



Kraków, 7 sierpnia 2025

Nanostruktury przekraczają granice (ziaren w metalach)

Duże powierzchnie metalowe pokryte precyzyjnie uformowanymi nanostrukturami pozostawały dotychczas w sferze fantazji. Przeszkoda stojąca na drodze do ich wytwarzania wydawała się fundamentalna, wynikała bowiem z obecności w metalach ziaren krystalicznych: ich granice zaburzały wzrost nanostruktur. W Instytucie Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie na przykładzie tytanu i jego tlenku udowodniono, że przeszkodę tę można pokonać i skutecznie, i tanio.

Pokrycia z nanostruktur o precyzyjnie dobieranych rozmiarach i kształtach pozwalają kontrolować właściwości materiałów. Niestety, w przypadku większości metali istniało tu poważne ograniczenie: wytworzenie jednorodnych pokryw na dużych powierzchniach było niemożliwe z uwagi na zaburzenia pojawiające się na granicach ziaren krystalicznych. Ograniczenie to udało się przełamać w Instytucie Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie, gdzie proces wielkopowierzchniowego pokrywania metalu nanorurkami zaprezentowano na przykładzie tytanu i jego tlenku. Osiągnięcie wydaje się obiecujące w kontekście wielu zastosowań, wśród których wyróżniają się implanty medyczne, fotoogniwa, detektory chemiczne czy memrystory.

„Jako jedyni na świecie potrafimy w sposób ściśle kontrolowany pokrywać nanorurkami z tlenku tytanu blachy tytanowe o dużych powierzchniach, liczonych w dziesiątkach centymetrów kwadratowych. Zaproponowana przez nas metoda to efekt połączenia uchodzących za niekonwencjonalne technik nanostrukturacji powierzchni materiałów: litografii nanocząstek oraz elektrochemicznej anodyzacji”, mówi dr inż. Juliusz Chojenka (IFJ PAN), pierwszy autor artykułu opisującego osiągnięcie, opublikowanego na łamach czasopisma „Acta Materialia”.

Zarówno litografia nanocząstek, jak i anodyzacja, są technikami znanymi od dłuższego czasu, lecz używanymi tylko w skali badań laboratoryjnych, nie były też dotychczas łączone. Krakowscy fizycy podkreślają, że zaletą zaproponowanej przez nich metody jest prostota, szybkość, niskie koszty produkcji i możliwość łatwego skalowania całego procesu w sposób pozwalający na zastosowania technologiczne, na przykład do wytwarzania pokryw wielkopowierzchniowych.

Litografia nanocząstek odgrywa rolę w pierwszej, przygotowawczej fazie wytwarzania pokryw z nanorurek tlenku tytanu. Głównymi bohaterami są tu kuliste nanocząstki polistyrenowe, komercyjnie dostępne w średnicach od 50 nanometrów do kilkudziesięciu mikrometrów. Nanokulki o wybranej średnicy wprowadza się do wody w takiej ilości, aby wypływając na jej powierzchnię uformowały pojedynczą warstwę pożądanego rozmiarów. Ponieważ nanocząstki podczas tego procesu są naładowane elektrycznie, rozpychają się wśród sąsiadów, co skutkuje ich równomiernym rozmieszczeniem, charakteryzującym się heksagonalną regularnością.

Wysoce jednorodna monowarstwa polistyrenowych nanodrobin jest następnie osadzana na wypolerowanej blasze tytanowej. Pokryty nanocząstkami materiał trafia teraz do komory próżniowej, gdzie przez kilka minut poddaje się go działaniu plazmy wytworzonej z azotu i tlenu. Pod jej wpływem polistyrenowe kulki nieco się kurczą, zachowując jednak swoje pierwotne położenia. Próbką jest następnie przenoszona do kolejnej komory próżniowej, gdzie napyla się na nią cienką warstwę tytanu. Ostatnim etapem fazy litograficznej jest usunięcie nanocząstek za pomocą rozpuszczalnika organicznego i ultradźwięków, wprawiających próbkę w drgania. Rezultatem jest powierzchnia pokryta heksagonalną, regularną siatką dołków nazywanych antykropkami.

„W specjalnej komorze próbkę pokrytą antykropkami poddajemy teraz anodyzacji, czyli procesowi elektrochemicznemu skutkującemu tworzeniem się na jej powierzchni jednorodnych i uporządkowanych nanostruktur”, wyjaśnia dr hab. inż. Michał Krupiński (IFJ PAN) i precyzuje: „Umiejętnie dobierając skład elektrolitu, w którym zachodzi anodyzacja, oraz kontrolując przyłożone napięcie, temperaturę i czas, potrafimy doprowadzić do uformowania się gęstego pokrycia z nanorurek z tlenku tytanu, rozmieszczonych zgodnie z pierwotnym układem antykropek i o założonej długości, w przypadku opisanym w naszym artykule wynoszącej 15 mikrometrów”.

Podkreślenia wymaga tu fakt, że przy standardowym anodyzowaniu tytanu występują silne fizyczne ograniczenia dotyczące skali uporządkowania powstających nanostruktur, wynikające z rozmiarów ziaren krystalicznych w matrycy metalicznej. Właśnie dlatego krakowscy fizycy poprzedzają anodyzację procesem nanostrukturyzacji z użyciem litografii nanocząstek. Litografia pozwala bowiem zmodyfikować – istotny podczas anodyzacji – rozkład pola elektrycznego na powierzchni tytanu, czym można wymusić dalekozasięgowe uporządkowanie tworzących się nanostruktur.

Właściwości fizyko-chemiczne tak otrzymanych pokryć poddano wszechstronnej charakteryzacji z użyciem skaningowej mikroskopii elektronowej, dyfrakcji rentgenowskiej i spektroskopii ramanowskiej, a także określono ich fotoaktywność pod wpływem promieniowania ultrafioletowego. W trakcie wielodniowych badań stwierdzono, że mimo przekraczania granic ziaren krystalicznych, wytworzone pokrycia z nanorurek są mechanicznie trwałe, a same nanorurki nie pękają nawet podczas wygrzewania.

Przedstawiona metoda nanostrukturyzacji tlenku tytanu ma szansę znaleźć szerokie zastosowania. Implanty medyczne można byłoby pokrywać nanorurkami w kontrolowany sposób uwalniającymi do organizmu leki poprawiające biogodność. Umiejętnie dobierając rozmiary i gęstość nanorurek można kontrolować fotoaktywność tlenku tytanu oddziałującego z promieniowaniem ultrafioletowym, co zachęca do zastosowań związanych z fotoogniwami czy kontrolowaniem przebiegu reakcji chemicznych. Wiadomo także, że powierzchnia tlenku tytanu zmienia swoje właściwości w zależności od adsorpcji nawet niewielkich ilości wodoru, zatem w grę wchodzi także nowe, czulsze od dotychczasowych detektory. Ciekawe perspektywy pojawiają się w zakresie miniaturyzacji memrystorów, czyli elementów elektronicznych, których opór zależy od historii przepływającego przez nie prądu. Obecnie memrystory, będące obiecującymi składnikami nowych typów pamięci i sztucznych synaps, osiągają rozmiary rzędu dziesiątków mikrometrów. Tymczasem ich funkcję mogłyby przejąć pojedyncze nanorurki, a więc obiekty o rozmiarach co najmniej setki razy mniejszych.

„Nie ma żadnych przeszkód fizycznych, chemicznych czy technicznych, by zaadaptować naszą metodę do nanostrukturyzacji powierzchni wykonanych z innych metali przejściowych niż tytan, takich jak żelazo, glin czy tantal. Wszystko zależy tu po prostu od potrzeb”, podkreśla na zakończenie dr Chojenka.

Badania fizyków materiałowych z IFJ PAN, sfinansowane z grantu Narodowego Centrum Nauki, w zakresie analiz chemicznych zrealizowano we współpracy z Wydziałem Chemii Uniwersytetu Jagiellońskiego.

Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie prowadzi badania podstawowe i aplikacyjne w obszarze fizyki oraz nauk pokrewnych. Główna część działalności naukowej Instytutu koncentruje się na badaniu struktury materii, w tym własności oddziaływań fundamentalnych od skali kosmicznej po cząstki elementarne. Częścią Instytutu jest nowoczesne Centrum Cyklotronowe Bronowice, unikalny w skali europejskiej ośrodek, obok badań naukowych zajmujący się terapią protonową nowotworów. IFJ PAN prowadzi też cztery akredytowane laboratoria badawcze i pomiarowe. Wyniki badań – obejmujących fizykę i astrofizykę cząstek, fizykę jądrową i oddziaływań silnych, fizykę fazy skondensowanej materii, fizykę medyczną, inżynierię nanomateriałów, geofizykę, biologię radiacyjną i środowiskową, radiochemię, dozymetrię oraz fizykę i ochronę środowiska – są każdego roku przedstawiane w ponad 600 artykułach publikowanych w recenzowanych wysoko punktowanych czasopismach naukowych. Corocznie Instytut jest organizatorem lub współorganizatorem wielu międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych oraz szeregu seminariów i innych spotkań naukowych. IFJ PAN jest członkiem Krakowskiego Konsorcjum Naukowego „Materia-Energia-Przyszłość”, któremu, na lata 2012-2017, nadany został status Krajowego Naukowego Ośrodka Wiodącego (KNOW). Wiele projektów i przedsięwzięć realizowanych przez Instytut jest wpisanych na Polską Mapę Infrastruktury Badawczej (PMIB). Instytut zatrudnia ponad pół tysiąca pracowników. Komisja Europejska przyznała IFJ PAN prestiżowe wyróżnienie „HR Excellence in Research” jako instytucji stosującej zasady „Europejskiej Karty Naukowca” i „Kodeksu Postępowania przy rekrutacji pracowników naukowych”. W klasyfikacji MEIN Instytut został zaliczony do najwyższej kategorii naukowej A+ w obszarze nauk fizycznych.

KONTAKT:

dr hab. inż. **Michał Krupiński**
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628244
email: michal.krupinski@ifj.edu.pl

dr inż. **Juliusz Chojenka**
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628232
email: juliusz.chojenka@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

„Controlling the Photoactivity of the Nanopatterned Titanium Oxide”
J. C. Chojenka, K. Mróz, A. Bartkowiak, M. Mitura-Nowak, M. S. Shakeri, M. Krupiński
Acta Materialia 2025, 296, 121236
DOI: [10.1016/j.actamat.2025.121236](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2025.121236)

POWIĄZANE STRONY WWW:

<http://www.ifj.edu.pl/>
Strona Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk.

<http://press.ifj.edu.pl/>
Serwis prasowy Instytutu Fizyki Jądrowej PAN.

MATERIAŁY GRAFICZNE:

IFJ250807b_fot01s.jpg HR: http://press.ifj.edu.pl/news/2025/08/07/IFJ250807b_fot01.jpg
Gęste i wielkoskalowo jednorodne pokrycie powierzchni metalu nanostrukturami z tlenku tytanu, wykonane w Instytucie Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk. Kolory sztuczne. (Źródło: IFJ PAN)