



## Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

Instytut Fizyki Doświadczalnej, Zakład Fizyki Ciała Stałego

ul. Pasteura 5, 02-093 Warszawa, tel. 2255 32770,

Andrzej.Witowski@fuw.edu.pl

dr hab. Andrzej Witowski

Warszawa, 16 maja 2019 roku

Recenzja pracy doktorskiej mgr Marcina Zyberta

*Rezonans cyklotronowy i cyklotronowo-fononowy w strukturach zawierających  
wiele studni kwantowych*

wykonanej w Instytucie Fizyki PAN pod opieką prof. dr hab. Eugeniusza  
Szeregija

Przedstawiona mi do recenzji praca dotyczy pomiarów magnetoptycznych w bardzo silnych polach magnetycznych i interpretacji ich wyników dla podwójnych studni kwantowych stworzonych na kryształach mieszanych InGaAs i InAlAs oraz zespołu wielu studni w układzie GaAs/AlGaAs wytworzonych w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych.

Praca doktorska mgr Marcina Zyberta została podzielona w dość nietypowy sposób. Zawiera sześć rozdziałów z czego Wstęp zajmuje praktycznie połowę tekstu i składa się z 4 części oraz podsumowania. Dzięki dość starannie zebranych informacjom, ten rozdział dokładnie wprowadza czytelnika w problematykę pracy. Tu znajdujemy po opisie zastosowań struktur kwantowych bardzo zwięzły tekst przedstawiający cel pracy. Niestety trochę brakuje w nim sugestii jakie problemy fizyczne czekają na rozwiązanie.

Kolejna część Wstępu wprowadza czytelnika w świat poziomów elektronowych w studniach kwantowych bez zewnętrznego pola magnetycznego, w polu magnetycznym prostopadłym do kierunku wzrostu, a także w oddziałujących studniach kwantowych (podwójnych DQW i wielokrotnych MQW). Trochę dziwnym wydaje się tytuł następnego podrozdziału Wstępu, a mianowicie „Rezonans Cyklotronowy (CR)”. Tak naprawdę ta część poświęcona jest różnym przejściom pomiędzy poziomami Landaua także pochodzącymi z różnych pasm, nie mówiąc o poziomach ekscytonowych. Autor przedstawia modele teoretyczne opisujące zarówno elektrony quasi swobodne jak i związane na donorach w szczególności w silnych polach magnetycznych.

Czwarty podrozdział Wstępu przedstawia implikacje oddziaływania elektron – fonon dla struktury poziomów, a więc i przejść optycznych w silnych polach magnetycznych.

Prezentuje jakich dodatkowych energii przejść optycznych możemy oczekiwać w omawianych układach.

Podsumowanie Wstępu jest tak naprawdę listą „braków” w dotychczasowym opisie struktur podwójnych i wielokrotnych studni kwantowych w silnych polach magnetycznych. Sugeruje więc czego czytelnik powinien się spodziewać w rozdziałach już bezpośrednio poświęconych badaniom autora.

Rzeczywiście. W jednostronicowym rozdziale I zatytułowanym „Problem Badawczy” autor przedstawia bardzo ogólnikowo swoje zamierzenia badawcze.

W bardzo rozbudowanym Wstępie czytelnik spotyka się z wieloma problemami jakie go czekają także przy lekturze następnych rozdziałów. Szczegółowe uwagi dotyczące stylu i słownictwa zamieściłem w Załączniku, bo jest ich za dużo do wymienienia w tym miejscu. Niemniej przedstawiam tu kilka bardziej generalnych uwag.

Praktycznie w całej pracy *linie absorpcyjne* autor nazywa niepoprawnie *pikami*. Również wielokrotnie używa słowa *ilość* zamiast *liczba*. Niestety coś takiego jak *moda fononowa* nie występuje, bo dla drgań mody własne są rodzaju męskiego. W podpisie do rysunku W-13 (str. 31) autor wyjaśnia: ... +  $i$  – *oznaczają różną orientację spinu* ... co nie jest prawdą bo oznaczają rzuty momentu pędu na oś kwantyzacji (liczba  $m$ ).

Jeśli omawiamy jakiś problem to winniśmy w pierwszej kolejności cytować pierwsze prace oryginalne, a dopiero potem powoływać się na prace przeglądowe i monografie. Szczególnie jest to ważne w pracach doktorskich, które będą „podręcznikami” i „wzorcami” dla przyszłych doktorantów i studentów. We Wstępie brakowało mi odniesienia się do pracy C.R. Pidgeona i R.N. Browna (cytowanej na końcu [143] i to nie w związku z modelem nieparabolicznych pasm w polu magnetycznym) jak i pracy M.H. Weiler et al.<sup>1</sup> poświęconej udozwalaniem przejść optycznych w układach z nieparabolicznymi pasmami, „warpingiem” i bez symetrii inwersji, a więc takich jak omawiane w doktoracie związki III-V.

Rozdział II „Metodyka badań” przedstawia opis unikatowej instalacji impulsowych „megagausowych” pól magnetycznych znajdującej się w Instytucie Impulsowych Pól Magnetycznych należącym do Narodowego Laboratorium Los Alamos (USA). Szkoda, że nie ma tu wzmianki o innych instalacjach silnych pól magnetycznych na świecie. Brakuje także porównania z możliwościami badawczymi w stałych polach magnetycznych.

---

<sup>1</sup> M.H. Weiler, R.L. Aggarwal, and B. Lax *Warping- and inversion-asymmetry-induced cyclotron-harmonic transitions in InSb* Phys. Rev. **B17**, 3269 (1978).

Przy opisie aparatury na str. 55 autor wspomina: *Próbka zamocowana jest w wydrążonym wewnątrz uchwycie ze specjalnego tworzywa ...* Jest to jednocześnie t.zw. zimny palec, a więc tworzywo musi być wyjątkowe. Szkoda, że brak kilku słów o tej konstrukcji. Na rysunku II-9 przedstawiającym zależność indukcji pola magnetycznego od czasu po 6  $\mu\text{sec}$  widoczne jest pole ujemne – czy to rzeczywiście istniejące pole czy jest to efekt elektroniki? Autor tego zachowania sygnału nie komentuje.

W dalszej części rozdziału II znajdujemy szczegółowy opis badanych struktur wraz z podstawową charakterystyką transportową. Stwierdzając *każdy pomiar wymaga innej próbki* (str. 57) autor nie wspomina o problemie jednorodności badanych materiałów. Mylący jest rysunek II-13. Przedstawione na nim obszary  $\delta$  – dopingu są szerokości połowy wymiaru bariery.

Następne dwa rozdziały przedstawiają już własne wyniki autora. W rozdziale III „Badanie przejść magnetoptycznych w strukturach MQW” przedstawione zostały zarówno wyniki pomiarów transmisji jak i wyniki modelowych obliczeń energii przejść optycznych dla wielokrotnych studni kwantowych. Na rysunkach przedstawiono krzywe doświadczalne transmisji zmierzonej w trzech temperaturach dla linii o długości fali 9,69  $\mu\text{m}$ . Dlaczego nie ma ogólnych wyników dla linii 10,59  $\mu\text{m}$ ? Rysunki są opisywane długościami fal linii emisyjnych lasera  $\text{CO}_2$ . Jednak w interpretacji używa się energii fotonów i może warto by było przynajmniej w podpisach podać jaka energia odpowiada tym długościom fal. Dotyczy to także rozdziału IV.

Linie absorpcyjne występują zarówno dla rosnącego jak i malejącego pola magnetycznego. Linie te mają różne kształty. Przy opracowaniu danych autor jedynie modeluje linie dla pola malejącego nie wyjaśniając dlaczego tak postępuje. Transmisja w wąskim obszarze linii jest modelowana (dopasowywana) sumą linii lorentzowskich. Autor nie wyjaśnia jakie są podstawy takiego opisu. Czy otrzymane tą drogą szerokości dają czasy relaksacji porównywalne z tymi wynikającymi z ruchliwości? Czy to, że urojona część funkcji dielektrycznej opisująca rezonanse ma kształt linii Lorentza oznacza, że taki sam kształt będziemy obserwowali w transmisji? To są pytania, na które spodziewałbym się odpowiedzi przed przystąpieniem do rozkładania linii widocznych w transmisji na krzywe Lorentza.

Otrzymane wyniki położenia linii absorpcyjnych zostały zebrane w tabeli 2 (str. 71). Jak z niej widać dla niektórych linii wartości indukcji pola magnetycznego rosnącego

i malejącego czasami różnią się o 2 Tesle, a czasami nawet o 10T. Oczekiwałbym krótkiego komentarza na temat takiego zachowania.

W części poświęconej obliczeniom teoretycznym autor sumę pędu i potencjału wektorowego  $A$  nazywa, niezgodnie z prawdą, momentem pędu (oznaczenie dużą literą  $P$  (ze strzałką)). Kilka wierszy dalej używa dużego  $P$  (bez strzałki) jako elementu macierzowego pędu bez wyjaśnienia jaki to element. Może być to tym bardziej mylące, że wcześniej mówi się o międzypasmowym elemencie macierzowym pędu oznaczonym przez małe  $p$  z wskaźnikami  $l$  i  $l'$ . Podobni problemy występują w rozdziale IV.

Na stronie 81 poruszona jest bardzo skrótowo interesująca kwestia zmiany znaku  $g^*$  czynnika z ujemnego w słabych polach na dodatni w silnych polach magnetycznych. Czy rzeczywiście jest to tylko wynikiem nieparaboliczności (nieliniowa zależność od pola magnetycznego)? Zależność  $g$ -czynnika od pola magnetycznego była rozważana w pracy Y.-F. Chena et al.<sup>2</sup> dla InSb, wzorcowego materiału o nieparabolicznych pasmach, i zmiany znaku nieobserwowano. Warto by było temu nietrywialnemu zagadnieniu poświęcić kilka zdań. Na tej samej stronie rysunek III-8 nosi podpis *Zmiana spinu podczas przejść magnetoptycznych* zupełnie niezgodny z treścią rysunku.

Na stronie 83 na rysunku III-10 (w tekście mylnie V-10) przedstawione zostało porównanie danych doświadczalnych położenia linii absorpcyjnych z modelowymi krzywymi. Autor stwierdza, że jeden punkt nie pasuje do tych linii i proponuje wyjaśnienie jego pochodzenia. Niestety dla energii fotonów 128 meV są jeszcze dwa wyniki niepasujące do modelowego układu, o których autor nic nie pisze.

W rozdziale IV „Badanie magnetoptyczne w strukturach DQW na bazie hetero złącz InGaAs/InAlAs” tak jak w rozdziale III zostały przedstawione zarówno wyniki pomiarów transmisji jak i wyniki modelowych obliczeń energii przejść optycznych dla podwójnych studni kwantowych. I do tej części nasuwa się wiele uwag formalnych.

Na rysunku IV-1 przedstawiono jako wstawki fragmenty widm w „rozciągniętych” skalach zupełnie niepotrzebnie albowiem są one zaraz przedstawione na następnym rysunku. Wyraźniejsze struktury absorpcyjne w okolicy 90T nie zostały przedstawione w powiększeniu mimo, że można się dopatrzeć w nich pewnych struktur. Na rysunku IV-2 strzałkami zaznaczono *pozycje rezonansów* nie wyjaśniając kryteriów wyboru. Jest kilka linii o zbliżonej głębokości, których autor nie komentuje.

---

<sup>2</sup> Y.-F. Chen, M. Dobrowolska, and J.K. Furdyna *g-factor anisotropy of conduction electrons in InSb*, Phys. Rev., **B31**, 7989 (1985)

Omawiając wyniki na str. 89 autor pisze *Rezonanse obserwowane w polach magnetycznych powyżej 70T są bardzo intensywne i składają się z dwóch ostrych minimów, w związku z czym aproksymacja ich wydaje się zbędna*. W szczególności w odniesieniu do krzywej otrzymanej dla linii 10,62  $\mu\text{m}$  powyższe stwierdzenie o dwóch ostrych minimach nie jest prawdą.

W tym rozdziale (podpis Tabeli 4 oraz str. 97 znajdujemy stwierdzenie z *przewrotem spinu*. Zwykle stosuje się określenie „z odwróceniem spinu”. W komentarzu do rys. IV-6 autor pisze *Widać bardzo dobrą zgodność eksperymentalnych pozycji rezonansów z teoretycznymi krzywymi...* co w przypadku niektórych punktów nie jest takie oczywiste.

W nieco bardziej rozbudowanym modelu pasmowym uwzględniającym warping i brak symetrii inwersji przejścia optyczne z odwróceniem spinu zostają dla pewnych konfiguracji dozwolone (M.H. Weiler et al.<sup>1</sup>). Pisząc o tego typu przejściach (str. 98) należało zwrócić uwagę na powyżej wspomniane możliwości.

Zakończeniem pracy jest Rozdział V „Wnioski końcowe”. Stanowi on bardzo oszczędne wyliczenie elementów pracy podsumowane stwierdzeniem:

*W wyniku wykonanych badań został otrzymany ogólny obraz stanów elektronowych w strukturach MQW i DQW w ultra silnych polach magnetycznych.*

Chciałoby się jednak zobaczyć przedstawienie tego „ogólnego obrazu”. Interesujące byłoby znalezienie odpowiedzi na pytanie czym ten obraz różni się od obrazu w niskich polach magnetycznych. Niestety w tej materii czytelnikowi pozostaje pewien niedosyt.

Po krótkim podsumowaniu pracy następuje bardzo bogaty spis literatury (145 pozycji) świadczący nie tylko o wiedzy i odczycaniu autora ale także ułatwiający działania jego następcom. O pewnych brakach tej części wspomniałem już powyżej.

Konkludując należy stwierdzić, że omawiana praca doktorska zawiera bogaty materiał doświadczalny uzyskany w eksperymentach w warunkach ekstremalnych pokazujący właściwości optyczne wielostudni i podwójnych studni kwantowych w silnych polach magnetycznych. Otrzymane dane doświadczalne są bardzo skrupulatnie opisane wynikami poważnych obliczeń poziomów energetycznych wykonanych przez autora. Tak więc nie ulega wątpliwości, że przedstawiona praca całkowicie spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim zarówno zwyczajowe jak i ustawowe. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie mgr Marcina Zybarta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



## Załącznik

### Szczegółowe uwagi dotyczące tekstu.

- Str. 5 „domieszkowane krzemem barierach InAlAs”;
- str. 9 „Wyróżnia je przede wszystkim wąska linia emisji ze względu na fakt, że zachodzi ona pomiędzy podpasмами o takiej samej paraboliczności”, w innym miejscu „czas relaksacji elektronu mniej niż pikosekunda”;
- str. 10 „kryształów fononicznych”;
- str. 12 „który porusza się ... wzdłuż osi z” – a nie jest w tym kierunku uwięziony?;
- str. 15 wprowadzone cechowanie potencjału wektorowego ale bez podania orientacji pola B;
- str. 16 „gdzie  $\tau$  jest czasem relaksacji elektronu na LL – jak również kwantowego ...”;
- str. 18 „pojawia się różnica pomiędzy energią dla równoległej konfiguracji spinów ...” spiny pojawiają się nagle bo wcześniej opis bez wzmianki o takiej wielkości;
- str. 21 „w przestrzeni  $k$  po powierzchniach stałej energii ... mogą absorbować energię promieniowania co powoduje wydłużenie orbity” – co znaczy wydłużenie orbity?;
- str. 23 Jak piszemy o LL i nieparaboliczności to nie można nie zacytować pracy Pidgeona Browna;
- str. 24 i 25; w zakresie energii fotonów 1,5 – 2,0 eV ... Zaobserwowano nie tylko CR” – przecież go tam nie było!!! Podpis pod rysunkiem W-8 „poziome punkty pomiarowe dotyczą ekscytronów”;
- str. 27 „zjawisko CR było badane w szeregu prac różnych grup badawczych” – tu konieczne odnośniki;
- str. 32 Rys. W-14 podpis „... wraz z krzywymi obliczenia energii przejść ...”;
- str. 33 brak definicji kappy, wzór W-28 niepotrzebny przecinek – zagadka wskaźnika;
- str. 34 „dla  $j$ -towej” – chyba  $j$ -tej?;
- str. 40. „Fonony są głównym mechanizmem rozpraszającym elektrony” ... „drgania o bardzo dużej długości fali – większej niż stała sieci” – co to znaczy?;
- str. 42 W rozdziale warto by było podać prawdziwe dyspersje fononów dla GaAs. Brak wyjaśnienia stałych występujących we wzorze W-50;
- str. 45 „rejestracja widm ramanowskich wzbudzonych plamką laserową, przechodzącą po przekroju struktury DQW” – nie do końca zrozumiałe;
- str. 46 „dokonano interpretacji krzywych pomiarowych” – czy chodzi o położenia linii czy też o kształt całego widma?;
- str. 63 „W skutek powyższych rozważań pomiar położenia ... trudno wykonać z dokładnością większą niż 3%.” – to jednak nie rozważania sprawiają;

str. 64 Czy naprawdę na podłożu o grubości 0,5 mm jest aż 0,5 mm epitaksjalnego GaAs?

str. 69 Na rys. III-2 przerywane linie oznaczające pole rezonansu raz trafiają w minimum a raz nie;

str. 72 Powinno się napisać, że przedstawione krzywe są dla pola malejącego.

str. 74 „krzywe pomiarowe były aproksymowane przy użyciu Lorentzianów” – brzmi fatalnie tym bardziej, że tylko do fragmentu krzywej transmisji zostały dopasowane linie o kształcie Lorentza;

str. 75 Rys. III-6 „krzywa otrzymana na wskutek aproksymacji”, a poza tym tu bardzo dobre dopasowanie ale już na rys. III-7 dopasowanie znacznie gorsze i brak słowa komentarza.

str. 82 Rys. III-9 warto by jednak powiedzieć, które punkty są z pracy [95]. Jeśli mówimy o różnicach w rozszczepieniach spinowych swobodnych i związanych elektronów to może tak o innych pracach, które to badały? (np. Z. Barticevic et al.<sup>3</sup> w InSb). A jak pokazujemy punkty z innych prac to może istnieją wyniki „niskopolowe” do porównania?

str. 83 „odpowiadają optycznym przejściom elektronów w barierach” – a chodzi o przejścia między poziomami domieszkowymi;

Str. 86 „Ze spadkiem długości fali”;

str. 89 W podpisie rysunku IV-3 „otrzymana na wskutek aproksymacji” i podobnie w opisie rys. IV-4;

str. 90 ... „Widać dość wyraźnie, że dzięki użyciu tej metody (rozkładu linii na Lorentze) można dość precyzyjnie pokazać zarówno rozszczepienie piku rezonansowego jak i dość precyzyjnie określić pozycję pików obserwowanych w przedziale od 45T do 70T.” – a na rysunku IV-4 dokładnie widać, że zupełnie nie daje się opisać wyników powyżej 51T;

str. 91 ... „użyjemy 3 poziomowego modelu kp. Model bierze pod uwagę osiem pasm – włączając spin: ... Razem 6 poziomów w p.  $\Gamma$ ...” We wzorze IV-1 nieznanym symbol  $\delta$ , prawdopodobnie powinna być  $\sigma$  oraz sumowanie tylko po  $l$ , a w tekście mowa o sumowaniu po  $l$  i  $l'$ .

str. 92  $L$  to chyba długość magnetyczna. Wprowadzone  $P_0$  bez definicji (po raz kolejny).

str. 93 ... „dodatkowym warunkiem jest fakt” ... Przejście  $E(0^+) \rightarrow E(1^-)$  kiedyś nazywało się rezonansem kombinowanym.

str. 95 rys. IV-5 „Poziomy Landaua” – a to nieprawda bo energie LL przesunięte o energie fononów;

---

<sup>3</sup> Z. Barticevic, M. Dobrowolska, J.K. Furdyna, L.R. Ram Mohan, S. Rodriguez *Theoretical and experimental investigation of the effective g factor of donor-bound electrons in InSb*, Phys. Rev. **B35**, 7464 (1987)