



UNIwersytet Warszawski

Wydział Fizyki
Prof. dr hab. Adam Babiński

Warszawa, dnia 8.5.2024

Recenzja pracy doktorskiej mgr. Abinash Adhikari

Mgr **Abinash Adhikari** przedstawił pracę doktorską zatytułowaną *Bandgap tunability and properties of (Cd, Mg) random alloys and quasi-ternary alloys – {CdO/MgO} superlattices – obtained by MBE*.

Praca gromadzi wyniki badań materiałów opartych na tlenku kadmu (CdO) i tlenku magnezu (MgO) otrzymywanych w różnych warunkach technologicznych techniką plasma-assisted Molecular Beam Epitaxy (MBE). Jej główny nacisk położony jest na badanie wpływu tych warunków, a także zastosowanego podłoża na wartość przerwy energetycznej w materiałach zarówno w stopach jak i super-sieciach złożonych z tych materiałów. Praca składa się z sześciu rozdziałów wzbogaconych o bibliografię i inne dodatkowe informacje jak np spis rysunków czy tabel.

Rozdział 1 stanowi wstęp poświęcony motywacji podjęcia tematu oraz podstawowym własnościom CdO, MgO i ich stopów.

W Rozdziale 2 omówiona jest metoda wzrostu - epitaksja z wiązek molekularnych i techniki doświadczalne używane do charakteryzacji uzyskanych struktur. Oba te tematy zostały potraktowane w wielce dydaktyczny sposób i doskonale wprowadzają czytelnika w tematykę rozprawy, choć miejscami brakuje Autorowi precyzji wypowiedzi.

Wyniki uzyskane w pracy i ich analiza przedstawiona została w kolejnych trzech rozdziałach: w Rozdziale 3 przedstawiono studium dotyczące własności CdO wyhodowanego na różnych podłożach: szafirze o różnych orientacjach krystalograficznych, kwarcu i krzemie ze szczególnym, uwzględnieniem struktur wytworzonych na szafirze o orientacji $m(10\bar{1}0)$. Struktury uzyskane w różnych warunkach technologicznych. W Rozdziale 4 znajdziemy wyniki podobnej analizy własności stopów CdO i MgO wyhodowanych na podobnych podłożach.

W Rozdziale 5 zaprezentowano wyniki badań super-sieci CdO/MgO wyhodowanych na szafirze i MgO. Pokazano w nim jak rodzaj podłoża, a także grubość warstw CdO wpływa na własności tych super-sieci w tym na szerokość przerwy energetycznej. Interesującym rozszerzeniem tych badań są wyniki pomiarów optycznych wykonanych w warunkach ciśnienia hydrostatycznego. Wyznaczony został współczynnik ciśnieniowy przerwy energetycznej super-sieci CdO/MgO, zaś wyniki doświadczalne porównano z wynikami teoretycznymi uzyskanymi w ramach współpracy z grupą teoretyczną.

Rozprawa jest podsumowana w Rozdziale 6.

Forma pracy jest poprawna, a spis literatury, który obejmuje 378 pozycji imponujący. Wrażenie robi jej rozmiar, choć jak się wydaje dysertacja nie straciłaby na swojej wadze, gdyby liczyła mniej niż prawie 200 stron, za to jak zostanie wskazane później, większy nacisk położono w niej na precyzję przekazu.

Oceniając zawartość merytoryczną przedstawionej pracy należy wyrazić ogromne uznanie za bogactwo przedstawionych w niej wyników. Autor wyhodował szereg struktur, a następnie scharakteryzował je wykorzystując szeroki zakres technik. Są tu więc zarówno wyniki badań morfologii (SEM, AFM, EDX, SIMS, TEM, XRD), własności elektrycznych i optycznych dające wgląd we wpływ warunków wzrostu na różne parametry uzyskanych struktur. Wyniki uzyskane w pracy zostały opublikowane w sześciu artykułach, które ukazały się w uznanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym w latach 2021-2023.

Bardziej krytycznie przychodzi ocenić sposób analizy wyników pomiarów optycznych i w pewnym stopniu elektrycznych. Nie do końca jest przykładowo zrozumiały sposób analizy wyników pomiarów transmisji i odbicia zaprezentowany w Rozdziale 2. Przytoczono tam wzór (2.14) na współczynnik transmisji T :

$$T = \frac{I}{I_0},$$

w którym I_0 jest natężeniem światła **padającego** na próbkę, a I natężeniem światła przechodzącego przez próbkę. Autor przytacza dalej prawo Beera-Lamberta opisujące natężenie światła w materiale w funkcji jego grubości (t):

$$I = I_0 e^{-\alpha t},$$

wykorzystując je w sposób bezpośredni do wyznaczenia współczynnika absorpcji α . Nie jest jednak jasne czy Autor w swej analizie bierze pod uwagę, że w doświadczeniu światło wchodząc do ośrodka przechodzi przez powierzchnię graniczną pomiędzy tym ośrodkiem, a otoczeniem. Jeśli współczynnik odbicia światła na tej granicy (mierzony także w eksperymencie Autora) oznaczymy jako R , to odbicie na tej granicy spowoduje, że natężenie światła wchodzącego do ośrodka równe będzie $I_0(1 - R)$. Jeśli druga granica pomiędzy ośrodkami znajduje się w odległości t od pierwszej (co odpowiada grubości próbki), to natężenie światła w ośrodku po dotarciu do drugiej granicy będzie osłabione o czynnik $\exp(-\alpha t)$. Przyjmując, że współczynnik odbicia nie zależy od kierunku padania światła na powierzchnię graniczną, natężenie światła wychodzącego z próbki wynosić będzie zatem $I_0(1 - R)^2 \exp(-\alpha t)$, co odpowiada transmitancji

$$T = (1 - R)^2 \exp(-\alpha t).$$

Nie jest jasne czy Autor wziął pod uwagę ten fakt w swojej analizie, brak też jasnego uzasadnienia zaniedbania wielokrotnych odbić światła poruszającego się w ośrodku. Jak się wydaje może mieć to znaczenie w analizie absorbancji w przypadku niektórych wyników. Przykładowo współczynnik odbicia R dla próbki C6 (Fig 3.8) dla $\lambda=550$ nm wynosi około 20%, co daje współczynnik $(1 - R)^2 = 0.64$. Uwzględnienie, bądź nieuwzględnienie tego czynnika w analizie pomiarów transmisji może prowadzić do istotnej różnicy wartości wyznaczanego w pracy współczynnika absorpcji.

Pewne wątpliwości mogą się pojawić także przy oceny wiarygodności niektórych wyników analizy własności badanych materiałów. Przykładowo: na str. 68, Fig.3.9. Autor przedstawia te same dane doświadczalne (współczynnik absorpcji zmodyfikowany energią) w dwóch różnych formatach (kwadrat oraz pierwiastek). Zgodnie z przedstawioną teorią interpolacja liniowej części tych zależności powinna dać odpowiednio wartość przerwy prostej lub skośnej. Dla jednej z próbek takie dopasowanie sprawia wrażenie obejmującego taki sam zakres energii (od 2.2 eV do 2.4 eV). Nie jest jasne w jaki sposób pewna zależność eksperymentalna może być w tym samym zakresie energii

równie dobrze opisana funkcją kwadratową jak i pierwiastkową. Dodatkowo należy wskazać, że w podobnej analizie przedstawionej na str. 104 (Fig.4.9), gdzie tym razem współczynnik absorpcji nie jest modyfikowany energią, zakresy, w których wykonane jest dopasowanie są istotnie różne, co wydaje się bardziej intuicyjne.

Na str. 79, Fig.3.17 (b) i (d) liniowe dopasowanie przedstawionych punktów jest daleko nieprzekonujące. Jednoczesny brak niepewności pomiarowych pokazanych punktów dodatkowo poddaje w wątpliwość wiarygodność wartości wyznaczonych z takiego dopasowania.

Na str. 83, Fig. 21 dopasowanie zależności energii przerwy E_g od temperatury wzorem Varshniego (3.27) w całym zakresie temperatur nie jest przekonujące. Jak się wydaje, w najwyższych temperaturach pojawia się dodatkowy efekt, który załamuje stosowność tego modelu. Wiara Autora w wynik dopasowania numerycznego bez refleksji nad jego jakością zdaje się umniejszać znaczenie wyciąganych z nich wniosków.

Pewne zastrzeżenia może także budzić precyzja edycji przedstawionej dysertacji. Na str. 71 oś pionowa szeregu rysunków Fig. 3.12 jest oznaczona niewłaściwie. Np. Fig.3.12(a) i (e) skala wydaje się być nieliniowa, Fig.3.12(b) i (c) nie niosą żadnej wartości dodanej, gdyż nieznaną jest skala pionowa. Dodatkowo brak krzywych dopasowujących zależności temperaturowe ruchliwości znacznie utrudnia ocenę wiarygodności tych dopasowań. Nieznana jest n.p. wiarygodność opisu zależnością $T^{-0.24}$ ewolucji temperaturowej ruchliwości na Fig. 3.12(d). Na str. 68, Fig. 3.9 w opisie osi pionowej zdaje się brakować kwadratu w jednostkach eV.

Dodatkowo znaleźć można w dysertacji szereg zdań, które są nieprecyzyjne, nie są właściwie uzasadnione, czy wręcz niezrozumiałe. Przykładowo:

- Str 10: Wzór (1.2): Nie jest jasne w jakim standardowym półprzewodniku paraboliczna zależność dyspersyjna elektronów opisywana jest masą spoczynkową elektronu m_0 . Ponadto nieoczywiste jest przyjęcie energii $E(k=0)=-E_g/2$

-Str 15: „In the type III-SI (broken gap), the highest of the valence band edge is located in one material, whereas the lowest of the conduction band edge is located in another material...” Jak to pokazuje Fig. 1.5. jest to cecha charakterystyczna także studni kwantowej typu II.

- Str 16: „...in solar cells the photon energy close to the bandgap energy is converted to electricity”. Pojęcie elektryczności w tym kontekście nie wydaje się być precyzyjne.

- Str 17” “the dopant has more valence electrons than the host material” oraz “the dopant has fewer valence electrons which induces vacancies or holes in the semiconductor”. Pojęcia wakansji i dziury w półprzewodniku zdają się odnosić do istotnie różnych obiektów.

- Str. 45 “When the focused electron beam hits the core of the sample, it results in knocking off an electron from the inner shell of the atom, leaving a positively charged hole behind. The hole attracts higher energy electrons from an outer shell to fill its vacancy”.

- Str. 73 „Unlike carrier concentration, carrier mobility is an important parameter for the semiconductor:” Nie jest zrozumiałe zróżnicowanie ważności obu parametrów.

- Str. 80 We wzorze (3.24) rozmiar ziarna oznaczony jest τ , we wzorze (3.25), dwie linie niżej pojawia się symbol D .

- Str. 84 Nie jest jasne znaczenie funkcji $F(R)$ pojawiającej się w analizie własności optycznych warstw CdO, w odróżnieniu od $f(R)$ wyjaśnionego na str. 40.

- Wielkość λ opisuje zarówno średnią drogę swobodną (str. 21) jak i długość fali (str. 33). Mimo różnych kontekstów w ramach jednej pracy wypada unikać takich niespójności.

Podsumowując, niewątpliwie silną stroną przedstawionej pracy jest rozmiar wysiłku technologicznego związanego ze wzrostem struktur CdO/MgO w różnych warunkach technologicznych. Na wysoką ocenę zasługują wyniki wielowątkowych badań morfologicznych ujawniających szczegóły mikroskopowe uzyskiwanych struktur. Interesujące są także wyniki badań elektrycznych i optycznych. Uzyskane wyniki z pewnością mogą być przydatne w dalszych działaniach prowadzących do optymalizacji uzyskiwanych struktur pod kątem ich zastosowań w szeroko pojętej optoelektronice. Pewien niedosyt pozostawia sposób analizy uzyskanych wyników a także ich prezentacja w dysertacji.

Oceniając wzajemną wagę obu tych elementów stwierdzam, że recenzowana praca spełnia wszystkie kryteria właściwe dla rozpraw doktorskich i wnoszę o jej przyjęcie, dopuszczenie do publicznej obrony i kontynuowanie właściwych czynności w ramach przewodu doktorskiego mgr. Abinasha Adhikari.

Podpis jest prawidłowy

Dokument podpisany przez Adam
Babiński; UW
Data: 2024.05.08 23:09:30 CEST

