

Akademickie Centrum Materiałów i Nanotechnologii
dr hab. inż. Marcin Sikora, prof. AGH

Lund-Paryż-Kraków, 12-19.05.2024

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr. Dawida Wutke**

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

Ostatnie dwa dziesięciolecia w badaniach materiałów półprzewodnikowych o nietrywialnych właściwościach w transporcie elektronowym zostały zdominowane przez eksplorację grafenu i materiałów dwuwymiarowych, takich jak chalcogenki metali. Układy takie pozwalają na funkcjonalizację właściwości transportowych poprzez sterowanie kątem pomiędzy wzajemnym ułożeniem kierunków krystalograficznych kolejnych warstw. W ten sposób w unikalnym układzie materiałowym możliwe jest uzyskanie zarówno nadprzewodnictwa, jak i stanu normalnego metalu, czy półprzewodnika o bardzo wysokiej ruchliwości nośników, w zależności od topologii. Jednak opanowanie technologii masowego wytwarzania układów elektronicznych z tego typu struktur wydaje się nierealne w ciągu najbliższych kilkunastu lat, w których spodziewane jest załamanie wykładniczego przyrostu wydajności mikroprocesorów ze względu na ograniczenia fizyczne technologii wykorzystujących domieszkowany krzem. Stąd niezwykle istotne jest prowadzenie badań w zakresie alternatywnych materiałów półprzewodnikowych - szczególnie tych, których właściwości transportowe mogą być modyfikowane w kontrolowany sposób w skali nanometrycznej przy użyciu obecnie dostępnych narzędzi nanotechnologii.

Do takich materiałów, które są badane od lat 60-tych XX wieku zaliczają się półprzewodniki typu III-V, a szczególnie te z nich, w których obserwowany jest dwuwymiarowy gaz elektronowy. Gaz taki charakteryzuje się ruchliwością nośników o kilka rzędów wielkości większą niż elektronów w domieszkowanym krzemie oraz wykazuje kwantowe efekty w transporcie elektronowym w temperaturze wyższej od ciekłego helu i w relatywnie niewielkich polach magnetycznych. Stąd renesans zainteresowania tymi materiałami, jako w aspekcie konstrukcji komputerów kwantowych dużej skali.

Dwuwymiarowy gaz elektronowy może być w układach półprzewodników III-V obserwowany zarówno w heterostrukturach, jak i na powierzchni. O ile badania

tego stanu w międzywierzchniach i studniach kwantowych zaowocowały licznymi publikacjami, to artykuły prezentujące właściwości gazu elektronowego na powierzchni są nadal nieliczne. Wynika to przede wszystkim z niezwykle dużej komplikacji takich eksperymentów, szczególnie w odniesieniu do procedur „utrzymania czystości” na powierzchni kryształów, modyfikowanych i charakteryzowanych w układach ultra-wysokiej próżni. Rozprawa doktorska Dawida Wutke prezentuje wyniki właśnie takich, bardzo wyrafinowanych i czasochłonnych eksperymentów. Ich celem było zbadanie właściwości dwuwymiarowego gazu elektronowego, który był wytwarzany na powierzchni kryształów stechiometrycznego i domieszkowanego siarką arsenku indu w wyniku nanoszenia siarki, selenu i telluru.

Główną zastosowaną metodą badawczą była kątowno rozdzielcza spektroskopia fotoemisyjna. Za jej pomocą możliwe było zaobserwowanie pasm o nieparabolicznej relacji dyspersji elektronowych stanów powierzchniowych, które doskonale odtwarzały relację $k \cdot p$ Kane’a. Na powierzchni kryształów InAs domieszkowanych siarką widoczne były dwa tego typu pasma, a na powierzchni kryształów niedomieszkowanych aż cztery. Dla każdego z pasm zbadano położenia minimów energetycznych, szerokość i ugięcie oraz wyznaczono masę efektywną elektronów na dnie pasma. W temperaturze 20°C najwyższe wartości tych parametrów zaobserwowano dla układów z siarką, nieznacznie mniejsze dla układów z selenem, a najmniejsze dla układów wykorzystujących tellur.

Dodatkowo przeprowadzone zostały badania w funkcji gęstości domieszek, których celem było określenie energii oddziaływania elektron-donor, oraz w funkcji temperatury, których celem było oszacowanie stałych sprzężenia i parametrów renormalizacji w wyniku oddziaływania elektron-fonon. Energia oddziaływania elektron-fonon i elektron-donor (rzędu meV) jest znacząco mniejsza od szerokości pasm (bliskiej 50meV), ale też istotnie większa od energii oddziaływania elektron-elektron (rzędu μ eV). W mojej opinii są to najbardziej wartościowy wynik recenzowanej rozprawy.

Praca doktorska mgr. Dawida Wutke jest interesującą lekturą o niewątpliwym walorze dydaktycznym. Poza opisem teoretycznym zjawiska fotoemisji i jej zależności kątowej, przedstawione są również podstawowe modele teoretyczne opisujące właściwości transportowe dwuwymiarowego gazu elektronowego i jego relację dyspersji. Szczegółowo prezentowane są również wyniki badań dyfrakcji niskoenergetycznych elektronów i ich interpretacja umożliwiająca jednoznaczne określenie uporządkowania atomowego na powierzchni kryształów. Klarowność przedstawionych informacji i ich uporządkowana struktura jednoznacznie świadczą o wysokiej ogólnej wiedzy teoretycznej autora w zakresie zagadnień naukowych badanych w projekcie doktorskim.

Natomiast o jego samodzielności w zakresie prowadzenia pracy naukowej jednoznacznie świadczy opis metodologii prowadzonych badań i prezentacji uzyskanych wyników, w tym prosty, ale wyczerpujący opis układu eksperymentalnego oraz przejrzyste graficzne przedstawienie metodyki wykorzystanej do analizy skomplikowanych wielowymiarowych widm. Przy tej okazji warto wyróżnić opis procedury przygotowania powierzchni InAs, poczynawszy od metod jej oczyszczania z adsorbatów, przez sposoby uzyskiwania pożądanej

terminacji, aż po techniki wykorzystane do zapobiegania wpływowi adsorpcji wodoru w niskich temperaturach na badane widma.

O oryginalności rozwiązania postawionego problemu naukowego wystarczająco świadczy fakt, że wyniki prezentowanych w rozprawie eksperymentów były podstawą kilku publikacji naukowych w renomowanych czasopismach z zakresu fizyki materii skondensowanej. Na wyróżnienie zasługuje w tym aspekcie artykuł pt. *Band structure of a nonparabolic two-dimensional electron gas system* opublikowany w Physical Review B w roku 2023, którego Dawid Wutke jest pierwszym autorem.

Zadaniem recenzenta jest również krytyczne spojrzenie na ocenianą rozprawę i dostrzeżenie jej słabych stron. Dostrzegam dwa istotne mankamenty. Pierwszym jest skromna dyskusja uzyskanych wyników w odniesieniu do właściwości dwuwymiarowego gazu elektronowego obserwowanego w innych układach, zarówno na powierzchni jak i w heterostrukturach. Drugim jest bardzo lakoniczny sposób opisu metod i sposobu kontroli parametrów procesów depozycji siarki, selenu i telluru. Wśród innych drobnych mankamentów dostrzegłem jeszcze błędy w zakresie bibliografii - brak informacji o stronach i numerach wolumenów w kilku pozycjach. Podawane są jednak tytuły artykułów, dzięki czemu można je jednoznacznie zidentyfikować, co czyni to uchybienie mało istotnym. Wymienienie tych mankamentów było dla mnie zadaniem trudnym, gdyż rozprawę Dawida Wutke, dzięki przejrzystej kompozycji, prostemu acz starannemu sposobowi opisu właściwości i modeli teoretycznych, czytelnym rysunkom i bardzo dużej staranności w systematycznym zaprezentowaniu wyników eksperymentów, czytałem z dużą przyjemnością.

Podsumowując moją opinię stwierdzam, że recenzowaną rozprawę należy ocenić pozytywnie w aspekcie wszystkich trzech elementów określonych przez Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, tj. (i) w aspekcie prezentacji ogólnej wiedzy teoretycznej autora, (ii) umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej oraz (iii) oryginalnego rozwiązania problemu naukowego. Uważam że rozprawa doktorska pt. *Badania efektów wielodziałowych w dwuwymiarowych gazach elektronowych (2DEG) uformowanych na powierzchniach półprzewodników III-V* spełnia wymagania formalne stawiane rozprawom doktorskim, a mgr Dawid Wutke zasługuje na stopień doktora nauk fizycznych. Wnoszę więc o dopuszczenie recenzowanej rozprawy do publicznej obrony.

Signed by / Podpisano
przez:

Marcin Andrzej Sikora
Akademia Górniczo-
Hutnicza im.
Stanisława Staszica w
Krakowie

Date / Data:
2024-05-19 03:49