prof. dr hab.
Piotr Zieliński
Instytut Fizyki Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki,
ul. Podchorążych 1, 30-084 Kraków
i Instytut Fizyki Jądrowej im. H. Niewodniczańskiego PAN,
ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Klaudiusza Majchrowskiego nt. „Transport nośników ładunku w nanostrukturach zawierających studnie kwantowe o różnych kształtach"

Dzięki rozwinięciu technologii wytwarzania dobrze kontrolowanych cienkich warstw o grubościach rzędu rozmiarów pojedynczych atomów możliwa stała się praktyczna realizacja układów, które w kierunku prostopadłym do płaszczyzny warstwy odpowiadają znanym z elementarnej mechaniki kwantowej modelom cząstek uwięzionych w studniach potencjału. Uzyskiwane w ten sposób dyskretne struktury poziomów energetycznych znajdują coraz to nowe zastosowania: lasery diodowe, detektory promieniowania podczerwonego oraz – po przyłożeniu pola magnetycznego – wszelkie realizacje wynikające z kwantowego zjawiska Halla występującego w dwuwymiarowym gazie elektronowym. Z tego względu przedstawiona mi do oceny rozprawa jest bardzo aktualna, a rozpatrywane w niej kształty potencjałów, jeżeli nawet dziś jeszcze nie są możliwe do odtworzenia z idealną dokładnością, na pewno zainspirują grupy doświadczalne do projektowania układów o zbliżonych właściwościach w najbliżej przyszłości.

Rozprawa poświęcona jest płaskim układom dwuwymiarowym, w zasadzie nieograniczonym w owych dwóch wymiarach (z wyjątkiem dyskutowanych w rozdziale 4 przypadków dyskretnych modów poprzecznych). W wymiarze prostopadłym do płaszczyzny potencjał tych układów wykazuje pewne minimum, odpowiadające tytułowej studni. W rozdziale 1 minimum jest V-kształtne, przy czym lewe ramię litery V jest nieskończonym pionowym progiem, a prawe jest dane pochyłą linią prostą. W rozdziale 2 taka V-kształtna studnia ma skończoną głębokość. Autor rozważa tam także studnię o kształcie połowy paraboli ograniczonej z lewej strony pionowym progiem. W obydwu tych rozdziałach Autor rozpatruje wpływ pola magnetycznego o wektorze indukcji leżącym w płaszczyźnie studni na rozkład poziomów energetycznych. Osobliwością tego układu jest złamania symetrii pasm energetycznych względem odwrócenia osi podłużnej studni. Wynikiem tego jest przewidziany ilościowo efekt magnetogalwaniczny polegający na powstawaniu siły elektromotorycznej na końcach osi studni pod wpływem padającego promieniowania elektromagnetycznego.

Rozdział 3 przedstawia podstawy techniki zagadnienia rozproszenia odwrotnego, tj. konstruowania potencjału, jedno- lub wielominimowego na podstawie zadanego układu poziomów energetycznych. Rozpatrywane potencjały są tu symetryczne we współrzędnej prostopadłej do płaszczyzny struktury. Ważną częścią tego rozdziału jest opis programu, który zagadnienie rozwiązuje w sposób numeryczny w środowisku MATLAB, weryfikuje otrzymany wynik poprzez wyznaczenie poziomów energetycznych wprost z otrzymanego potencjału, a następnie pozwala uprościć otrzymany, niekiedy dość skomplikowany potencjał, do postaci funkcji schodkowej bez istotnej zmiany poziomów energetycznych. Taka schematyzacja postaci potencjału jest bardzo istotna dla praktycznego projektowania studni kwantowych przy użyciu strefowo zmiennego domieszkowania. Najbardziej obszerny rozdział 4 zawiera podstawy formalizmów potrzebnych do opisu ruchu nośników w symetrycznej studni potencjału pod wpływem statycznego pola elektrycznego prostopadłego do płaszczyzny studni. Znajdujemy tu metodę wyznaczania prądu w niezbyt wysokich temperaturach, co prowadzi do otrzymania charakterystyk prądowo-napięciowych takich struktur oraz teorię odpowiedzi liniowej zarówno w temperaturze zera bezwzględnego, jak i w przypadku skończonych temperatur, gdzie odpowiednie funkcje Greena są zadane, zgodnie z twierdzeniem fluktuacyjno-dyssypacyjnym, przez funkcje korelacji. W paragrafie 4.7 Autor wykorzystuje otrzymane wyniki do projektowania detektorów promieniowania terahercowego. Zadanie polega tu na wytworzeniu takiej studni potencjału, w której odległości poziomów energetycznych nieco się od siebie różnią i leżą w zakresie teraherców. Przykładanie coraz większych napięć w kierunku prostopadłym do studni powoduje zapełnianie kolejnych poziomów nośnikami prądu tak, że padające promieniowanie terahercowe jest w stanie przenosić te elektrony do sąsiedniego wyższego poziomu. Z powodu różnych odstępów poziomów, zmiana napięcia „dostraja" detektor do różnych częstotliwości i w ten sposób umożliwia pomiar natężenia promieniowania w wybranych pasmach. Przy tak małych odstępach poziomów realistycznie osiągalne temperatury mogą przesłonić dyskretną ich strukturę. Przedstawiony tu projekt zakłada temperaturę 4 K, co odpowiada atmosferze ciekłego helu. Bez wątpienia projekt ten jest największym osiągnięciem rozprawy, o czym świadczy publikacja w *Institute of Electrical and Electronics Engineers Journal of Selected Topics in Quantum Electronics (2014).* Duża część zawartych w rozprawie wyników jest także już opublikowana w recenzowanych czasopismach o obiegu światowym. Ogólnie liczba publikacji z udziałem mgr. K. Majchrowskiego wynosi 6.

Rozprawa napisana jest z dużą dbałością o szczegóły rozumowań i konteksty literaturowe poszczególnych koncepcji. Niekiedy sprawia to pewną trudność w wychwyceniu tych pojęć, które służą jako podstawa do wykonanych przez Autora praktycznych obliczeń i programów numerycznych. Np. w rozdziale 1 po wyznaczeniu poziomów energetycznych w trójkątnej studni potencjału, czytelnik nie otrzymuje informacji na czym miałyby polegać „efekty fotogalwaniczne" wymienione w tytule rozdziału. Na str. 71 i 72 mamy dość intuicyjny wykład techniki funkcji Greena z użyciem modów poprzecznych, po czym następuje wyprowadzenie wzoru dokładnego. Dopiero w tym miejscu czytelnik zdaje sobie sprawę, że podejście z modami poprzecznymi jest tylko przybliżeniem. Nie jest jasne kiedy to przybliżenie jest prawidłowe, choć wydaje się, że to właśnie ono jest używane w projektowaniu detektora (zob. wzór 4.83, na str. 78). Z podobnych zastrzeżeń należałoby wymienić brak dyskusji różnic charakterystyk prądowo-napięciowych otrzymanych metodą macierzy transferu i nierównowagowych funkcji Greena (str. 66 i 67). Wielkość m(x) lub m(z) bywa bezwymiarowa (str. 16 wzór 1.25), ale także ma wymiar masy (str. 87). Zamiana współrzędnych x i z jest najbardziej myląca na str. 20. Nie jest jasne na czym w istocie polega wprowadzenie skończonej głębokości trójkątnej studni potencjału, skoro, jak stwierdza Autor na str. 22, funkcje falowe nie wnikają do obszarów tych skończonych barier. Tytuł podrozdziału 4.5.3 „Reprezentacja macierzowa operatora Hamilitona" za bardzo przypomina podstawowe pojęcie z mechaniki kwantowej, podczas gdy w rzeczywistości przedstawia słuszną w granicy długich fal dyskretyzację modelu sprowadzającą się do przybliżenia silnego wiązania. Pod względem językowym nieco rażą anglicyzmy takie jak „funkcje racjonalne" (zamiast wymierne, str. 37), „wspiera poziomy energetyczne" (str. 37), „sekcja" (zamiast rozdział, lub podrozdział, str. 56), transfer-macierz (str. 63), a przede wszystkim używany często „moment pędu", na określenie pędu (m.in. str. 87, 89).

Wymienione usterki redakcyjne i językowe nie odbierają wartości przedstawionym w rozprawie ważnym wynikom, które świadczą o dojrzałości naukowej Autora, jego głębokiej erudycji, a przede wszystkim o sprawności w wykonywaniu obliczeń analitycznych i numerycznych oraz w wyciąganiu wniosków natury fizycznej i technicznej. Stwierdzam, że rozprawa spełnia wymogi stawiane takim rozprawom w ustawie z 11 marca 2003 r. ze zmianami z 18 marca 2011 r. i wnoszę o dopuszczenie Pana mgr. Klaudiusza Majchrowskiego do publicznej obrony.

Kraków 20 maja 2014 r. Piotr Zieliński