobnej mieszaninie pierścieni i łańcuchów. Udział wytworzonych łańcuchów jest wyższy niż w przypadku PET bombardowanego jonami Na^+ [29].

Implantacja jonowa PET (i innych przeźroczystych polimerów) powoduje widoczne zazwyczaj widoczne gołym okiem zaczernienie, którego stopień rośnie wraz z dawką, a więc i wytworzonym w próbce nieporządkiem i jej zwęglaniem. Efekt ten można ilościowo opisać m.in. pomocy pomiarów absorpcji promieniowania widzialnego i UV w zakresie 280-800 nm. Nienaświetlana próbka jest niemal doskonale przeźroczysta dla promieniowania o długości fali powyżej 310 nm. Pojawienie się przewodzących struktur zbudowanych z atomów węgla o hybrydyzacji sp^2 owocuje zwiększeniem się pochłaniania promieniowania, a także przesunięciem krawędzi absorpcji



Rys. 4. Widmo absorpcyjne UV-VIS dla próbek PET naświetlanych różnymi dawkami jonów K^+ .



Rys. 5. Wykresy Tauc'a otrzymane na podstawie danych z rys. 4.

w kierunku niższej energii promieniowania, tak jak było to obserwowane w przypadku implantacji jonami Na^+ i gazów szlachetnych [28,29]. Zmniejszanie się przerwy energetycznej na skutek wytworzenia struktur grafitopodobnych w polimerze, a zatem i dodatkowych poziomów energetycznych w paśmie zabronionym obserwowane było i dla innych kombinacji pocisk-polimer [16,37].

Szerokość przerwy energetycznej E_0 można oszacować metodą Tauc'a. W przypadku przejścia skośnego (dozwolonego) zachodzi następująca przybliżona relacja między współczynnikiem absorpcji α a energią promieniowania $h\nu$:

$$(1) \quad \alpha h\nu \sim (h\nu - E_0)^2$$

Jeśli zatem sporządzi się wykres $(\alpha h\nu)^{1/2}$ w funkcji energii promieniowania, to przecięcie przedłużenia liniowej części wykresu z osią $h\nu$ pozwala wyznaczyć szerokość przerwy energetycznej. Otrzymane w ten sposób wartości E_0 zaprezentowane zostały w Tabeli 1. Jak to już było wcześniej wspomniane pojawienie się klastrów węglowych, struktur złożonych z pierścieni i łańcuchów tworzących rozległe niekiedy sieci powoduje zmniejszenie się przerwy energetycznej wraz z dawką implantacji. Dla $\phi = 10^{16}\text{ cm}^{-2}$ przerwa energetyczna wynosi zaledwie 0.55 eV (w porównaniu do 3.96 eV dla polimeru niemodyfikowanego). Należy w tym miejscu zauważyć, że modyfikacja przerwy energetycznej w polimerze bombardowanym jonami K^+ jest nieco silniejsza niż w

Tabela 1. Szerokość przerwy energetycznej E_o w modyfikowanym PET i średnia liczba atomów węgla w klastrze N jako funkcje dawki implantacji Φ .

Φ [cm ⁻²]	E_o [eV]	N
0	3.96	-
$1 \cdot 10^{14}$	1.90	326
$1 \cdot 10^{15}$	0.95	1304
$1 \cdot 10^{16}$	0.55	3890

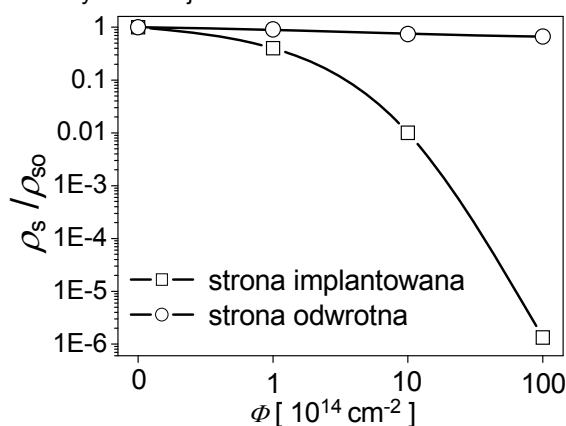
poprzednio rozpatrywanym przypadku naświetlania jonami Na⁺.

Jak to już było wcześniej wspomniane, zmiana własności optycznych naświetlonego polimeru, a przede wszystkim wzrost absorpcji i zwężenie przerwy energetycznej wynika z pojawienia się klastrów atomów węgla związanych wiązaniami π . W literaturze można znaleźć różne przybliżone wzory pozwalające oszacować rozmiary klastrów zbudowanych z atomów węgla na podstawie szerokości optycznej przerwy energetycznej [38-40]. Używając wzoru:

$$(2) \quad N = \left(\frac{34.3}{E_o [\text{eV}]} \right)^2,$$

pochodzącego z [40] obliczono średnią liczbę atomów C w klastrze (Tabela 1). Zaprezentowane w niej dane potwierdzają, że rozmiary klastrów rosną z dawkami implantacji. Przy dawkach rzędu 10^{15} cm⁻² i większych, przekrywające się klastry, liczące nawet kilka tysięcy atomów, tworzą rozległe sieci o dobrym przewodnictwie w warstwie bliskiej powierzchni, co diametralnie zmienia własności elektryczne implantowanych próbek [21,22,28].

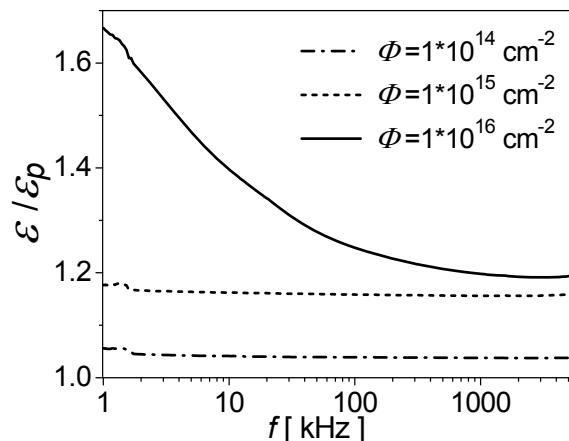
Rysunek 6. przedstawia wyniki pomiarów względnej (w odniesieniu do folii niemodyfikowanej) oporności powierzchniowej próbek PET. Najmniej intensywna implantacja zmniejsza oporność próbek stosunkowo nieznacznie (czynnik 2), jednakże naświetlenie dawką 10^{16} jonów/cm² powoduje spadek oporności powierzchniowej o 6 rzędów wielkości, przede wszystkim ze względu na wspomnianą wcześniej obecność rozległych przewodzących struktur grafitowych. Pewna rola może być także odgrywana przez wspomniane w literaturze wytrącenia metaliczne [2]. Oporność powierzchniowa mierzona była także na nieimplantowanej stronie cienkiej folii, jednakże w odróżnieniu od przypadków implantacji jonami Na⁺ nie zaobserwowano istotnych zmian tej wielkości – zmalała ona o ok. 50 % w stosunku do folii niemodyfikowanej.



Rys. 6. Zależność oporności powierzchniowej po stronie naświetlanej i nienaświetlanej folii PET w funkcji dawki implantacji.

Brak istotnych zmian o stronie nieimplantowanej, związanych najprawdopodobniej ze słabszą stabilnością

termiczną cienkiej folii nagrzewającej się w trakcie implantacji wynika ze znacznie krótszego zasięgu efektywnego jonów K⁺ w PET w porównaniu z jonami Na⁺ czy jonami lekkich gazów szlachetnych.



Rys. 7. Względna stała dielektryczna w funkcji częstotliwości dla folii naświetlanych różnymi dawkami jonów K⁺.

Mierzono także zmiany części rzeczywistej stałej dielektrycznej folii wywołane implantacją jonową. Względne zmiany tej stałej otrzymano jako stosunek pojemności kondensatora wypełnionego folią implantowaną i folią niemodyfikowaną. Rysunek 7. przedstawia wyniki pomiarów dla częstotliwości do 5 MHz. Można zaobserwować stały dla całego zakresu częstotliwości wzrost względnej stałej dielektrycznej na poziomie kilku (dawka 10^{14} cm⁻²) bądź kilkunastu procent (dawka 10^{15} cm⁻²). Dla najwyższej dawki implantacji można zaobserwować pewną dyspersję – względna stała dielektryczna sięga 1.65 dla niskich częstotliwości a wraz ze wzrostem f jej wartość spada osiągając stałą wartość ~ 1.2 dla częstotliwości powyżej 1 MHz. Uzyskane zmiany stałej dielektrycznej są znacznie mniejsze niż w przypadku bombardowania jonami gazów szlachetnych gdzie sięgały kilkuset czy nawet tysiąca procent, a nawet jonami sodu (do 100 procent) – jednakże jeśli chodzi o charakter obserwowanych zmian, wyniki te są do siebie zbliżone.

Podsumowanie

W artykule omówiono modyfikacje własności strukturalnych, optycznych i elektrycznych cienkich folii PET poddanych bombardowaniu jonami K⁺ o energii 150 keV o dawkach od 10^{14} cm⁻² do 10^{16} cm⁻². Analiza widma FTIR wykazała, że implantacja jonowa doprowadziła do zerwania różnych wiązań w cząsteczkach polimeru, co spowodowało m.in. niszczenie struktury jego łańcuchów i intensywną emisję gazów (wodoru i tlenu). Intensywność tego procesu powiązana była z dawką implantacji. Odgazowanie zewnętrznej warstwy folii miało daleko idące konsekwencje dla jej struktury. Widma uzyskane dzięki spektroskopii ramanowskiej pozwalają stwierdzić, że w przypadku próbek naświetlanych z dawkami powyżej 10^{15} cm⁻² ich wierzchnia warstwa zawiera liczne i rozległe struktury grafitopodobne, zbudowane z atomów węgla o hybrydyzacji sp^2 . Obecność szerokich pasm D i G świadczy o amorficznej budowie klastrów węglowych. Zwiększanie się rozmiarów przewodzących klastrów węglowych (ich rozmiar może sięgać nawet kilku tysięcy atomów) i pojawianie się stanów energetycznych w obrębie przerwy energetycznej skutkuje jej zwężaniem się wraz z rosnącą dawką implantacji – od ~ 4 eV dla PET niemodyfikowanego aż do 0.55 eV w przypadku folii poddanych najintensywniejszej modyfikacji. Obecność struktur

węglowych zmienia nie tylko kolor i widmo absorpcyjne UV-VIS modyfikowanych próbek, ale silnie wpływa na własności elektryczne bombardowanych folii. Oporność powierzchniowa bombardowanych folii maleje nawet o 6 rzędów wielkości na stronie implantowanej. Zasięg jonów w próbce jest na tyle mały, że zmiana oporności powierzchniowej po stronie nieimplantowanej spowodowana przez zmiany struktury chemicznej polimeru ogrzewanego przez implantację jest rzędu 50 %, znacznie mniej niż miało to miejsce w przypadku naświetleń lżejszymi jonami Na^+ . Mierzono także zmiany względnej stałej dielektrycznej dla częstotliwości do 5 MHz. Obserwowane zmiany były znacznie mniejsze niż w przypadku próbek PET naświetlanych jonami gazów szlachetnych. – co ma związek z mniejszą grubością warstwy polimeru zmodyfikowanego bezpośrednio przez hamujące jony. Wzrost stałej dielektrycznej sięgał kilku bądź kilkunastu procent, w zależności od dawki naświetlania, jedynie w przypadku najsilniej modyfikowanych próbek i niskich częstotliwości (~1 kHz) sięgał 65 %.

Badania dofinansowane przez Pełnomocnego Przedstawiciela Rządu RP w ZIBJ w Dubnej ramach Projektu № 75/07/2020

Autorzy: dr hab. Marcin Turek, Instytut Fizyki, Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej, pl. M. Marii Curie-Skłodowskiej 1, 20-031 Lublin, E-mail: mturek@kft.umcs.lublin.pl; dr Andrzej Drożdźiel, Instytut Fizyki, Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej, pl. M. Marii Curie-Skłodowskiej 1, 20-031 Lublin, E-mail: adrozdowa@o2.pl; dr Krzysztof Pyszniak, Instytut Fizyki, Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej, pl. M. Marii Curie-Skłodowskiej 1, 20-031 Lublin E-mail: kpysz1@o2.pl; dr hab. Wojciech Grudziński, Instytut Fizyki, Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej, pl. M. Marii Curie-Skłodowskiej 1, 20-031 Lublin, E-mail: wojciech.grudziński@umcs.pl; dr Anna Klimek-Turek, Zakład Chemii Fizycznej, Katedra Chemii, Wydział Farmaceutyczny, Uniwersytet Medyczny w Lublinie ul. Chodźki 4a, 20-093 Lublin.

LITERATURA

- [1] Kowalski J., Jak pisać tekst do Przeglądu, *Przegląd Elektrotechniczny*, 78 (2002), nr.5, 125-128
- [2] Johnson B., Pike G.E., Preparation of Papers for Transactions, *IEEE Trans. Magn.*, 50 (2002), n.5, 133-137
- [1] Wu Y., Zhang T., Liu A., Zhang X., Zhou G., *Science in China E* 46 (2003), 125
- [2] Popok V., *Rev. Adv. Mater. Sci.* 30 (2012), 1
- [3] Shekhawat N., Aggarwal S., Sharma A., Nair K. G. M., *Journal of Macromolecular Science B* 55 (2016), 652
- [4] Sant'Ana P. L., Bortoleto J. R. R., da Cruz N. C., Rangel E. C., Durrant S. F., *Rev. Bras. Apl. Vac.* 36 (2017), 68
- [5] Kim Y., Lee Y., Han S., Kim K.-J., *Surface and Coatings Technology*, 200 (2006), 4763
- [6] Nedela O., Slepicka P. and Svorčík V., *Materials* 10(2017) , 1115
- [7] Jagielski, J., *Surface and Coatings Technology* 200 (2005), 6355
- [8] E. Sokullu, *Curr Trends Biomedical Eng & Biosci.* 1 (2017), 555
- [9] Jagielski J., Ostaszewska U., Bielinski D., Piatkowska A., Romaniec M., *Acta Phys. Pol. A* 123 (2013), 888
- [10] Mikšová R., Macková A., Pupikova H., Malinský P., Slepicka P., Svorčík V., *Nucl. Instr. Meth. B* 406 (2017), 199
- [11] Nenadović M., Potocnik J., Ristić M., Strbac S., Rakocević Z., *Surface and Coatings Technology* 20 6(2012), 4242
- [12] Bieliński D. M., Ślusarczyk C., Jagielski J., Lipiński P. *Polimery* 52 (2007), 329
- [13] Resta V., Calcagnile L., Quarta G., Maruccio L., Cola A., Farella I., Giancane G., Valli L., *Nucl. Instr. Meth. B* 312 (2013), 42
- [14] Resta V., Quarta G., Maruccio L., Calcagnile L., *Nuclear Instr. Meth B.* 331 (2014), 187
- [15] Wakelin E. A., Fathi A., Kracica M., Yeo G. C., Wise S. G., Weiss A. S., McCulloch D. G., Dehghani F., Mckenzie D. R., Bilek M. M., *ACS Appl Mater Interfaces*, 7 (2015), 23029
- [16] Arif S., Rafique M. S., Saleemi F., Sagheer R., Naab F., Toader O., Mahmood A., Rashid R., Mahmood M., *Nucl. Instr. Meth. B* 358 (2015), 236
- [17] Kavetsky T., Iida K., Nagashima Y., Kuczumow A., Šauša O., Nuzhdin V., Valeev V. and Stepanov A. L., *J. Phys.: Conf. Ser.* 791 (2017), 012028
- [18] Rosset S., Niklaus M., Dubois P. and Shea H R., *Adv. Funct. Mater.* 19 (2009), 470
- [19] Jagielski J., Grambole D., Jozwik I., Bielinski D. M., Ostaszewska U., Pieczynska D. *Materials Chemistry and Physics* 127 (2011) 342
- [20] Djebara M., Stoquert J.P., Abdesselam M., Muller D., Chami A.C., *Nucl. Instr. Meth. B* 274 (2012), 70
- [21] Goyal P. K., Kumar V., Gupta R., Mahendia S., Kumar A. and S., *Advances in Applied Science Research*, 2 (2011) , 77
- [22] Kumar R., Goyal M., Sharma A., Aggarwal S., Sharma A. and Kanjilal D., *AIP Conf. Proc.* 1661 (2015, 110010-1),
- [23] Chawla M., Rubi R., Kumar R., Sharma A., Aggarwal S., Kumar P., Kanjilal D., *Advanced Materials Research* 665 (2013), 221
- [24] Tóth A., Veres M., Kereszturi K., Mohai M., Bertóti I., Szépvölgyi J., *Applied Surface Science* 257 (2011, 10815)
- [25] Lukashovich M. G., Popok V. N., Volobuev V. S., Melnikov A. A., Khaibullin R. I., Bazarov V. V., Wieck A. and Odzhaev V. B. *The Open Applied Physics Journal* 2 (2009), 1
- [26] Bumai Yu. A., Volobuev V. S., Valeev F., Dolgikh N. I., Lukashovich M. G., Khaibullin R. I., Nuzhdin V. I., Odzhaev, V. B., *Journal of Applied Spectroscopy* 79 (2012), 773
- [27] Malinsky P., Mackova A., Hnatowicz V., Khaibullin R.I., Valeev V.F., Slepicka P., Svorčík V., Slouf M., Perina V., *Nucl. Instr. Meth. B* 272 (2012), 396
- [28] Drożdźiel A., Turek M., Pyszniak K., Prucnal S., Luchowski R., Grudziński W., Klimek-Turek A., Partyka J., *Acta Physica Polonica A* 132 (2017), 264
- [29] Turek M., Drożdźiel A., Pyszniak K., Luchowski R., Grudziński W., Klimek-Turek A., *Acta Physica Polonica* 136 (2019) 278
- [30] Kudriavtsev Yu, Hernández A.G., Asomoza R., Korol V.M., *Surface and Interface Analysis* 49 (2017), 1049
- [31] M. Turek, A. Drożdźiel, K. Pyszniak, S. Prucnal, *Nucl. Instr. Meth. B* 269 (2011), 700
- [32] Turek M., Drożdźiel A., Pyszniak K., Prucnal S., Zuk J., *Przegląd Elektrotechniczny* 86 (2010), 193
- [33] Turek M., Drożdźiel A., Pyszniak K., Prucnal S., Mączka D., Yushkevich Yu., Vaganov Yu., *Instrum. Exp. Techn.* 55 (2012), 469
- [34] Ziegler J. F., Ziegler M. D., Biersack J. P., *Nucl. Instr. Meth. B* 268 (2010), 1818
- [35] Prasad S.G., De A. and De U., *International Journal of Spectroscopy* 2011 (2011), 810936
- [36] Lippert Th., Zimmermann F., Wokaun A., *Appl. Spectrosc.* 47 (1993), 1931
- [37] Kumar V., Sonkawade R.G., Chakravarti S.K., Singh P., Dhaliwal A.S., *Radiat. Phys. Chem.* 81 (2012), 65
- [38] Kozlov I. P., Odzhaev V. B., Karpovich I. A., Popok V. N., Sviridov D. V., *J. Appl. Spectroscopy.* 65 (1998), 390
- [39] Nouh S.A., Abdul-Salem M.H., Ahmed Morsy A., *Radiat. Meas.* 37 (2003), 25
- [40] Gupta S., Choudhary D., Sarma A., *J. Polym. Sci. B: Polym. Phys.* 38 (2000), 1589