



prof. dr hab. Ryszard Czajka  
e-mail: [ryszard.czajka@put.poznan.pl](mailto:ryszard.czajka@put.poznan.pl)  
tel.: 61-6653234

Poznań, 4 września 2020 r.

## RECENZJA PRACY DOKTORSKIEJ

**magistra Arkadiusza Janasa**

pt. „Synteza i badanie właściwości strukturalnych i elektronowych metalicznych nanostruktur na powierzchniach dwuskładnikowych kryształów półprzewodnikowych”

Przedstawiona do recenzji praca doktorska mgr. Arkadiusza Janasa dotyczy fizyki powierzchni, w szczególności właściwości strukturalnych i elektronowych nanostruktur Au lub stopów Au z In czy Ga wytwarzanych na powierzchni półprzewodników dwuskładnikowych typu AIII-BV. Badania tego typu układów są istotne w związku z osiągnięciem limitu miniaturyzacji układów elektronicznych bazujących na krzemie, realizowanych w ramach tzw. strategii „More-Moore”. Wytwarzane tranzystory CMOS z kanałami o długości 7 nm są najmniejszymi urządzeniami wykorzystującymi dyfuzję nośników ładunku, jako zasadniczego mechanizmu działania tych tranzystorów. Dlatego przemysł elektroniczny zaczął intensywnie poszukiwać innych materiałów półprzewodnikowych, np. o większej ruchliwości nośników ładunku, takich jak german (Ge) czy półprzewodniki dwuskładnikowe typu AIII-BV. Ta nowa strategia badawcza została określona jako „More-than-Moore”. W tym kontekście, podjętą przez Doktoranta tematykę badawczą należy uznać za bardzo aktualną, ciekawą z poznawczego, jak i aplikacyjnego punktu widzenia. Jednym z głównych problemów technologicznych dla tych nowych materiałów i dużej skali miniaturyzacji jest problem wytwarzania trwałych i o niskiej rezystywności kontaktów elektrycznych, ponieważ prosta metalizacja w skali pojedynczych nanometrów nie pozwala na wytworzenie trwałych i niskoomowych kontaktów. Dlatego, w przypadku technologii bazującej na krzemie, od roku 2006 zaczęto wykorzystywać krzemki niklu (INTEL). Z pracy doktorskiej

mgr. Arkadiusza Janasa wynika, że w przypadku półprzewodników grupy AIII-BV taką rolę mogą spełniać stopy międzymetaliczne m.in. Au z In i Au z Ga. Przedstawione w pracy doktorskiej wyniki badań podstawowych, mających na celu szczegółową charakteryzację właściwości strukturalnych i elektronowych nanostruktur Au i stopów międzymetalicznych na powierzchni ww. półprzewodników, znakomicie wpisują się w zapotrzebowanie przemysłu elektronicznego na nowe technologie bazujące na tych materiałach.

Do badań tego typu należy dobrać odpowiednie techniki i przyrządy badawcze, które m.in. umożliwiają charakteryzację poszczególnych elementów ww. układów z subnanometrową zdolnością rozdzielczą. Zaliczają się do nich wysoko rozdzielcze skaningowe mikroskopy elektronowe SEM i TEM i skaningowe mikroskopy próbnikowe (SPM), takie jak skaningowe mikroskopy tunelowe (STM) oraz sił atomowych (AFM) pracujące w różnych modach pracy, np. kontaktowym, przerywanego kontaktu, w modzie bezkontaktowym lub przewodzącej mikroskopii sił atomowych oraz powierzchniowo czułe techniki dyfrakcyjne RHEED i LEED. Stosowanie ww. technik badawczych o różnych zdolnościach rozdzielczych i analizujących różne właściwości fizyczne badanych nanoukładów umożliwia wszechstronną charakteryzację tych układów. Szczęśliwie dla Doktoranta, krakowskie środowisko naukowe dysponuje wszystkimi ww. technikami badawczymi, ale wiąże się to też z olbrzymim wysiłkiem opanowania wielu i skomplikowanych metod badawczych oraz często nietrywialnych w interpretacji ich wyników. Chciałbym podkreślić pewną nowość wprowadzoną przez Doktoranta, a mianowicie zastosowanie do analizy wyników eksperymentalnych nowoczesnych metod określanych „uczeniem maszynowym”. W niniejszej pracy, ta metoda została w kilku miejscach użyta do wyodrębnienia („odwikłania”) poszczególnych sygnałów, które pochodziły z różnych faz znajdujących się na drodze wiązki elektronowej. Zastosowanie tych procedur umożliwiło np. jednoznaczne określenie składu chemicznego nanodrutów, co nie jest zadaniem łatwym.

Przedstawiona do recenzji praca doktorska składa się ze streszczeń w j. polskim i angielskim, określenia celu pracy ze wskazaniem na publikacje naukowe (5) i komunikaty konferencyjne (9), zawierające wyniki badań przedstawione w pracy

doktorskiej oraz spisu stosowanych często skrótów. Część główna zawiera rozbudowany Wstęp, 5 rozdziałów, Podsumowanie oraz Spis 177 referencji literaturowych.

Tradycyjnie - rozdział zatytułowany „Wstęp” zawiera podstawowe informacje wprowadzające do procesów zachodzących na powierzchni we wstępnych fazach wzrostu nanostruktur, tarcia w nanoskali oraz charakterystyki złączy metal-półprzewodnik. Łącznie z następnym Rozdziałem 2, w którym opisane są ww. układy eksperymentalne i techniki badawcze, tworzy skondensowany materiał bazowy do zrozumienia, jakie układy i procesy były badane oraz jakie techniki badawcze trzeba było zastosować, aby szczegółowo scharakteryzować strukturalne i elektronowe właściwości wytworzonych nanostruktur. Materiał zawarty we Wstępie i w Rozdziale 2 nie jest specjalnie odkrywczy, ale może służyć jako przydatne (np. dla dyplomantów i młodszej kadry naukowej) i skondensowane źródło podstawowej wiedzy nt. technologii i badań nanoukładów. Jednocześnie Doktorant zawarł odnośniki do wielu źródeł opisujących te procesy i techniki bardziej szczegółowo – od źródeł historycznie pierwszych po współczesne.

W Rozdziale 3 Doktorant przedstawił badania termicznie indukowanej samoorganizacji Au na powierzchniach aż sześciu półprzewodników AIII-BV: antymonki, arsenki i fosforki indu oraz galu. Należy podkreślić, że jest to bardzo szeroki zakres badanych materiałów, które są i pewnie będą dalej często używane do konstrukcji urządzeń i sensorów półprzewodnikowych. Jeśli wziąć pod uwagę fakt, że każdy z tych materiałów wymaga znalezienia optymalnych parametrów stosowanych w preparatyce, celem uzyskania czystych i jednorodnie zrekonstruowanych podłoży, to wyobrażam sobie, jak bardzo czasochłonne były te badania. Szczególnie, jeśli chce się zachować metodycznie poprawne i systematycznie prowadzone procedury technologiczne. Do charakteryzacji rekonstrukcji powierzchniowych badanych układów półprzewodnikowych Doktorant użył głównie techniki RHEED, ale w jednym z przypadków – fosforku galu (GaP), wykorzystał także opcję transmisyjną HAADF STEM. Dzięki tej ostatniej technice, ukazał przekrój przez przypowierzchniowy układ warstw atomowych GAP i poprzez odpowiednią analizę skorelował powierzchniowe rzędy atomowe, jako należące do rekonstrukcji powierzchniowej 2x4. Z kolei do charakteryzacji nanostruktur Au wytworzonych na powierzchni ww. półprzewodników dołączył techniki SEM i AFM. Jakościowo obrazy z obu technik wykazują komplementarność. Niestety, nie znalazłem informacji, z której to techniki pomiarowej

pochodzą dane ilościowe zamieszczone w Tabeli 2. (str. 68) – SEM czy AFM. Z obrazów AFM dużo większą wiarygodnością obdarzyłbym dane dotyczące wysokości, natomiast wymiary lateralne, moim zdaniem, są zawyżone poprzez tzw. artefakty, pojawiające się w sytuacji, kiedy promień krzywizny sondy jest większy od promienia krzywizny obiektu obrazowanego! Mechanizm wzrostu Au w formie oddzielnych nanostruktur powtarza się na pięciu z sześciu półprzewodników. Wyjątkiem jest InSb, na powierzchni którego wzrastają mikrometrowej długości nanodruły Au, w przeciwieństwie do izolowanych nanostruktur Au (nano-wysp) na pozostałych podłożach. Na podstawie analizy sygnału RHEED, Doktorant wyznaczył zależności obrazujące różną dynamikę wzrostu nanostruktur Au w funkcji ilości osadzonych ML (monowarstw) na poszczególnych podłożach. Bardzo ciekawy wynik dotyczy wzrostu nanostruktur i przebiegu procesu krystalizacji Au na powierzchni arsenku galu w temperaturze 330°C. Proces zarodkowania zaczyna się dla pokryć powyżej 1,5 ML, a dominujący proces krystalizacji nanostruktur Au zachodzi w przedziale temperatur 270 °C do 220 °C. W podrozdziale 3.6 Doktorant przedstawił wyniki badania interfejsów nanostruktur Au z powierzchnią półprzewodników za pomocą skaningowego mikroskopu transmisyjnego (TEM). Znakomita jakość zdjęć oraz wykorzystanie analizy składu chemicznego nanostruktur i obszarów interfejsów za pomocą metody EDX umożliwiły jednoznaczne interpretacje przebiegu wzrostu nanostruktur, m.in. pojawienie się stopów międzymetalicznych np. Au z In czy Ga. W przypadku wzrostu Au na InSb, w celu opisanego procesu wbudowywania się atomów Au w podłoże, Doktorant wykorzystał wyniki symulacji wykonanych metodą DFT (Teorii Funkcjonału Gęstości). Ponadto, przeprowadził geometryczną analizę fazy bazując na atomowo-rozdzielczych obrazach HAADF STEM, co umożliwiło śledzenie lokalnych odkształceń i dystrybucję przestrzenną naprężeń, które mogą wyznaczać kierunek wzrostu nanostruktur. Podobne analizy Doktorant przeprowadził dla innych układów i wykorzystał je w podrozdziale 3.7 dla wyprowadzenia uogólnień dotyczących wyjaśnienia procesu formowania się nanostruktur w układach Au/AlIII-BV, poprzez udział atomów Au w zrywaniu wiązań w obszarze przypowierzchniowym badanych półprzewodników. Następnie pokazał schematy zachodzących reakcji i odpowiednie zależności energetyczne. Wykazał istnienie silnej korelacji liniowej pomiędzy średnim rozmiarem nanostruktur a średnim promieniem dyfuzji powierzchniowej dla wszystkich badanych półprzewodników. W podrozdziale 3.8 przedstawił, na przykładzie układu 2 ML Au/InP(001), właściwości elektronowe złącza metal-półprzewodnik i wskazał, które złącza mają charakter omowy, a które typu

Schottky'ego. Zmierzył za pomocą LC-AFM odpowiednie krzywe prądowo-napięciowe, w różnych obszarach na powierzchni próbek, mapując obszary z kontaktami omowymi i typu Schottky'ego. Jednocześnie Doktorant zidentyfikował jednoznacznie, które kierunki epitaksji np. w obszarze złącza AuIn<sub>2</sub>/InP warunkują powstanie kontaktu omowego, a które kontaktu typu Schottky'ego. Wyniki badań i analiz przedstawione na rysunkach 38 i 39 uważam za bardzo przydatne dla technologów elektronowych, szukających układów zapewniających trwałe omowe kontakty w urządzeniach elektronowych tworzonych z udziałem szerokiej grupy półprzewodników AIII-BV.

Rozdział 4 przedstawia badania układu 2 ML na powierzchni GaAs(001) w funkcji temperatury w zakresie od 350 do 650 stopni Celsjusza. Nasuwa się pytanie, dlaczego akurat tylko ten układ został wybrany przez Doktoranta: czy jest to uzasadnione szerszymi aplikacjami tego podłoża w elektronice, czy zachowanie tego układu jest reprezentatywne dla całej grupy półprzewodników uprzednio badanych przez Doktoranta, ze względu na termiczne właściwości podłoża, czy z braku czasu? O ile wyniki przedstawione w Tabeli 11 przedstawiają logicznie skorelowane i monotonicznie zmieniające się parametry, to moje zainteresowanie budzą wyniki w Tabeli 12. W szczególności, dlaczego w okolicy 600°C występuje osobliwość polegająca na tym, że średni rozmiar i wysokości są większe, gęstość powierzchniowa i stopień pokrycia mniejsze? Przecież zmiana w budowie nanostruktur, pojawienie się w miejsce nanokrystalitów AuGa nanostruktur AuGa<sub>2</sub> (jak to wynika z analizy wyników przedstawionych w kolejnym podrozdziale) następuje już powyżej 535°C.

Dwa ostatnie rozdziały poświęcone są badaniom samoorganizacji złota na powierzchni materiału warstwowego – MoS<sub>2</sub>. Zastosowany materiał bazowy MoS<sub>2</sub> został przygotowany w dwóch postaciach: jako materiał o pochodzeniu naturalnym (Rozdział 5) i materiał otrzymany syntetycznie na utlenionym podłożu krzemowym (Rozdział 6). Doktorant przebadął proces samoorganizacji Au na obu rodzajach próbek oraz, wykorzystując słabe (van der Waalsa?) oddziaływanie między nanostrukturami złota a podłożem, podjął się manipulacji nanostrukturami Au za pomocą sondy mikroskopu sił atomowych. Brakuje mi wyjaśnienia, dlaczego w pierwszym przypadku osadzono 2 ML Au, a w drugim 1,5 ML. Po drugie, zdjęcia SEM od „a)” do „d)” na Rysunku 48 obrazują efekt naparowania 2ML na powierzchni MoS<sub>2</sub>, a wykres oznakowany literą „e)” (w podpisie mylnie oznakowany jako „d)”) dotyczy sytuacji po naparowaniu ok. 4 ML Au na powierzchnię MoS<sub>2</sub>? Tak czy inaczej, w przypadku obu rodzin próbek wytworzono

i manipulowano głównie nanostrukturami Au o charakterystycznym trójkątnym kształcie i rozmiarach od kilku do kilkunastu nanometrów oraz wysokościach do 10 nm. Pomiar TEM wykazały występowanie atomowo gładkich interfejsów pomiędzy nanostrukturami Au i podłożem. W przypadku próbki „syntetycznej” stwierdzono występowanie ugięcia wierzchnich warstw MoS<sub>2</sub> pod nanostrukturami Au oraz inne odległości między atomami Au w pierwszej warstwie interfejsu od strony podłoża. Dane ilościowe dotyczące stałych sieci, odległości międzyatomowych, międzyplaszczynowych, etc. zostały zebrane w odpowiednich tabelach. Uzyskane wyniki ilościowe pokazują maksymalnie możliwą precyzję w charakteryzacji budowy nanostruktur i interfejsów z dokładnością do pojedynczych odległości między atomami i monoatomowych lub monomolekularnych warstw. Uogólniając, tego typu dane zbierane obecnie przez badaczy z zakresu nanonauki i nanotechnologii, dotyczące olbrzymiej ilości materiałów i interfejsów między różnymi materiałami, będą niezwykle użyteczne dla projektowania konstrukcji urządzeń elektronowych w skali pojedynczych nanometrów, są lub będą znakomitą bazą wiedzy dla nanotechnologów pracujących w przemyśle elektronicznym.

Ostatnim rodzajem eksperymentu, opisanym przez Doktoranta, są manipulacje wytworzonymi nanowyspami Au na MoS<sub>2</sub>, polegające na wykorzystaniu sondy AFM do lateralnego przesuwania pojedynczych nanobiektów Au po powierzchni atomowo-gładkich podłoży. Powstaje pytanie, czy tego typu eksperymenty mogą być przydatne dla aplikacji w przemyśle elektronicznym czy są tylko ciekawostką naukową? Z tego ostatniego punktu widzenia, eksperymenty są bardzo ciekawe, ponieważ dotyczą zjawiska tarcia w nanoskali. Doktorant potwierdził doświadczalnie wyniki odpowiednich symulacji, wskazując na występowanie efektów dwuwymiarowych w nanotarciu (wynikające z drgań ciernych (ang. stick-slip)), pojawiających się w zależności od wymuszonego kierunku przesuwu względem rzędów atomowych lub molekularnych podłoża. Z kolei, z punktu widzenia przyszłych aplikacji, możliwość tego typu manipulacji może być wykorzystana do tzw. nanolitografii (wytwarzania określonych struktur geometrycznych na powierzchni podłoży), tworzenia nanodrutów przewodzących lub ich przerywania, etc. Na zakończenie podrozdziału 6.3 Doktorant przedstawił ciekawy model formowania równoległych rzędów zbudowanych z nanowysp Au. Na podstawie tego modelu można oszacować odległości między rzędami utworzonymi z przesuwanych w sposób kontrolowany nanostruktur Au oraz zmiany w średniej długości wytwarzanych rzędów. Model ma charakter ogólny, de facto niezależny od rodzaju materiału nanowyspy i materiału podłoża. Zapewne, decydujący wpływ ma rodzaj i siła oddziaływania

nanostruktur z podłożem. Na zakończenie, w podrozdziale 6.4, Doktorant przedstawił wyniki badań stabilności termicznej w układzie Au/MoS<sub>2</sub>. Wykazał m.in. możliwość doprowadzenia do połączenia nanostruktur Au, z których w wyniku manipulacji przed wygrzewaniem, utworzono zagęszczone rzędy. Najciekawszym, chociaż dla mnie oczekiwanym rezultatem, było stwierdzenie, że to połączenie (Doktorant użył wręcz określenia – przetopienie) zaszło w temperaturze dużo niższej niż temperatura topnienia litego złota. Jak wiadomo, wiele właściwości fizycznych nanomateriałów może i często się różni od właściwości próbek litych.

Zamiast wniosków końcowych pracę kończy „Podsumowanie”. Widocznie Doktorantowi łatwiej było sformułować opisowe podsumowanie niż listę konkretnych wniosków. W tak obszernym podsumowaniu trudno szybko wyodrębnić najważniejsze osiągnięcia pracy doktorskiej. Lista wniosków jest zazwyczaj bardziej skondensowana, co do treści i formy, i moim zdaniem, bardziej użyteczna dla kolejnych czytelników pracy doktorskiej.

Wielką zaletą przedstawionych w pracy doktorskiej wyników jest ich jednoznaczna interpretacja. Jak już wspomniałem na początku recenzji, ta jednoznaczność wynika głównie z dostępu do najnowocześniejszych technik badawczych. Otrzymane obrazy powierzchni i interfejsów z tzw. „atomową” (lub jak kto woli – z subnanometrową) zdolnością rozdzielczą, wsparte analizami składu chemicznego, dyfraktogramami z powierzchniowo czułych technik RHEED czy LEED, nie pozostawiają wątpliwości, co do interpretacji wyników eksperymentalnych. Nie mniej wielką zasługą Doktoranta jest odpowiednio zaawansowane opanowanie ww. technik, wprowadzenie metod „uczenia maszynowego” do analizy „zawikłanych” danych eksperymentalnych oraz wprowadzenie pewnych modeli teoretycznych, które wykazały zasadniczą zgodność z danymi eksperymentalnymi.

W bogatej bibliografii (177 pozycji) znalazłem 6 odnośników do artykułów ze współautorstwem Doktoranta, w dwóch jest drugim współautorem, dwa razy jest trzeci, raz piątym i raz szóstym. Zakładam jednak, że w niniejszej dysertacji Doktorant przedstawił oryginalne wyniki, w których powstaniu odegrał decydującą rolę, jako pomysłodawca i wykonawca. Trochę zdziwił mnie brak odnośnika do pracy w Applied Surface Science z roku 2019, w której Doktorant był pierwszym współautorem. Generalnie dobór odnośników uważam za właściwy – są odnośniki do źródeł historycznie pierwszych i prac najnowszych, do artykułów naukowych i do podręczników czy prac

przeładowych. Niestety, zauważyłem sporą liczbę odnośników do stron internetowych (ponad 10) i chyba 15 pozycji zakończonych enigmatycznym określeniem „adres”?

W pracy znalazłem pewną liczbę błędów edytorskich, także gramatycznych, co przy rozwiniętych systemach edytorskich może dziwić. Zestawienie zauważonych błędów załączam na końcu niniejszej recenzji, głównie do wiadomości Doktoranta.

Jednak wszystkie krytyczne uwagi szczegółowe i te drobne, dotyczące uchybień edytorskich, nie zmieniają mojej, bardzo pozytywnej, merytorycznej oceny pracy doktorskiej mgr Arkadiusza Janasa.

**Przedstawiona do recenzji praca doktorska spełnia wymogi ustawy o tytule naukowym i stopniach naukowych. Doktorant wykazał bardzo dobre opanowanie trudnych technik eksperymentalnych w zakresie wytwarzania i modyfikacji nanostruktur złota na powierzchni półprzewodników AIII-BV, opanował charakterystykę powierzchni ww. półprzewodników i powierzchni MoS<sub>2</sub> z subnanometrową („atomową”) zdolnością rozdzielczą za pomocą zaawansowanych technik analitycznych takich, jak UHV STM, AFM, RHEED, LEED, SEM, HAADF-STEM, HR-TEM, EDX. Doktorant, poprzez systematyczne i oryginalne prowadzenie prac eksperymentalnych oraz rozbudowaną dyskusję wyników eksperymentalnych, także z wykorzystaniem „uczenia maszynowego” wykazał także umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.**

**Wniosuję o dopuszczenie mgr. Arkadiusza Janasa do publicznej obrony pracy doktorskiej przed Radą Dyscypliny „Nauki Fizyczne” Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego.**



.....  
*Ryszard Czajka*



Wykaz zauważonych błędów natury redakcyjnej:

1. W streszczeniu, w „Spisie użytych skrótów”, w „Celu pracy” i w tytule podrozdziału 2.6 - użyto określenia „mikroskopia sondy skanującej”, a oficjalne tłumaczenie (wg Komisji Nazewnictwa Fizycznego PTF) określenia SCANNING PROBE MICROSCOPY, to SKANINGOWA MIKROSKOPIA PRÓBNIKOWA.
2. W streszczeniu - Rozmiar nanostruktur~~y~~ uformowanych ....
3. w „Celu pracy” – „zbadano nanotrybologiczne właściwości”, obecnie w polskiej literaturze naukowej używa się „nanotribologiczne”.
4. W „Schemacie pracy” – „wyjaśnienie niewielkiego oddziaływania nanostruktury z podłożem”, określenie: „niewielkie” jest zwrotem potocznym i w tym przypadku nie wiadomo o „jak wielkie i jakiego typu” oddziaływanie chodzi.
5. W „Spisie treści” - w tytułach podrozdziałów od 3.2 do 3.4 użyto „Rekonstrukcja InSb(001), GaAs(001)”, itp. W j. polskim „rekonstrukcja” ma kilka znaczeń, użyłbym jednak sformułowania „Rekonstrukcja powierzchniowa ...”
6. W podrozdziale 1.1. przetłumaczono wyrażenie ang. „*Chemical Vapor Deposition*” jako „nanoszenie chemiczne z par” – wg Słownika Technicznego powinno być przetłumaczone jako „osadzanie chemiczne (warstw) z fazy gazowej” lub „osadzanie z par związków chemicznych”.
7. W podrozdziale 1.3 sformułowanie: “Pod pojęciem dyfuzji powierzchniowej kryje się ruch atomów na jej powierzchni indukowany ...” – chodzi o ruch na powierzchni dyfuzji powierzchniowej??
8. W podrozdziale 1.9 znalazłem sformułowanie:” Elementy wykonujące operację logiczne najczęściej są zbudowane z półprzewodnika, natomiast kontakty elektryczne z pozostałymi częściami układu tworzone są z metalu.”. Firma INTEL już od 14 lat stosuje kontakty z krzemku niklu!?
9. Wzór nr 19 – co oznacza symbol „B” we wzorze definiującym C\* ?
10. W podrozdziale 2.4.2 – „ze względu na duża energia elektronów” ??
11. W podrozdziale 2.5 – „z zastosowanie emisji polowej”?; „zachodzi dzięki soczewką skanującym”?
12. W opisie Rys. 15b „Emisja estecznie rozproszonych elektronów”
13. W podrozdziale 2.5.1 – „Prawdopodobieństwo ..... jest bliska kwadratu liczby atomowej Z”

14. W podrozdziale 2.5.2 – „HAADF STEM (z ang. High-Angle Annular Dark-Field Scanning Transmission Electron **Ficroscopy**)
15. W podrozdziale 3.2 – „Obserwuje się atomowe **łańcuchu** układające się ...”
16. W podrozdziale 3.5, str 73 – „Wykres **opisuję** intensywność ...”
17. W podrozdziale 3.6.1, str 77 – „Zastosowanie **iloscioowej** analizy kontrastu HAADF STEM za **pomoca** technik uczenia maszynowego; str.80 – „za pomocą Teorii Funkcjonału **Gęstość** (z ang. Density Functional Theory - DFT)
18. W podrozdziale 3.6.3, str. 87 – co oznacza określenie: „Pozycje kolumn atomowych na całej długości atomowej są zaburzone”?
19. W podrozdziale 4.1 – Czyba błędne oznaczenie temperatury na Rysunku 42b?
20. W podrozdziale 4.2 – w podpisie Rysunku 44 – „za pomocą metod **uczni**a maszynowego”?
21. W podrozdziale 4.3, str. 112 – „od temperatury **podkadu** podczas nanoszenia Au”?

*I jeszcze kilka podobnego typu przejęzyczenia na następnych stronach.*



R. Czajka