



INSTYTUT FIZYKI POLSKIEJ AKADEMII NAUK

INSTITUTE OF PHYSICS, POLISH ACADEMY OF SCIENCES

02-668 WARSZAWA, AL. LOTNIKÓW 32/46
fax: + (48) 22 843 09 26; <https://www.ifpan.edu.pl/en/>

**International Centre for Interfacing Magnetism and Superconductivity
with Topological Matter – MagTop (ON-6)**

Prof. dr hab. Tomasz Wojtowicz, Leader of the Device Epitaxy Group ON6.2
Deputy head for scientific affairs of the ON6 Scientific Division,
tel. +(48) 22 116 3123; +(48) 500 263 685; e-mail: wojto@MagTop.ifpan.edu.pl
<https://magtop.ifpan.edu.pl/> <https://www.ifpan.edu.pl/en/institute/scientific-divisions.html>

Warszawa, 19-06-2024 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Dawida Wutke

zatytułowanej:

**„Badania efektów wielociałowych w dwuwymiarowych gazach elektronowych
(2DEG) uformowanych na powierzchniach półprzewodników III-V”**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. Dawida Wutke dotyczy rozległych badań eksperymentalnych dwuwymiarowego gazu elektronowego formowanego na powierzchni InAs, binarnego półprzewodnika III-V, poprzez osadzanie w warunkach ultrawysokiej próżni atomów grupy VI, stanowiących dla półprzewodników tego typu domieszkę donorową. Praca ta wykonana została w Szkole Nauk Ścisłych i Przyrodniczych Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie pod kierunkiem promotora prof. dr. hab. Jacka Kołodzieja. Wszystkie eksperymenty przeprowadzone zostały na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, w kierowanym przez Promotora Zakładzie Promieniowania Synchrotronowego, Instytutu Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego, choć wyniki raportowane w rozprawie uzyskane zostały bez użycia synchrotronu.

Badania dwuwymiarowego gazu nośników prowadzone są na świecie od dziesięcioleci. W przeważającej większości, jeśli chodzi o klasyczne półprzewodniki takie jak badany przez mgr. Wutke binarny związek InAs, dotyczyły one nośników znajdujących się dość głęboko od powierzchni struktury, a to dlatego, że tylko wtedy, z zastosowaniem tzw. domieszkowania modulacyjnego minimalizującego rozpraszanie na zjonizowanych domieszkach, udaje się uzyskać ekstremalnie wysokie ruchliwości tych nośników. W przypadku GaAs, materiału, którego technologia wytwarzania metodą epitaksji z wiązek molekularnych jest najbardziej rozwinięta, rekord ruchliwości dla dwuwymiarowego gazu elektronowego (2DEG) z 2022 r., ustanowiony przez grupę Lourena Pfeiffera z Princeton University w USA, wyniósł $\mu = 57 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Dlatego też struktury GaAs z 2DEG o ultra wysokiej ruchliwości stanowiły przez wiele lat podstawową platformę dla szeregu badań w różnych gałęziach fizyki materii skondensowanej i które zaowocowały nie tylko wieloma odkryciami naukowymi (m.in. dwie nagrody Nobla), ale także rozwojem elektroniki. W przypadku struktur modulacyjnie domieszkowanych najczęściej stosowaną metodą eksperymentalną były badania transportu elektrycznego, a struktura

elektronowa 2DEG wyznaczana była jedynie w sposób pośredni, ponieważ ze względu na jego umiejscowienie głęboko pod powierzchnią, nie można było stosować takich bezpośrednich metod, jak kątowno-rozdzielcza spektroskopia fotoelektronów (ARPES).

W recenzowanej rozprawie doktorskiej mgr Dawid Wutkę podjął się oryginalnego, i jak się potem okazało trudnego z powodu konieczności skomplikowanego przygotowania powierzchni, zadania zbadania struktury elektronowej dwuwymiarowego gazu elektronowego w sposób bezpośredni, z wykorzystaniem kątowno-rozdzielczej spektroskopii fotoelektronów. Szczególny nacisk położony został na określenie dominującego typu oddziaływań wielodziałowych w 2DEG. Jako obiekt swych badań mgr Wutke wybrał mniej przebadany, od wspomnianego powyżej GaAs, binarny związek półprzewodnikowy III-V, InAs.

Praca badawcza, która stała się podstawą recenzowanej rozprawy doktorskiej wpisuje się w niezmiernie ciekawą i rozwijaną ostatnio bardzo intensywnie tematykę badania przewodzących stanów powierzchniowych i dlatego jest bardzo aktualna i ważna. Wybuch zainteresowania takimi badaniami, a w szczególności prowadzonymi z użyciem metody ARPES, związany jest z odkryciem w ostatnich latach istnienia nowego typu materiałów, tzw. materiałów topologicznych. W szczególności do grupy tej należą trójwymiarowe izolatory topologiczne, na których powierzchniach istnieją, z powodu pewnych symetrii, topologicznie chronione przewodzące stany powierzchniowe. Ze względu na fakt, że na powierzchniach izolatorów i półprzewodników mogą istnieć także inne stany powierzchniowe, eksperymentalne odróżnienie stanów topologicznych od „zwykłych”, inaczej „trywialnych”, stanów powierzchniowych jest dużym wyzwaniem eksperymentalnym. Dlatego też uważam, że niezależnie prowadzone badania innego typu stanów powierzchniowych istniejących na powierzchniach półprzewodników, np. ze względu na intencjonalne domieszkowanie powierzchniowe, takie jak te opisane w rozprawie doktorskiej mgr Dawida Wutke, mają istotne znaczenie także dla badań w obszarze materii topologicznej oraz dla szeroko pojętej fizyki materii skondensowanej.

Warto podkreślić fakt, że w ostatnich latach eksperymenty analogiczne do tych, prowadzonych przez mgr. Wutkę, ale dotyczące osadzania pierwiastków, w tym atomów metali magnetycznych, na powierzchniach materiałów topologicznych, prowadzone są w wielu ośrodkach, w tym w moim macierzystym Międzynarodowym Centrum Sprzężenia Magnetyzmu i Nadprzewodnictwa z Materią Topologiczną – MagTop w Instytucie Fizyki PAN. Tym samym uważam, że tematyka pracy mgr. Wutke jest, tym bardziej aktualna i mająca szerokie znaczenie.

Po tym wstępie chciałbym już na samym początku stwierdzić, że cel naukowy, który postawił przed sobą mgr Wutke, tj. badanie efektów wielodziałowych w dwuwymiarowych gazach elektronowych uformowanym na powierzchniach półprzewodników III-V został osiągnięty, poprzez zbadanie jednego z prominentnych materiałów tego typu - arsenku indu. Recenzowaną rozprawę doktorską, a szczególnie przedstawione w niej wyniki naukowe oceniam wysoko. Moim zdaniem przeprowadzone przez mgr. Wutkę badania wniosły istotny wkład do rozwoju fizyki jako całości, w tym do rozwoju fizyki dwuwymiarowych gazów elektronowych i fizyki powierzchni. Poniżej przedstawię bardziej szczegółowy opis rozprawy, krótkie omówienie kilku najważniejszych wyników oraz drobne uwagi i pytania, dotyczące jednak jedynie samej formy prezentacji wyników w rozprawie.

Rozprawa doktorska mgr. Dawida Wutke napisana została w języku polskim, liczy 110 stron i zawiera dość obszerne odniesienie do literatury naukowej, obejmujące 81 pozycji bibliograficznych. Składa się ona ze streszczenia (także po angielsku) oraz dziewięciu rozdziałów, z których pierwszy jest wstępem, a dziewiąty podsumowaniem.

Rozdział pierwszy rozprawy, na który składa się pięć podrozdziałów, zawiera ogólny wstęp teoretyczny obejmujący motywację badań, opis struktury elektronowej ciał stałych, w tym prezentację modelu $k \cdot p$ i wprowadzenie do oddziaływań wielociałowych, opis półprzewodników ze względu na własności elektryczne, wprowadzenie pojęcia „gięcia pasm” oraz krótki przegląd literatury dotyczącej tematu rozprawy.

Rozdział drugi to przedstawienie dwóch stosowanych przez Kandydata metod badawczych: kątowno rozdzielczej spektroskopii fotoelektronów (ARPES) oraz dyfrakcji elektronów niskoenergetycznych (LEED), a także dość szczegółowe przedstawienie wykorzystywanego układu badawczego ultra wysokiej próżni (UHV).

Rozdział trzeci zawiera opis stosowanej techniki przygotowania próbek, a w szczególności trawienia powierzchni na etapie pierwszym preparatyki, jej wygrzewań w warunkach UHV na etapie drugim oraz osadzania pierwiastków VI grupy układu okresowego i dalszej obróbki termicznej próbek.

W rozdziale 4 Autor bardzo krótko przedstawia metodykę prowadzenia badań, która uwzględnia problemy z adsorpcją na powierzchni gazów resztkowych podczas pomiarów niskotemperaturowych.

Rozdziały od 5 do 8 przedstawiają wyniki uzyskane przez mgr. Wutke i ich interpretację.

Niewątpliwie mgr. Wutke przeprowadził szereg dobrze zaplanowanych i trudnych badań oraz wykazał się wiedzą w dziedzinie fizyki materii skondensowanej, w tym fizyki półprzewodników i fizyki powierzchni. Jak dowodzą przedstawione wyniki Kandydat opanował bardzo dobrze dwie skomplikowane techniki badawcze, jakimi są ARPES i LEED. Podczas realizacji swoich badań mgr. Wutke uzyskał cały szereg bardzo istotnych wyników, z których część wymienię poniżej:

1. Autor przetestował i szczegółowo opisał wielostopniową technologię przygotowania powierzchni InAs do badań, co oczywiście miało krytyczne znaczenie dla uzyskania wysokiej jakości danych ARPES. Tym samym autor przyczynił się do możliwości prowadzenia dalszych badań powierzchniowych InAs, a być może także innych półprzewodników III-V. Warto także podkreślić, że choć Autor nie wspomina o tym w rozprawie, ale w pracy [55] jego współautorstwa opisano inną, alternatywną metodę przygotowywania powierzchni od badań ARPES, która dawała jednak gorsze rezultaty.
2. Bazując na opracowanej technologii wstępnego przygotowania powierzchni komercyjnego InAs o orientacji (100) (zarówno niedomieszkowanego jak i domieszkowanego S), obejmującej mokre trawienie i kontrolowane przy pomocy LEED wielostopniowe wygrzewanie, mgr. Wutke dokonał z sukcesem efektywnego domieszkowania powierzchniowego z użyciem trzech różnych pierwiastków VI grupy układu okresowego: S, Se i Te. Procedura domieszkowania, oprócz osadzania pierwiastków ze źródeł elektrochemicznych (S, Se) lub termicznych (Te) obejmowała także serię wygrzewań w warunkach UHV, których celem było z jednej strony usunięcie nadmiarowej ilości pierwiastka, a z drugiej, jak rozumiem, tworzenie wiązań domieszki z InAs.
3. Mgr Dawid Wutke przeprowadził rozległe badania wytworzonych przez siebie struktur domieszkowanego powierzchniowo InAs n-typu, zarówno niedomieszkowanego jak i domieszkowanego S. Podstawowe badania prowadzone były przez niego z użyciem techniki ARPES w systemie UHV wyposażonym w intensywną He lampę wyładowczą UV oraz elektrostatyczny analizator energii elektronów.

4. Kandydat zarejestrował i przedstawił w rozprawie bardzo dobrej jakości wysokorozdzielcze widma ARPES, które jednoznacznie udowodniły powstawanie dwuwymiarowego gazu elektronowego o dużej koncentracji (rzędu 10^{13} cm^{-2}), który obsadzał kilka (do 4) skwantowanych poziomów elektronowych w quasi-trójkątnej studni kwantowej powstałej w wyniku domieszkowania. Badania prowadzone były nie tylko w temperaturze pokojowej (20 °C), ale także w funkcji temperatury, co wymagało specjalnej procedury usuwania z badanej powierzchni osadzających się gazów resztkowych.
5. Mgr Wutke dokonał szczegółowej analizy zebranych widm i w wyniku numerycznego dopasowywania odpowiednich funkcji do krzywych rozkładu energii (ang. energy distribution curve, EDC) dla wszystkich wytworzonych studni wyznaczył parametry charakteryzujące 2DEG: położenie energetyczne minimów pasm (poziomów w studni), szerokości pasma w minimum, wartości wektorów falowych na poziomie Fermiego oraz całkowitą gęstość powierzchniową 2DEG. Oprócz tego Autor wyznaczył położenie pasma walencyjnego oraz wartość ugięcia pasm, a także masy efektywne na dnie poszczególnych pasm.
6. Po odpowiednim zdygitalizowaniu zaobserwowanych w ARPES pasm Autor dopasował do nich jednoelektronowy model $k \cdot p$ Kane'a i stwierdził, że model ten dobrze odtwarza kształt pasm w funkcji k_x . W ramach tego modelu wyznaczone zostały także wartości masy efektywnej, które w granicach błędu były takie same dla różnych domieszek.
7. Dla mnie najciekawszym wynikiem przeprowadzonych badań były konkluzje dotyczące oddziaływań wielociałowych w badanym gazie dwuwymiarowym. Konkluzje te były wynikiem analizy pomiarów widm ARPES dokonanych w funkcji poziomu domieszkowania i w funkcji temperatury w zakresie od -180 °C do $+180 \text{ °C}$. Te ostatnie, jak już wspominałem, były dużym wyzwaniem eksperymentalnym w zakresie bardzo niskich temperatur (ze względu na osadzanie się na powierzchni gazów resztkowych). Jak istotne miało to znaczenie Autor pokazał w podrozdziale 8.3 rozprawy, gdzie prezentowane są zmiany widm ARPES zbieranych po 20, 40 i 60 min. dla próbki utrzymywanej w temperaturze -140 °C i gdzie zaobserwowano poszerzenie pasma o 8 meV (w porównaniu do całkowitej jego szerokości wynoszącej 30 meV).

Mgr Wutke zaobserwował liniową zależność energetycznego położenia minimów poszczególnych pasm w funkcji temperatury, a następnie w celu oceny roli oddziaływanie elektron-fonon wyznaczył temperaturową zależność szerokości pasm. Na podstawie dopasowania liniowej zależności tej szerokości od temperatury, wyznaczył stałe sprzężenia elektron-fonon i na tej podstawie oszacował wartość maksymalnej renormalizacji energii z tymi oddziaływaniami związanej, będącej rzędu jednego meV. Tym samym Autor skonstruował, że efekty tych oddziaływań nie są bezpośrednio widoczne w widmach ARPES.

Oszacowany w dalszej części rozprawy możliwy wpływ oddziaływań elektron-elektron był jeszcze o trzy rzędy mniejszy i wynosił rzędu 3 μeV , przy wyznaczonych eksperymentalnie szerokościach pasm rzędu 28-40 meV.

Dlatego też mgr Wutke wywnioskował, że skoro ani oddziaływania e-e ani e-fonon nie mogą być odpowiedzialne za obserwowaną eksperymentalnie szerokość pasm, musi za to odpowiadać oddziaływanie elektron-donor. Co wydaje się konkluzją dość naturalną, mając na uwadze fakt, że w badanych próbkach elektrony 2DEG nie były przestrzenią rozdzielone od swoich macierzystych donorów, jak ma to miejsce w przypadku elektronów w wysokoruchliwościowych strukturach domieszkowanych modulacyjnie, w których donory są

oddzielone od studni, w której przebywają elektrony przez tzw. „spacer” grubości rzędu 40 nm.

Na potwierdzenie hipotezy o dominującej roli oddziaływań elektron-donor mgr Wutke przedstawił wyniki pomiarów widm ARPES dla różnych koncentracji donorów Te na powierzchni, a tym samym różnej koncentracji 2DEG, gdzie zaobserwował zmianę szerokości pasma dla skrajnych koncentracji sięgająca 10 meV (przy całkowitej szerokości ok 30 meV).

Z obowiązku recenzenta poniżej przedstawiam kilka uwag i pytań, które nasunęły mi się podczas lektury rozprawy i których uwzględnienie mogłoby ułatwić docenienie raportowanych wyników badań, a potencjalnym czytelnikom uczynić rozprawę bardziej zrozumiałą. Chciałbym podkreślić, że poniższe uwagi nie wpływają jednak na moją bardzo pozytywną ocenę wyników naukowych przedstawionych w rozprawie.

1. Na wstępie muszę się przyznać, że choć uważam, że wyniki prezentowane w rozprawie są bardzo ciekawe i wnoszą wkład w rozwój dyscypliny, to mnie forma ich prezentacji sprawiła pewną trudność.
2. Już tytuł rozprawy nie w pełni oddaje jej rzeczywistą treść, albowiem bazując na tytule czytelnik spodziewa się wyników, w szczególności porównawczych, dla większej liczby półprzewodnikowych związków III-V, natomiast znajduje wyniki dla jednego półprzewodnika InAs, o jednej orientacji krystalograficznej (100), jednego typu przewodnictwa n, a jedynie różniących się poziomem domieszkowania (niedomieszkowany i domieszkowany siarką). Według mnie nie uzasadnia to liczby mnogiej w tytule. A może oznacza to, że Kandydat badał, a przynajmniej miał w planach badać, także inne półprzewodniki III-V, ale napotkał jakieś duże trudności w ich przeprowadzeniu, natomiast oryginalnie zaproponowany tytuł pozostał. Taka informacja także byłaby cenna.
3. Jestem także zaskoczony używaniem w pracy pojęciem „gięcia pasm”, będące tłumaczeniem „band bending”. Ja przyzwyczajony jestem do stosowanych w środowisku zwrotów: „ugięcie pasm” czy „wygięcie pasm” oraz „uginanie pasm” czy „zaginanie pasm”. Takie pojęcia pojawiają się w publikacjach polskojęzycznych (wystarczy wpisać do Google). Zresztą nawet we wcześniejszych pracach magisterskich i doktorskich, której promotorem był także Profesor Kołodziej, używany był zwrot „ugięcie pasma” Natomiast używanie zwrotu „gięcie pasm wyniosło” jest dla mnie dziwne i ciekaw jestem skąd się ono wzięło.
4. Moim zdaniem, wstęp teoretyczny, który znalazł się w rozprawie, jest niepotrzebnie na tak podstawowym poziomie, iż bardziej pasowałby do pracy licencjackiej (i to przed specjalizacją w dziedzinie półprzewodników) niż do doktorskiej. Np. wprowadzenie pojęcia masy efektywnej pozostawia wiele do życzenia, a na rys. 3 brakuje opisu osi. Rozprawa bardzo by zyskała, gdyby autor bardziej skupił się na części teorii dotyczącej jego konkretnych badań, a nie wprowadzał podstawowe pojęcia, takie jak półprzewodnik i izolator, i to na poziomie obrazkowym.
5. Autor podaje szereg wzorów, ale w większości brak jest konkretnych ich zastosowań do uzyskania danych prezentowanych na rysunkach, zarówno w części wstępnej pracy jak przy interpretacji wyników.
Np. przy wprowadzaniu pojęcia uginania pasm (w pracy „gięcia pasm”) autor, zamiast konkretnych obliczeń przedstawia jedynie poglądowy rysunek 13, wraz z zaznaczonymi

poziomami w studni quasi-trójkątnej. A pobieżny rzut oka na ten rysunek, już wskazuje, że jest on mylący.

Przecież nawet w studni trójkątnej, energia stanu podstawowego (liczona od dna studni) jest większa niż odległości pomiędzy stanami kolejnymi. A na rysunku 13 stan podstawowy E_1 jest bardzo blisko dna zagiętego pasma elektronowego!

Przecież w tym miejscu można było, nawet nie prowadząc obliczeń w sposób samo uzgodniony, przedstawić obliczenia i zrobić rysunki dla studni trójkątnej (z funkcjami Airy'ego).

Mgr Wutke nie musiał nawet sam pisać programów, bo jak się zorientowałem w grupie prof. Kołodzieja była na ten temat praca magisterska. Inną opcją byłoby skorzystanie z jakiegoś pakietu obliczeniowego, np. „nextnano”.

Wtedy by Kandydat się przekonał, już na etapie pisania wstępu teoretycznego rozprawy, że energia wiązania pierwszego stanu energetycznego w studni quasi-trójkątnej (poszerzającej się ku górze nawet silniej niż trójkątna), musi być istotnie większa niż odległość pomiędzy kolejnymi poziomami.

Co więcej, przecież widać to także na Rys. 5 z pracy [55] współautorstwa mgr. Wutke.

6. Autor nie zawsze wyraża się precyzyjnie. Np. we wstępie na stronie 34 pisze: „Wartości własne energii ϵ_i są dyskretne, co wynika z kształtu potencjału $V(z)$ o przybliżonej charakterystyce „trójkątnej studni”. Tak jakby dla innego niż quasi-trójkątnego kształtu potencjału studni energie nie byłyby dyskretne.
7. Uważam, że w obecnych czasach, szczególnie przez doktorantów wykonujących doktorat na Wydziale Fizyki Astronomii i Informatyki Stosowanej, w elektronicznej wersji rozprawy powinny być stosowane wszystkie udogodnienia dla potencjalnych czytelników, wliczając w to recenzentów.
W szczególności dotyczy to łatwego dostępu do cytowanych referencji. Tak jak w każdym już chyba współczesnym czasopiśmie, tak i w rozprawie doktorskiej nie tylko powinien być zrobiony link z tekstu do cytowanej publikacji na liście referencji, co jest zrobione, ale także link do czasopism dla każdej referencji z listy. Czego niestety w recenzowanej rozprawie zabrakło.
Co więcej powinny być zrobione linki powrotne do miejsc w tekście, w którym dana referencja była cytowana.
Rozumiem, że rozprawa doktorska mgr. Wutke nie posiada tych udogodnień, ponieważ korzystał on z jakiegoś standardowego wzorca wyglądu pracy, przyjętego przez UJ.
Ale żywię nadzieję, że UJ na mój wniosek wprowadzi wspomniane powyżej wymogi do kolejnych rozpraw.
8. Przy opisie technik eksperymentalnych, w którym doceniam podanie nazw i modeli części składowych aparatury ARPES, mnie osobiście zabrakło informacji dotyczącej producenta całości systemu UHV oraz przedstawienia zasad działania źródeł elektrochemicznych używanych do siarki i selenu. Nie są to moim zdaniem zbyt popularne typy źródeł stosowanych w aparaturze UHV. Brak jest też informacji czy były to zakupione źródła komercyjne, czy też źródła własnej produkcji. Mam nadzieję, że podczas publicznej obrony rozprawy mgr Wutke wyjaśni krótko słuchaczom, jak takie źródła działają, a w szczególności, jaką zapewniają czystość osadzanych materiałów w porównaniu z komórkami efuzyjnymi, gdzie pierwiastki używane do domieszkowania w pracy mogą mieć czystość 7N. A jak wiadomo, o czym Autor także wspomina, ilość zanieczyszczeń jest w strukturach 2DEG bardzo istotna.

9. Mam też pytanie, czy mgr Wutke wniósł jakiś wkład w uruchamianie, rozbudowę lub utrzymanie skomplikowanego układu UHV do pomiarów ARPES w gotowości do prowadzenia badań naukowych, w tym także własnych. Uważam bowiem, że tylko w ten sposób osoba wykonująca doktorat może zdobyć prawdziwe doświadczenie, tzw. „hands-on experience” i stać się sprawnym eksperymentatorem.
10. Autor w swojej rozprawie przedstawia wyniki opracowanych przez siebie badań w bardzo suchej formie. Pokazane są w dużej liczbie opracowane, wysokorozdzielcze widma ARPES oraz w tabelkach wyznaczone parametry. Warstwa interpretacyjna jest dość skromna. Co więcej, czasami nie jest jasno napisane, jak te parametry zostały wyznaczone.
11. W paragrafie 6.1 nie jest napisane jasno, w jaki sposób wyznaczane były wartości wektorów falowych dla poszczególnych podpasów i próbek podane w tabeli 6? Czy dokonano tego korzystając ze zdigitalizowanych danych, przedstawionych np. na rys. 35?
Także na str. 95 trudno się zorientować, czy w tabelkach 16 i 17 szerokość pasma wynikająca z oddziaływania e-e jest wyznaczona eksperymentalnie (Autor używa zwrotu: „wyznaczony rząd wielkości”), przez wyznaczenie β z zależności od energii, czy jest po prostu obliczona przez wstawienie do wzoru (101) na β wartości promienia Wignera-Seitza r_s .
12. Skoro Autor bada domieszkowanie powierzchniowe, to należałoby oczekiwać, że przedstawi on wyniki konkretnych, samo-uzgodnionych obliczeń energii poziomów dla studni potencjału na powierzchni, nawet jeśli musiałby wykorzystać w tym celu oprogramowanie, którego nie jest autorem, albo wręcz poprosić o wyniki takich obliczeń przeprowadzonych przez współpracowników. Powinien on być także porównać wyniki takich obliczeń ze swoimi wynikami eksperymentalnymi.
Zupełnie nie rozumiem, dlaczego w treści rozprawy nie znalazły się wyniki obliczeń analogicznych do tych, jakie przedstawione są na Rys. 9 z pracy [56] pt. „Band structure of a non-parabolic two-dimensional electron gas system” Phys. Rev. B **107**, 155139 (2023). Tym bardziej, że mgr. Dawid Wutke jest pierwszym autorem tej pracy, która dotyczy badań tego samego InAs, najprawdopodobniej z takiego samego typu wafera (produkcji MTI Corporation), choć prowadzonych na powierzchni (110) uzyskanej przez przełamanie w próżni. Co więcej praca [56] wysłana została do czasopisma w lipcu 2022 r., więc oprogramowanie do wspomnianych obliczeń musiało już być dostępne wcześniej (być może nawet w roku 2020, kiedy to wysłano do czasopisma pracę [55]).
13. Czy próbowano porównać wyznaczone i podane w tabelce wartości parametru BB (ugięcie pasma przewodnictwa) z przybliżonymi oszacowanymi bazującymi na doborze takiego kształtu potencjału, który dawałby obserwowany ciąg energii $E_1 - E_4$?
Skoro BB zależy od koncentracji domieszek, to czy różnice w ich wartościach dla różnych typów donorów (Te, S. i Se) nie mogą być po części spowodowane, różnicami w uzyskanej koncentracji powierzchniowej, a nie rodzajem domieszki?
14. Chciałbym również otrzymać odpowiedź na pytanie, dlaczego w rozprawie nie znalazły się wspomniane powyżej wyniki dla InAs (110) z Te uzyskane na linii URANOS, a co najmniej jakieś ich podsumowanie i porównanie z wynikami dla InAs (100). Np., czy osadzanie takiej samej ilości domieszki Te, powoduje większe ugięcie pasm, tj. czy domieszkowanie powierzchniowe na powierzchni (110) jest bardziej czy mniej efektywne niż na powierzchni (100). I ogólnie, jak wyniki dla powierzchni (110) mają się do wyników dla powierzchni (100) z rozprawy?

15. Czy podjęta została próba przeprowadzenia badań uzupełniających tego samego typu próbek (tj. o orientacji (100) i trawionych na mokro) z użyciem źródła synchrotronowego? Mając na uwadze szybko postępującą w czasie kontaminację powierzchni próbek użycie znacznie silniejszego źródła promieniowania, niż lampa UV, pozwoliłoby na uzyskanie lepszej jakości widm, szczególnie w niskich temperaturach, w jednym cyklu pomiarowym, tj. bez konieczności odgrzewania próbki. Tym bardziej, że mgr Wutke dysponował walizką próżniową przy pomocy której, jak pisał na str. 56, umieszczał próbki po trawieniu w komorze rękawicowej.
16. Brakuje mi też jakichś szerszych konkluzji z przeprowadzonych badań, niż samo wyznaczanie szeregu parametrów oraz stwierdzenie, że dominują efekty oddziaływania elektron-donor. We wstępie mgr Wutke przywołuje istniejące i możliwe zastosowania 2DEG w elektronice, spintronice i informatyce kwantowej. Czy z badań Autora wynika coś np. dla potencjalnych zastosowań w związku z wykorzystaniem domieszkowania powierzchniowego? Czy są jakieś dalsze plany badań? Czy wiadomo coś na temat ruchliwości elektronów w studni? I czy w ogóle do takich próbek po wyjęciu z aparatury daje się zrobić kontakty elektryczne i czy próbki przewodzą?

W podsumowaniu, pomimo, że jak opisałem powyżej mam pewne uwagi do samej formy prezentacji wyników to absolutnie nie umniejsza to ani jakości ani wartości uzyskanych w pracy wyników naukowych.

Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska pana mgr. Dawida Wutke zawiera nowe i bardzo wartościowe wyniki naukowe dające istotny wkład do postępu w dziedzinie fizyki (oraz inżynierii materiałowej), w szczególności w obszarze badań dwuwymiarowych gazów elektronowych. Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a jej treść potwierdza, że Kandydat posiada także ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Oznacza to, że rozprawa spełnia zarówno wymogi zwyczajowe jak i te określone w art. 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. (z późn. zm.). Dlatego z pełnym przekonaniem wnioskuję o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr. Dawida Wutke zatytułowanej „Badania efektów wielociałowych w dwuwymiarowych gazach elektronowych (2DEG) uformowanych na powierzchniach półprzewodników III-V” do publicznej obrony.

Z poważaniem,



Tomasz Wojtowiec