

Prof. dr hab. Mirosław Zajączkowski
Instytut Fizyki UMCS, Lublin

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Zyberta zatytułowanej

“Przejścia magnetoptyczne w strukturach zawierających wiele studni kwantowych”

Recenzowana rozprawa doktorska powstała na Wydziale Matematyczno-Przyrodniczym Uniwersytetu Rzeszowskiego (UR) pod kierunkiem dra hab. Eugeniusza Szeregija. Jej tematyka koncentruje się na eksperymentalnych badaniach zjawisk magnetotransportu i wewnątrzpasmowych przejść magnetoptycznych w układzie składającym się z 10 sprzężonych (tunelujących) studni kwantowych typu GaAs/AlGaAs. Wyżej wspomniana heterostruktura (supersieć) została wytworzona metodą PL-MOVPE w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie. Struktura była jednorodnie domieszkowana krzemem. Niskotemperaturowe (od 0,3 do 6 K) pomiary zjawisk magnetotransportowych przeprowadzono w Centrum Dydaktyczno Naukowym Mikroelektroniki i Nanotechnologii UR w polach magnetycznych do 10 T. Pomiary magnetoptyczne przeprowadzono w Instytucie Impulsowych Pól Magnetycznych w Narodowym Laboratorium Los Alamos (LANL) w USA. Aparatura istniejąca w wyżej wspomnianym ośrodku pozwala na przeprowadzanie niskotemperaturowych pomiarów magnetoabsorpcyjnych w impulsowych (milisekundowych) polach magnetycznych o natężeniach sięgających 300 T.

Wyniki prezentowane w rozprawie zostały opublikowane w dwu wieloautorskich artykułach, które ukazały się w czasopiśmie z tzw. listy filadelfijskiej - Physica E 44, 2056 (2012) [Ref. 62] i Phys. Rev. B 95, 115432 (2017) [Ref. 126]. Doktorant jest pierwszym autorem w obu publikacjach. Liczba autorów pierwszej z wymienionych prac wynosi 4, drugiej 11. W tym kontekście bardzo pozytywnie należy odnotować fakt, że we wstępie (str. 9) mgr inż. M. Zybert wyraźnie określa swój udział w badaniach prezentowanych w rozprawie. Doktorant wykonał pomiary magnetotransportowe i magnetoabsorpcyjne oraz wniósł istotny wkład do obliczeń analitycznych i numerycznych potrzebnych do interpretacji pomiarów magnetoptycznych.

Na liczącą 89 stron i 45 rysunków rozprawę składa się, obok wstępu, pięć rozdziałów, podsumowanie oraz wykaz bibliografii zawierający 126 pozycji. Zasadniczą treść rozprawy poprzedza krótkie, półstronicowe streszczenie w języku polskim i angielskim. Zauważyłem pewne różnice pomiędzy polską i angielską wersją tego streszczenia. Między innymi, wersja

polska kończy się stwierdzeniem, że celem badań rozprawy jest zinterpretowanie przejść magnetoptycznych w obszarze podczerwieni i stworzenie ogólnego obrazu stanów elektronowych w badanych strukturach. Natomiast w wersji angielskiej jest tylko mowa o interpretacji przejść magnetoptycznych w obszarze podczerwieni, co moim zdaniem bardziej odpowiada zawartości rozprawy.

W pierwszym rozdziale omawiane są fizyczne aspekty wewnątrzpasmowych zjawisk transportowych i optycznych zachodzących w domieszkowanych studniach kwantowych umieszczonych w polach magnetycznych.

W jednostronicowym rozdziale drugim autor precyzuje cele badawcze rozprawy. Są nimi: (a) wyznaczenia podstawowych parametrów wielowarstwowej heterostruktury (supersieci) poprzez pomiary magnetotransportowe w słabych ($\lesssim 10$ T) polach magnetycznych, a następnie (b) określenie poziomów elektronowych MQW w ultra silnych (≈ 100 T) polach magnetycznych poprzez pomiary magnetoptyczne. Nie ulega wątpliwości, że tematykę rozprawy należy uznać za aktualną i interesującą. Niemniej jednak, akcentowałbym raczej jej duże walory poznawcze, a nie aplikacyjne, jak czyni to autor w rozdziale drugim i we wnioskach końcowych rozprawy.

Rozdział trzeci zawiera opis aparatury i próbek. Natomiast w rozdziale czwartym prezentowana jest interpretacja pomiarów magnetotransportowych. Najważniejsze wyniki rozprawy zawarte są w rozdziale piątym i kończących rozprawę wnioskach końcowych.

W mojej opinii rozdział pierwszy i część rozdziału czwartego dotycząca interpretacji pomiarów QEH stanowią najslabszą część rozprawy, zarówno pod względem merytorycznym, jak i edytorskim. Niemniej jednak należy podkreślić, że zawarte w nich usterki nie mają w zasadzie negatywnego wpływu na najważniejsze wyniki rozprawy. Z obowiązku recenzenta omawiam je (choć w bardzo skrótowy sposób) poniżej. Rozpocznę od kilku wybranych usterek edytorskich odnoszących się zarówno do rozdziału pierwszego, jak i do całej rozprawy. Do tego typu usterek można np. zaliczyć fakt, że duża część rysunków pochodzących z prac innych autorów posiada niepełne opisy oraz to, że zbyt często pojawiają się błędny w przepisywaniu wzorów z prac innych autorów (patrz np. wzory I-22 i I-44). Utrudnia to niewątpliwie czytanie rozprawy i zmusza czytelnika do sięgania po teksty źródłowe. Szkoda, że sam autor, powołując się na prace innych autorów, nie sięga, w wielu przypadkach, do tekstu oryginalnego. Przykładowo, rysunek I-7 nie jest kopiowany z oryginalnej pracy (Ref. 65), ale z pozycji książkowej [54], w której błędnie podano, że pomiary magnetotransportowe wykonano w temperaturze 4 K, a nie 50 mK.

Ponadto, w oznaczeniach stosowanych w pracy panuje duży bałagan, np. identycznymi symbolami znakowane są różne wielkości fizyczne i odwrotnie - ta sama wielkość fizyczna oznaczana jest różnymi symbolami. Przykładowo, krawędzie podpasm oznaczane są zamiennie symbolami ε_j i E_j . Symbolem E_j oznaczane są też energie poziomów Landaua. Należy również zauważyć, że ponieważ praca napisana jest w języku polskim, to do zapisu ułamków dziesiętnych autor powinien używać przecinka, a nie kropki. Obszerny, dwustronicowy zestaw usterek drukarskich, stylistycznych i terminologicznych, zauważonych w recenzowanej rozprawie zawiera załącznik.

Zanim przejdę do omówienia kilku, moim zdaniem, istotnych usterek natury merytorycznej, odnoszących się do sposobu obliczeń widma energetycznego skończonych supersieci i interpretacji pomiarów magnetotransportowych, chcę zauważyć, że przegląd literatury dotyczącej kwantowego efektu Halla (QHE) w supersieciach o skończonej liczbie studni kwantowych (N_{QW}) jest szczątkowy. Uważam, że omawiana przez doktoranta bibliografia powinna zawierać również prace innych autorów poświęcone wyżej wspomnianej tematyce. Przykładowo, można tu wymienić następujące pozycje: H.L. Störmer et al., Phys. Rev. Lett. **56**, 85 (1986) {Sto86}; R.J. Matyi & M.A. Reed, Superlattices and Microstructures **3**, 535 (1987) {Mat87}; S.E. Ulloa & G. Kirichenow, Phys. Rev. B **37**, 8337 (1988) {Ull88}; Yu.A. Pusep et al., J. Appl. Phys. **104**, 063702 (2008) {Pus08} oraz S. Wiedmann et al., Phys. Rev. B **80**, 245306 (2009) {Wie09}. Uważam, że umieszczając wyżej wspomniane prace w bibliografii można by jednocześnie zrezygnować z innych pozycji (np. prace [4], [24], [46], [51], [52]), które są bardzo luźno związane z tematyką rozprawy.

Omawiając literaturę dotyczącą obliczeń poziomów energetycznych w układach tunelujących studni kwantowych, autor dokładnie referuje jedynie najprostszy przypadek - podwójnej studni kwantowej ($N_{\text{QW}} = 2$). Dla układu nieskończonej supersieci prezentowane są jedynie wyniki modelowych obliczeń numerycznych. Takie podejście częściowo tłumaczy fakt, że analityczne rozwiązanie problemu przy $N_{\text{QW}} > 2$ prezentowane jest w literaturze tylko dla potrójnej studni kwantowej (patrz np. wspomniana już wcześniej praca {Wie09}). Niemniej jednak, użyteczne wyniki udaje się otrzymać bazując na analogii pomiędzy tunelującymi studniami kwantowymi, a sprzężonymi rezonatorami optycznymi. Korzystając z podejścia opierającego się na przybliżeniu ciasnego wiązania [patrz T. Kamalakis et al., IEEE J. Quant. Electr. **41**, 1419 (2005); Proc. SPIE **6128**, 61280F-1 (2006)] można wyprowadzić następujące wyrażenie na energie n -tego stanu ($n = 1, \dots, N_{\text{QW}}$) w podstawowym minipaśmie: $\mathcal{E}_n = E_1 - \Delta_{\text{SAS}} \cos[n\pi/(N_{\text{QW}} + 1)]$,

gdzie Δ_{SAS} jest rozszczepieniem podstawowego poziomu w układzie z $N_{\text{QW}} = 2$ a E_1 jest energią powyższego poziomu przy braku tunelowania. Powyższy wzór odtwarza wyniki analityczne dla układów o $N_{\text{QW}} = 2, 3$ i $N_{\text{QW}} \gg 1$, oraz numeryczne dla układów o $N_{\text{QW}} > 3$ [patrz np. F. Flory et al., Appl. Opt. **50**, C129 (2011)]. Wpływ oddziaływania $e-e$ na Δ_{SAS} można częściowo uwzględnić, korzystając, tak jak to czyni doktorant, z wyników pracy [57], tzn. zastępując Δ_{SAS} przez rozszczepienie ($\Delta_{\text{SAS}}^{e-e}$) obliczone z uwzględnieniem oddziaływania elektron-elektron. Należy bardzo mocno podkreślić, że zarówno metoda ciasnego wiązania, jak i numeryczne metody rozwiązania równania Schrödingera przewidują, że w układzie składającym się z N_{QW} studni, tunelowanie rozszczepia każdy poziom na N_{QW} podpoziomów, przy pominięciu formowania się stanów powierzchniowych [patrz np. P. Pfeffer & W. Zawadzki, Semicond. Sci. Technol. **24**, 1 (2009); {Ul88}; Refs. 54-56].

Niestety, w recenzowanej pracy wykorzystano, bez krytycznej konfrontacji z pracami innych autorów, odmienne od wyżej wspomnianego podejście, w którym zakłada się istnienie niezależnych oddziaływań pomiędzy poszczególnymi parami studni kwantowych. Zastosowanie takiego "egzotycznego" podejścia prowadzi do pojawienia się $2(N_{\text{QW}} - 1)$ poziomów energetycznych w każdym minipasma. W przypadku 10 tunelujących studni będzie to zatem 18 a nie 10 poziomów. Warto również podkreślić, że przy dużej liczbie studni kwantowych ($N_{\text{QW}} \geq 10$), szerokość minipasma, przewidziana przez podejście korzystające ze standardowej metody ciasnego wiązania, jest bliska $2 \times \Delta_{\text{SAS}}^{e-e}$. Dla porównania, metoda wykorzystywana w rozprawie daje wartość dwukrotnie mniejszą. Jest to o tyle istotne, że szerokość plateau w QEH maleje ze wzrostem szerokości minipasma (patrz np. {Sto86}, {Mat87}). W celu otrzymania dobrego dopasowania wyników teoretycznych do krzywych doświadczalnych oporu Halla, doktorant zmuszony był przyjąć, że degeneracja spinowa poziomów s jest równa 1, pomimo tego, że w doświadczeniu nie zaobserwowano rozszczepienia spinowego. Powyższe postępowanie doprowadziło doktoranta do wniosku, że plateau Halla powinno być obserwowane przy współczynnikach wypełnienia równych całkowitym wielokrotnościom 18, np. $\nu = 72, 90, 126 \dots$. Dla porównania, jeśli zastosujemy, tak jak to ma miejsce we wspomnianych już wcześniej publikacjach, standardowe podejście i uwzględnimy fakt, że $s = 2$ przy braku rozszczepienia spinowego, to otrzymamy również bliskie wynikom eksperymentalnym wartości współczynnika wypełnienia: $\nu = 80, 100, 120 \dots$

Uważam, że wbrew sugestiom autora (patrz Podsumowanie na str. 62), wyniki pomiarów

magnetotransportowych są w minimalnym stopniu wykorzystane przy analizie pomiarów magnetoabsorpcyjnych. Powyższą opinię wydaje się potwierdzać następujący fakt. Tabela 2 umieszczona na stronie 62 recenzowanej rozprawy podaje, że ruchliwość i koncentracja dwuwymiarowego gazu elektronowego w strukturze Nr 151 wynoszą odpowiednio $1,7 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ i $3,6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Natomiast w Ref. 126 (na której opiera się część rozprawy poświęcona magnetoabsorpcji) podane są następujące wartości: $5 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ i $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$. Jeszcze inne wartości wyżej wspomnianych parametrów zawiera tabela 3 pracy Ref. 62: $4,3 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ i $9,4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$. Uważam, że przy interpretacji pomiarów magnetoptycznych, autor, w sposób niejawni, korzysta jedynie z założenia, iż tylko podstawowe minipasmo jest obsadzone. W tym kontekście tytuł rozprawy można potraktować jako zbyt zawężony, gdyż nie akcentuje on prowadzenia przez doktoranta, dosyć luźno powiązanych z pomiarami magnetoptycznymi, pomiarów magnetotransportowych.

Jak już wspomniałem, najważniejszą część rozprawy stanowi rozdział piąty o tytule *Badanie przejść magnetoptycznych w strukturach z wieloma studniami kwantowymi*, niewiele różniącym się od tytułu rozprawy. Zawartość tego rozdziału pokrywa się praktycznie z zawartością pracy [126] opublikowanej w prestiżowym czasopiśmie Phys. Rev. B. W związku z powyższym ograniczę się do wyliczenia najważniejszych osiągnięć prezentowanych w tym rozdziale, a tym samym i w całej rozprawie. Podzielam opinię doktoranta, że powyższe osiągnięcia można sformułować następująco:

- Wykonanie, na unikalnej w skali światowej aparaturze, pomiarów magnetoabsorpcji wewnątrzpasmowej, w obszarze ultra silnych pól magnetycznych i niskich temperatur, w jednorodnie domieszkowanych supersieciach.
- Staranne opracowanie otrzymanych wyników pomiarowych w oparciu o adekwatne wielopasmowe modele **Pp** i **kp**, uwzględniające zarówno rezonans cyklotronowy, jak i przejścia magnetoptyczne pomiędzy stanami donorowymi.
- Pokazanie, że otrzymane wyniki nie tylko porządkują naszą wiedzę z zakresie wewnątrzpasmowej magnetoptyki supersieci, ale również jednoznacznie wskazują na istnienie nieobserwowanych wcześniej przejść pomiędzy stanami donorowymi zlokalizowanymi w barierze.

Niewątpliwie, wysoki poziom merytoryczny omawianych wyżej badań był w dużym stopniu związany z faktem, iż doktorant korzystał z bardzo solidnych metod i technik badawczych. Nie bez znaczenia było też wsparcie merytoryczne, jakie doktorant otrzymał od pra-

cowników IF PAN będących światowej klasy ekspertami w zakresie magnetoptyki układów półprzewodnikowych. Z drugiej strony, na bardzo mocne podkreślenie zasługuje duża aktywność i samodzielność doktoranta w zakresie pozyskiwania środków, w tym również ze źródeł zagranicznych (Narodowa Fundacja Nauki USA), na badania magnetoptyczne wykonane w Los Alamos National Laboratory. Jedyna istotniejsza krytyczna uwaga dotycząca omawianego rozdziału związana jest z faktem, że autor interpretując pomiary magnetoabsorpcyjne w bardzo silnych polach magnetycznych (a więc w warunkach gdy nieparaboliczność pasma przewodnictwa w GaAs odgrywa istotną rolę) powinien przynajmniej wspomnieć o innych pracach wskazujących na możliwość wpływu oddziaływania $e-e$ na widmo rezonansu cyklotronowego gdy przybliżenie paraboliczne przestaje dobrze pracować [patrz np. S.S. Krishtopenko et al., J. Appl. Phys. **117**, 112813 (2015)]. Uważam, że rozprawa zyskałaby znacznie, gdyby, tak jak to ma miejsce w cytowanej już wcześniej pracy {Pus08}, doktorant miał możliwość wykonania pomiarów magnetotransportowych i magnetoptycznych na kilku supersieciach charakteryzujących się różnymi (w tym również bardzo małymi) wartościami parametru Δ_{SAS} .

Podsumowując stwierdzam, iż opiniowana rozprawa doktorska porusza ważne dla fizyki nanostruktur tematy badawcze. Przygotowując rozprawę doktorant wykazał się umiejętnością dostrzegania, formułowania i rozwiązywania problemu badawczego. Zademonstrował również opanowanie eksperymentalnych metod badawczych w zakresie tematyki rozprawy. Wystąpienia seminaryjne doktoranta, które miałem okazję wysłuchać, jak i dyskusje z nim prowadzone dają też podstawę do stwierdzenia, że posiada on odpowiednią wiedzę teoretyczną w zakresie tematyki rozprawy. Niemniej jednak, mam pewne wątpliwości czy jest ona wystarczająco ugruntowana, szczególnie w zakresie zjawisk uwarunkowanych oddziaływaniem elektron-elektron. Stwierdzam również, że pewne zastrzeżenia budzi poprawność warsztatu pisarskiego doktoranta.

W oparciu o powyższe fakty wnoszę o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgra inż. Marcina Zybarta do publicznej obrony.

Lublin 14 - 03 - 2018 r.

Wykaz usterek

zauważonych w rozprawie doktorskiej mgra inż. M. Zybarta

“Przejścia magnetoptyczne w strukturach zawierających wiele studni kwantowych”

1. s. 5¹³ — I.1.2 → I.2.4
2. s. 7¹⁵ — [15] → [15,16]; [16-24] → [17-24]
3. s. 12 — $dk \rightarrow dk_{\parallel}$, $k \rightarrow k_{\parallel}$, (rysunek I-2) $m \rightarrow m_z^*$
4. s. 13³ — $\varepsilon_j < E_F \rightarrow E < \varepsilon_1$, $\varepsilon_j > E_F \rightarrow \varepsilon_j < E < \varepsilon_{j+1}$
5. s. 13 — brak informacji, że równanie (I-10) opisuje ruch elektronu w płaszczyźnie x-y; brak definicji k .
6. s. 14 (podpis pod rys. I-3) — dla Q2DEG → w pierwszym podpaśmie Q2DEG
7. s. 15 (wzór I-17) należy dopisać po czym całujemy, tzn. dx
8. s. 15 (powyżej wzoru I-18) $Ha = ESa \rightarrow \mathbf{H}\mathbf{a} = \mathbf{E}\mathbf{S}\mathbf{a}$
9. s. 16² — całka wymiany → całka przekrycia
10. s. 16 (wzór I-20) — brak definicji E_+ i E_-
11. s. 17 (rys. I-5) — w super-sieci GaSb $z \rightarrow$ w nieskończonej super-sieci z
12. s. 17 — wzór (I-22) jest przepisany z błędami z Ref. 55.
13. s. 18 (wzór (I-23) — brak definicji E_j
14. s. 20 (podpis pod rys. I-7) — 4 K → 50 mK
15. s. 22⁴ — Dresselhouse → Dresselhaus
16. s. 24⁵ — między pasmowych → międzypasmowych; (rys. I-9) — brak informacji co oznaczają krzywe przerywane
17. s. 25 (rys. I-10) — brak informacji, co przedstawiają krzywe 1 - 5
18. s. 26 (rys. I-11) — podpis pod rysunkiem zawiera błędną informację, że struktury są domieszkowane akceptorami, brak jest również informacji w jakich temperaturach wykonano pomiary
19. s. 30 (rys. I-15) — brak informacji, jakim próbkom odpowiadają krzywe 1 - 5
20. s. 31 (rys. I-16) — brak informacji o: (a) parametrach próbki i (b) natężeniu pola magnetycznego
21. s. 32₄ — im → autorom powyższej pracy
22. s. 33 (poniżej wzoru I-34) — stałą elektrostatyczną → stałą dielektryczną
23. s. 33 (wzór I-35) — brak informacji, gdzie znajduje się domieszka oraz w jakich jednostkach mierzona jest energia i długość

24. s. 33 (wzór I-33) — $\cos(\vec{k}_n, \vec{z}) \rightarrow \cos(k_n, z)$
25. s. 33₃ — Ponad to \rightarrow Ponadto, wyznaczono \rightarrow wyprowadzono
26. s. 34 — wzór (I-44) nie pojawia się w cytowanej przez doktoranta pracy Ref. [115]
27. s. 37 (powyżej wzoru I-47) — $V_0(r) \rightarrow V_0(\mathbf{r})$; (poniżej wzoru I-47) — p oznacza pęd \rightarrow \mathbf{p} oznacza operator pędu; funkcje są \rightarrow funkcje $u_l(\mathbf{r})$ są
28. s. 37 (poniżej wzoru I-49) — Mnożąc lewostronnie przez u_l i całkując po komórce elementarnej, \rightarrow Podstawiając (I-48) do (I-49) i mnożąc lewostronnie przez u_l^* i całkując po komórce elementarnej Ω ,
29. s. 38 (poniżej wzoru I-50) — $E_{10} \dots$ pędu: \rightarrow gdzie: ; (powyżej wzoru I-52) — jedno elektronowe \rightarrow jednoelektronowe
30. s. 39¹ — $u_l(r) \rightarrow u_l(\mathbf{r})$; $f_l(r) \rightarrow f_l(\mathbf{r})$
31. s. 39 (wzór I-54) — $\vec{\delta}_{rl} \rightarrow \delta_{rl}$
32. s. 39 (poniżej wzoru I-54) — $\sigma_{rl} \rightarrow \sigma_{rl}$
33. s. 44 — brak odwołania w tekście rozprawy do rysunku III-2, brak również informacji z jakiego źródła pochodzi ten rysunek
34. s. 44₂ — natężeniu prądu \rightarrow maksymalnym natężeniu prądu
35. s. 46 — brak informacji, z jakiego źródła pochodzi rysunek III-4
36. s. 51 — w pracy [90] M. von Ortenberga \rightarrow w pracy M. von Ortenberga i współpracowników [90]
37. s. 52 (poniżej wzoru III-2) Wykorzystano \rightarrow Założono
38. s. 52₃ — W skutek powyższych rozważań \rightarrow Powyższe rozważania wskazują, że
39. s. 53² — zaznaczonego wcześniej \rightarrow sformułowanego/omawianego wcześniej
40. s. 53₃ — (grupa W. Strupiński) \rightarrow (grupa W. Strupińskiego)
41. s. 54 — $50 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2} \rightarrow 5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$
42. s. 58 (wzór IV-1 i IV-5) $E^p \rightarrow E^{p'}$; (wzór IV-5) $E^p \rightarrow E^{n_p}$
43. s. 66₃ — i warto tutaj przytoczyć te wyniki: \rightarrow . Poniżej przytaczam otrzymane w tych pracach wyniki:
44. s. 71 — patrz uwagi nr 31 i 32
45. s. 75 — $\mathbf{B} \parallel [001] \rightarrow \mathbf{B} \parallel [001]$
46. s. 80¹⁶ — nie sferyczność \rightarrow niesferyczność
47. s. 82,83 — Ref. 57 (Ref. 53) jest powtórzeniem Ref. 30 (Ref. 38)
48. s. 88 i 89 — "położenie" elementu S_1 jest niewłaściwe; brak definicji wielu symboli np.: R, F, E_z