

Prof. dr hab. inż. Andrzej Napieralski

Łódź, dn. 04.07.2014 r.

tytuł, stopień, imię i nazwisko

data

Katedra Mikroelektroniki i Technik Informatycznych
Politechnika Łódzka

miejsce pracy

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA RADY WYDZIAŁU FIZYKI, ASTRONOMII i INFORMATYKI
STOSOWANEJ UNIWERSYTETU JAGIEŁOŃSKIEGO**

Tytuł rozprawy: „*Physical description of unconventional Josephson junctions*”.

Autor rozprawy: mgr fizyki, mgr inż. elektroniki Krzysztof Pomorski

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Przedmiotem rozprawy jest opis niekonwencjonalnych złączy Josephsona za pomocą formalizmów matematycznych BCS¹, BdGe², GL³, formalizmów propagatorowych Eilenbergera i Usadela oraz modelu RSCJJ⁴, a także Hamiltonowskiego opisu układów kwantowych i quasiklasycznych. Autor rozprawy skupił się przede wszystkim na analizie niekonwencjonalnego indukowanego polowo złącza Josephsona w wyniku nałożenia ferromagnetycznego lub klasycznego przewodzącego paska nad powierzchnią nadprzewodnika. Złącze to może zostać uogólnione do przypadku polikrystalicznych (*granulowanych*) nadprzewodników. Wielką zaletą tego typu układów jest prostota procesu technologicznego, co w połączeniu z unikatowymi własnościami nadprzewodników czyni je świetnymi kandydatami do implementacji układów nadprzewodzących wysokiej skali integracji oraz w przyszłości do implementacji *qubitów* i komputera kwantowego.

Autor definiuje struktury uJJ⁵ i FIJJ⁶, jako powstałe przez nałożenie paska nienadprzewodzącego będącego metalicznym materiałem nieferromagnetycznym lub ferromagnetykiem na pasek nadprzewodzący o zadanej grubości i nazywa je odpowiednio: niekonwencjonalne indukowane złącze Josephsona (uJJ) i polowo indukowane złącze Josephsona (FIJJ). Wydaje się, że główną motywacją do podjęcia powyższych prac są wyniki eksperymentalne uzyskane przez Louisa Gomeza oraz wyniki eksperymentów przeprowadzonych przez W. Clintona [46] i S. Reymonda [47,77] (patrz rys. 2.2 na str. 19).

Po analizie teoretycznej można dojść do wniosku, że doświadczalnie badany układ niekonwencjonalnego złącza Josephsona uJJ i FIJJ daje się w sposób matematyczny zamodelować w co najmniej 2- lub 3-wymiarach bez możliwości redukcji do układu jedno-

¹ BCS – ang. Barden-Cooper-Schreiffer theory

² BdGe- ang. Bogoliubov de Gennes equations

³ GL – ang. Ginzburg-Landau equations

⁴ RSCJJ -ang. Resistor Capacitor Shunted Josephson junction

⁵ uJJ – ang. unconventional Josephson junction

⁶ FIJJ – ang. field induced Josephson junction

wymiarowego. Pod sam koniec pracy (rys. 10.12, str. 187) Autor wskazał na możliwość modelowania tego typu układu w postaci quasi-jednowymiarowej i wówczas możliwe jest określenie współczynnika odbicia i transmisji dla pakietu falowego BdGe przechodzącego przez taki układ a zaczynającego swój ruch w elektrodach doprowadzających i odprowadzających przepływający przez uJJ lub FIJJ prąd elektryczny. Jednak nawet w opisie quasi-jednowymiarowym było konieczne odwołanie się do drugiego wymiaru, na przykład poprzez dwuwymiarowy model ang. *tight-binding* BdGe, co czyni te układy faktycznie więcej niż jednowymiarowymi. Bogactwo możliwych procesów fizycznych i struktury matematycznej uJJ i FIJJ obrazują równania (5.14-5.22, str. 82-84) podając uogólnioną postać funkcjonału gęstości energii w uogólnionym modelu GL [61,68].

W pracy wprowadzono również koncepcję temperaturowo indukowanych niekonwencjonalnych złączy Josephsona (uJJ i FIJJ). Autor zaprezentował też uogólnienie koncepcji architektury nadprzewodzącego *qubitu* w postaci nadprzewodzącego *quditu* i *qutritu*, które są sterowane polem elektrycznym, polem magnetycznym lub prądem elektrycznym. Wśród znanych obecnie obwodów sterujących stanem kwantowym nadprzewodzącego *qubitu* wyróżnia się trzy architektury:

- *qubit* sterowany źródłem prądowym (ang. *phase controlled superconducting qubit*),
- *qubit* sterowany strumieniem pola magnetycznego (ang. *flux controlled superconducting qubit*),
- *qubit* sterowany napięciem bramki polaryzacyjnej (ang. *voltage controlled superconducting qubit*).

Zagadnienia opisywane przez autora rozprawy są istotne zarówno z punktu widzenia teorii efektu Josephsona, nowych architektur urządzeń nadprzewodzących wyrażonych przez uJJ, FIJJ, *quditu* i *qutritu* oraz opisu rozważanego temperaturowo indukowanego złącza Josephsona. Wskazują one kierunki przyszłych eksperymentów oraz elektronicznych aplikacji układowych mogących znaleźć bezpośrednie odzwierciedlenie w rozwoju tzw. układów ang. *no-moore's law* (w tym komputerów kriogenicznych).

Ponadto przedstawiona w pracy klasa złączy Josephsona, może znaleźć zastosowanie w budowie detektorów promieniowania elektromagnetycznego, gdyż takie struktury mogą zostać wykonane w układach VLSI, jako elektroniczne systemy wysokiej częstotliwości a także ograniczniki prądu.

W rozprawie można znaleźć ciekawe rozważania dotyczące metod numerycznych, które bezpośrednio mogą się przyczynić do przygotowania narzędzi niezbędnych do praktycznego modelowania zintegrowanych kriogenicznych skalonych systemów cyfrowych.

Teza rozprawy nie jest przedstawiona w sposób jawny, można jednak ją podać w następującej postaci:

Istnieją trzy fundamentalne konfiguracje pola magnetycznego mające bezpośredni wpływ na własności fizyczne złącza FIJJ. W ogólnym przypadku mamy do czynienia z jednoczesną nieliniową superpozycją (współlistnieniem) tych trzech, dwóch albo pojedynczej konfiguracji (patrz rys. 5.1).

Złącze FIJJ może zachowywać się (w zależności od parametrów fizycznych) jako słabe złącze lub też jako quasitunelowe złącze Josephsona.

Częściowe potwierdzenie tej tezy znalazło uzasadnienie w jakościowych wynikach numerycznych zaprezentowanych w publikacji doktoranta w PSS B'2012 [B] jak również zostało przedstawione na rys. 5.2-5.4 na str. 79-80.

Dodatkowo Autor rozprawy zajął się również następującymi zagadnieniami badawczymi:

- W artykule EJTP'2010 [C] wskazał możliwość występowania "topologicznego efektu Meissnera"⁷, który polega na tym, że w przypadku SQUIDu typu FIJJ z dwoma paskami ferromagnetycznymi namagnesowanymi w płaszczyźnie SQUIDu i silnie z sobą oddziaływującymi (rys. 4.10, str. 68) niemożliwe jest wnikanie do obszaru wewnętrznego SQUIDu zewnętrznego pola magnetycznego prostopadłego do płaszczyzny tej struktury. Efekt ten powinien występować tylko do pewnej krytycznej wartości zewnętrznego pola magnetycznego, kiedy może nastąpić przemagnesowanie początkowo jednoimiennie namagnesowanych pasków ferromagnetycznych, tak że ich magnetyzacja będzie miała kierunek przeciwny.
- Innym potencjalnie bardzo interesującym zjawiskiem związanym z kwantyzacją strumienia pola magnetycznego we wnętrzu SQUIDu jest fakt, że domeny ferromagnetyczne przy zwiększaniu strumienia zewnętrznego pola magnetycznego o pojedynczy fluxon, powinny obracać się o kąty dyskretne⁸. Autor nie zbadał tego ciekawego efektu, ale jego podjęcie jest wskazane w dalszych pracach tym bardziej, że być może układ FIJJ mógłby wykrywać ułamki *fluksonu* pochodzące z zewnętrznego pola magnetycznego dzięki nieliniowości ferromagnetyka i jego częściowemu początkowemu namagnesowaniu.

W rozdziale 5.3 Autor rozprawy postuluje, że złącze FIJJ może być przybliżane złączem quasi-tunelowym Josephsona bądź też słabym złączem Josephsona (rys. 5.1, str. 76). Jest to częściowo potwierdzone przez wyniki numeryczne przedstawione na rys. 5.2-5.5.4 (str. 79-80). Dalsze potwierdzenie można uzyskać przez wskazanie efektywnego współczynnika odbicia pakietu falowego BdGe przechodzącego przez FIJJ. W rozdziale tym Autor postuluje również istnienie połowo indukowanego złącza Josephsona w układzie multiferoicznego paska nałożonego na pasek nadprzewodzący z uwagi na podobieństwo równań (5.7-5.9) z równaniami (5.1-5.3). Propozycja analizy własności uJJ (FIJJ) za pomocą pakietów falowych BdGe została zobrazowana na rys. 5.6 oraz zapisana w postaci równań przedstawionych w załączniku B i jest alternatywnym podejściem wobec używanego w pracy formalizmu GL. Niestety Autor nie zaprezentował obliczeń numerycznych wykorzystujących propagację pakietów falowych BdGe przez strukturę uJJ i FIJJ.

Przedstawione w pracy kompleksowe podejście do podjętych zagadnień świadczy o dużej wiedzy Autora i swobodzie poruszania się zarówno w różnorodnych działach fizyki teoretycznej, elektroniki i informatyki stosowanej. Rozprawę można więc sklasyfikować jako teoretyczną z elementami aplikacyjnymi.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zagadnień w przemyśle) świadczą o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

Autor opublikował swoje wyniki w 11 publikacjach w tym w 1 publikacji filadelfijskiej i 6 punktowanych na liście MNiSW uzyskując 61 punktów, z których najważniejszymi podsumowującymi zagadnienie są pozycje [A] i [B].

[A] K. Pomorski, P. Prokopow. "Perspective on basic architecture and properties of unconventional and field induced Josephson junction devices". *International Journal of Microelectronics and Computer Science* (2013), Vol.4, No.3, pp. 110-115 - 6 pkt. MNiSW

⁷ Nazwa zaproponowana przez Autora przedłożonej rozprawie.

⁸ α_1, α_2 przyjmują wówczas wartości dyskretne, podczas gdy nadprzewodnik jest w stanie normalnym i dlatego kąty α_1, α_2 mogą i wówczas zazwyczaj przyjmują wartości ciągłe.

- [B] K.Pomorski, P.Prokopow. "Possible existence of field induced Josephson junctions". *Physica status solidi B* 249, No 9 (2012), pp. 1805-183 – **publikacja filadelfijska, 20 pkt. MNiSW**
- [C] K.Pomorski, P.Prokopow. "Towards the determination of properties of the unconventional Josephson junction made by putting non-superconducting strip on the top of superconducting strip". *Electronic Journal of Theoretical Physics* (2010), Vol.7, No. 23, strony 85-121
- [D] K.Pomorski, P.Prokopow, "Numerical solutions of nearly time independent Ginzburg-Landau equations for various superconducting structures, part I". *Recherches sur les déformations* (2012) – **7 pkt. MNiSW**
- [E] K.Pomorski, P.Tempczyk, P.Prokopow. "Transport properties of multi pendulum system". *Recherches sur les déformations* (2012) – **7 pkt. MNiSW**
- [F] P.Prokopow, K.Pomorski, International Journal of Experimental and Computational Biomechanics, *Simulation study of the importance of biarticular muscles on human vertical jump performance* (2011).
- [G] K.Pomorski, P.Prokopow. "Numerical solutions of nearly time independent Ginzburg-Landau equations for various". *Recherches sur les déformations* (2013) – **7 pkt. MNiSW'2014**
- [H] K.Pomorski, M.Zubert, P.Prokopow. Transport properties of dirty unconventional Josephson junction devices in RCSJ model. *4-th International Conference on Superconductivity and Magnetism. ICSM'2014, 27 April-2 May, Ankara 2014– The best poster award*
- [I] K.Pomorski. The prediction of the new superconducting phenomena in the superconductor and superconducting mesoscopic structures. *Master of Science thesis at the University of Lodz, in Polish, 2007. 68, 158*
- [J] K.Pomorski, P.Prokopow, Bulletin de la societe et des sciences et des lettres de Lodz, *Recherches sur les d'eformations* (2011), vol. LXI, no. 2, Numerical solutions of time-dependent Ginzburg-Landau equations for various superconducting structures, **7 pkt. MNiSW**
- [K] P.Prokopow, S.Szyniewski, K.Pomorski, Human movement (2005), Vol. 6, No 2, strony 116–123, Muscle control in vertical squat jump, **7 pkt. MNiSW**
- [L] P.Prokopow, K.Pomorski, International Journal of Computer and Information Technology (2012), Vol.1, No 2, A novel motion simulator technique for generating a realistic physical human jump movement

W spisie literatury zacytował 108 prac innych autorów, obejmujących bardzo szeroki przegląd zagadnień związanych z nadprzewodnictwem. W większości są to prace anglojęzyczne świadczące o bardzo dobrej orientacji Autora w trendach i osiągnięciach światowej nauki: A.I. Buzdin [43,45,110,117], K.K. Likharev [14,29,41,42,90], W. Clinton [46,77,92], S. Reymonda [47,77], J.J.V. Alvarez [62], Louis Gomez.

3. Czy autor rozwiązał przedstawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Przedstawione w pracy zagadnienia zostały rozwiązane wykazując wiedzę obejmującą problematykę teoretycznego opisu zjawisk fizycznych z wykorzystaniem formalizmów matematycznych oraz implementacji algorytmów numerycznych. Autor przedstawił własne kompleksowe rozwiązanie problemu opisu indukowanych (konwencjonalnych i niekonwencjonalnych) złączy Josephsona oraz zaproponował przydatne do ich rozwiązywania algorytmy numeryczne. Zaprezentowane podejście jest bardzo ciekawe z

punktu widzenia metod numerycznych (rozdział 4.3). W przypadku zastosowanego algorytmu relaksacyjnego do nieliniowych równań cząstkowych w dwóch wymiarach (rozdział 4) zamieszczono dodatkowe informacje o właściwościach zastosowanego schematu numerycznego na przykładzie znanych literaturowo układów fizycznych (na przykład rozwiązania równania GL dla nadprzewodzącego kwadratu dla nadprzewodnika typu s i d ($GL(x^2-y^2)$ w płaszczyźnie ab). Na konferencji ICSM2014 Autor przedstawił układ *granulowanego* uJJ i FIJJ poprzez formalizm RCSJJ stosując sieć dwuwymiarowych złączy tunelowych, który odwołuje się do nieliniowych równań ODE⁹ - szkoda, że nie zostało to zamieszczone w pracy. Do tego samego problemu fizycznego stosując inne przybliżenia można użyć równań PDE¹⁰ i ODE.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Recenzowana praca stanowi oryginalne i samodzielne rozwiązanie postawionych przez doktoranta zagadnień. Należy również podkreślić, że przedstawione modele nakreślają nowe perspektywy w zakresie analizy i modelowania prototypów specjalizowanych przyrządów nadprzewodnikowych zbudowanych w oparciu o uJJ, FIJJ, TFIJJ oraz *qudity* i *qutrity*, pogłębiające dotychczasowy poziom wiedzy.

Głównym osiągnięciem rozprawy jest:

- wprowadzenie koncepcji polowo i temperaturowo indukowanego złącza Josephsona (uJJ i FIJJ) i metodologii jego modelowania,
- uogólnienie/generalizacja architektury nadprzewodzącego qubitu do nadprzewodzącego quditu i qutritu w nadprzewodnikach wykazujących anizotropowy parametr porządku,
- postulowanie klasy nadprzewodzących złączy Josephsona typu uJJ i FIJJ dla przypadku torusa, oraz uJJ i FIJJ w geometrii cylindrycznej i sferycznej. Jest to o tyle interesujące, gdyż w przypadku cylindrycznym i sferycznym można wyszczególnić równoległe połączenie złącza typu tunelowego ze słabym złączem Josephsona (przy pewnej grubości obszaru nienadprzewodzącego). Nie zostało to w pełni podkreślone w pracy, a jest to ciekawe zarówno ze strony fizyki jak i możliwości realizacji praktycznej. Charakteryzacja struktur została przedstawiona w tabeli 8.2 na str. 155.
- Postawione przez Autora rozprawy podejście otwiera szeroki wachlarz ciekawych eksperymentów i problemów do dalszych badań. W szczególności jest to potwierdzenie eksperymentalne topologicznego efektu Meissnera postulowanego w SQUID-zie zbudowanym na bazie dwóch polowo indukowanych złączy Josephsona przy odpowiedniej ich geometrii i odpowiedniej początkowej magnetyzacji paska ferromagnetycznego. Autor rozprawy wprowadza również nową klasyfikację możliwych architektur nadprzewodzącego quditu i qutritu (rysunek 9.6 i tabela 9.1). Powyższe rozważania czynią pracę bardzo ciekawą zarówno z punktu widzenia nauk fundamentalnych, jak również nauk aplikacyjnych i rozwoju techniki. Dla przykładu ciekawe z punktu widzenia elektroniki jest wprowadzenie macierzy niekonwencjonalnych złączy Josephsona typu uJJ i FIJJ. Mogłyby one służyć do konstruowania nadprzewodzących kamer

⁹ ODE – ang. Ordinary Differential Equations

¹⁰ PDE – ang. Partial Differential Equations

będących detektorami źródeł promieniowania elektromagnetycznego. Interesujące byłoby modelowanie czułości tego układu na sygnał pochodzący od anteny dipolowej poprzez zastosowanie równań TDGL (time dependent GL) oraz formalizmu BdGe przy traktowaniu zewnętrznego pola elektromagnetycznego pochodzącego od anteny jako zaburzenia. Niestety zostało to tylko w ograniczonym stopniu przedstawione w pracy. Oprócz określenia gęstości stanów przy pomocy BdGe nie ma innych wyników numerycznych uzyskanych przez zastosowanie tego formalizmu. Na pewno jest to jeden z ważnych kierunków przyszłych badań.

Autor przedstawia koncepcję *granulowanych* połowo indukowanych złączy Josephsona (typu FIJJ i uJJ). W pewnym zakresie parametrów złącza Autor wykazał zachowanie FIJJ jako quasitunelowego złącza Josephsona, a w innym zakresie pracy jako tak zwanego słabego złącza Josephsona. użytym kryterium był rozkład nadprzewodzącego parametru porządku. Choć *granulowane* połowo indukowane złącza nie są tym samym co połowo indukowane złącza Josephsona to wydają się prostsze w opisie fenomenologicznym, gdyż bazują na modelu RCSJJ i wnioski z tego opisu mogą być użyte do przypadku monokrystalicznego nadprzewodnika. W takich układach mechanizm transportu *vorteksów* może być znacznie uproszczony, gdyż *vorteksy* będą lokowały swoją obecność w przestrzeni pomiędzy ziarnami nadprzewodzącymi, gdzie nadprzewodzący parametr porządku $|\psi|$ ma wartość minimalną. Raz określony mechanizm transportu dla *granulowanych* złączy uJJ i FIJJ może dać wskazówki do mechanizmów transportu w układach uJJ lub FIJJ zbudowanych na bazie monokrystalicznego nadprzewodnika (brak obecności *granuli* nadprzewodzących lub z ich ograniczoną koncentracją). *Granulowane* złącza uJJ lub FIJJ mogą również być w sposób stosunkowo prosty zamodelowane przy użyciu modelu RCSJ przy zadanej znajomości nadprzewodzącego parametru porządku, które Autor przedstawił na konferencji ICSM 2014. Bardzo użyteczne byłoby uzyskanie charakterystyk prądowo napięciowych dla tego typu układów za pomocą metodologii RCSJ (ewentualnie połączenie GL z RCSJ).

Autor wprowadził w pracy także koncepcję temperaturowo indukowanego efektu Josephsona. Proponuje on ten efekt zastosować do złącza uJJ, aby zwiększyć wielkość topologicznego defektu w nadprzewodzącym parametrze porządku.

Ciekawym elementem pracy jest zaproponowanie przez Autora metodyki obliczeń numerycznych między innymi dla równania BdGe, która posłużyła do wyznaczenia lokalnej gęstości stanów (LDOS) w uJJ (rozdział 4.3). Metoda ta jest w istocie formą mapowania problemu 2- do 1-wymiarowego. Warto również podkreślić, że możliwe jest również podobne mapowanie problemu 3-wymiarowego do 1-wymiarowego co jednak Autor pominął.

Jednym z ciekawych problemów analitycznych do możliwego rozwiązania jest znalezienie wzoru analitycznego określającego rozkład parametru porządku dla struktury uJJ w formalizmie GL w sytuacji, gdy temperatura tego układu jest bliska temperatury krytycznej nadprzewodnika (lub w sytuacji cienkiego paska nadprzewodzącego). Wówczas w nieliniowym równaniu GL jest możliwe zaniedbanie członu nieliniowego proporcjonalnego do kwadratu modułu parametru porządku i traktowanie go jako perturbacji.

W rozprawie podjęto również tematykę fizyki wirów pola magnetycznego w nadprzewodniku (tzw. *vorteksów* Abrikosowa i Josephsona) w strukturach uJJ i FIJJ. Została ona zobrazowana w tabelach na stronie 57 i 58 oraz 43, 46 i 47. Metodologia badawcza studiowania fizyki *vorteksów* w strukturach uJJ i FIJJ została wskazana przez Autora w rozdziale 8, ale nie została wykorzystana np. na str. 133-135 oraz wyrażona poprzez rys. 8.11-8.16 na str. 138-140, a także na rys. 8.17 na str. 142. Możliwe mody poruszania się *vorteksów* zostały opisane na rysunkach str. 141-144, ale nie zostały przedyskutowane dla struktur uJJ i FIJJ. Co ciekawe Autor studiując zachowanie *vorteksów* w nadprzewodniku proponuje posługiwanie się quasi-klasycznym przybliżeniem traktując *vorteksy*, jako niezależne cząstki

quasi-klasyczne posiadające zaniedbywalną masę i oddziaływujące pomiędzy sobą, z brzegami nadprzewodnika (gdzie płynie prąd elektryczny ekranujący nadprzewodnik przed zewnętrznym polem magnetycznym wynikający z efektu Meissnera), z defektami strukturalnymi siatki krystalograficznej, z paskiem ferromagnetycznym i z wirami do niego zakotwiczonymi. Sposób modelowania *vorteksów* poprzez przybliżenie quasi-klasyczne jest znany literaturowo, ale jeszcze nigdy nie został zastosowany do układów uJJ i FIJJ. Przybliżenie quasi-klasyczne występuje w sytuacji małego lub średniego zagęszczenia wirów pola magnetycznego w temperaturach odległych od temperatury krytycznej. Wówczas przy pewnej geometrii uJJ i FIJJ dopuszczalne jest założenie punktowości wiru pola magnetycznego. Możliwe jest to wtedy, gdy quasi-normalny rdzeń wiru pola magnetycznego nie jest zbyt duży. W pewnym sensie aproksymacja wiru za pomocą cząstki pozwala traktować ich zachowanie zupełnie tak samo jak ma to miejsce w analizie przepływu cieczy klasycznych modelowanych przez układ wzajemnie oddziaływujących kulek. Kulki reprezentujące wiry pola magnetycznego nie są jednak „twarde”, mogą się wzajemnie przenikać, anihilować w sytuacji *vorteksów* o przeciwnej orientacji pola magnetycznego a także łączyć w jedną cząstkę (na przykład dwa *fluksony* łączą się tworząc podwójny *flukson* w postaci *vorteksu* lub rozpraszają się). Zachowanie *vorteksów* w układach uJJ i FIJJ jest o tyle istotna iż mają one wpływ na charakterystykę prądowo-napięciową układu.

Za nowatorskie elementy pracy uważam:

- Zastosowanie i rozwinięcie przez Autora metody relaksacyjnej stosowanej w układach nadpłynnych do układów nadprzewodzących (zwłaszcza z wieloma parametrami porządku) oraz sugeruje jej zastosowanie dla różnych formalizmów opisujących stan nadprzewodnika i struktur nadprzewodzących (patrz rys. 6.2 na str. 97). Praktyczny przykład aplikacji (i weryfikacja) tej metody, potwierdzający wyniki znane z literatury, zostały przedstawione między innymi na rys. 6.15 na str. 105.
- Poszerzenie koncepcji uJJ, FIJJ na przypadek geometrii prostokątnej, cylindrycznej i sferycznej a także na przypadek torusa i nadprzewodzącego cylindra z nawiniętym nienadprzewodzącym lub ferromagnetycznym pierścieniem (patrz rys. 6.12 na str. 103) wynikające z rozwiązań numerycznych równań GL (6.13-6.14). Jest to również ciekawa koncepcja nowego SQUIDu nie występująca w literaturze. Z technicznego punktu widzenia znacznie łatwiejsze jest skonstruowanie zamkniętego prostokątnego pierścienia nadprzewodzącego z nawiniętym prostokątnym paskiem nienadprzewodzącym lub ferromagnetycznym niż stosowanie toroidalnego SQUIDu wprowadzonego przez Autora.
- Niekonwencjonalny SQUID zbudowany w oparciu o koncepcję uJJ (FIJJ) dla nadprzewodnika typu D w płaszczyźnie *ab* został zamodelowany równaniem $GL(x^2-y^2)$ i przedstawiony na rys. 6.16 na str. 107 (patrz również rys. 1.6 i 1.7 na str. 11), zaś przypadek wymuszenia gradientu temperatury w czasie został zobrazowany na rys. 6.15.
- Również ciekawe aplikacyjne rozwiązanie uJJ dla nadprzewodnika typu D zostało zaprezentowane na rys. 7.7-7.10 na str. 119. Wynik ten jest nieznany literaturowo. Na rys. 7.15 na str. 125 przedstawiono dalszą ewaluację tego układu do postaci podwójnego asymetrycznego uJJ (patrz. 7.16). Szkoda, że nie podjęto analogicznych rozważań dla podwójnego symetrycznego uJJ przedstawionego na rys. 8.28b.
- Nowatorskim elementem pracy jest również wprowadzenie koncepcji temperaturowo indukowanego złącza TIJJ oraz połączenie koncepcji uJJ z TIJJ lub FIJJ z TIJJ. Koncepcje te zostały potwierdzone wynikami przedstawionymi na rys. 7.19-7.20 na str. 127.

- Zaproponowanie ogranicznika prądowego w nadprzewodniku typu d wykorzystując pasek ferromagnetyka lub pasek w stanie normalnym (nienadprzewodzącym). Dzięki temu wydaje się, że układ szybciej ogranicza przepływ prądu elektrycznego. Uzyskano tylko rozwiązanie równania $GL(x^2-y^2)$ w sytuacji, gdy nie płynie prąd elektryczny i przy braku pola magnetycznego. Przedstawione w pracy rozważania na temat architektur złączy Josephsona uJJ i FIJJ realizowanych w orto-kartezjańskim układzie współrzędnych (przedstawione między innymi w artykule PSS B'2012 [B]) oraz w układzie cylindrycznym i sferycznym (IJMCS'2013 0) pozwalają na dokonanie wstępnej ewaluacji użyteczności technicznej przedstawionych w pracy struktur (tabela 8.2, str. 155). Określono geometrię złączy Josephsona uJJ i FIJ, ich użyteczność techniczną oraz trudność implementacji, a także wachlarz możliwych nadprzewodników z typem symetrii nadprzewodzącego parametru porządku
- Zaproponowanie uogólnionej architektury obwodu sterującego nadprzewodzącym *quditem* i *qutritem*. Architektury te zostały zilustrowane na rys. 9.6 na str. 163 oraz w tabeli 9.1 na str. 164.
- Zaproponowanie wzoru (10.1) na str. 185 opisującego strukturę matematyczną obecną w analizowanych układach fizycznych (uJJ, FIJJ, nadprzewodzący *quditu* i *qutritu*).

Należy podkreślić, że praca nie zamyka wszystkich tematów lecz inspiruje do ich podjęcia w ramach szczegółowych rozważań w dyscyplinie elektroniki i fizyki.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Przedłożona rozprawa jest bardzo obszerna. Dostarczony manuskrypt liczy łącznie 282 strony, w tym część główna rozprawy obejmuje 224 strony a pozostałe 58 stron stanowi załącznik podzielony na trzy części, z których dwie pierwsze stanowią wprowadzenie do poruszonych w pracy zagadnień teoretycznych, natomiast w ostatniej zamieszczono zagadnienia, które autor planuje analizować w przyszłości. W rozprawie Autor zastosował formalizmy fizyczne opisujące stan nadprzewodzący, jak na przykład: Ginzburga-Landaua, Bogoliubova de Gennea, Usadela a także formalizm Hamiltonowski opisujący nadprzewodzące *qubity*, *qudity* i *qutrity* oraz wskazał na potrzebę użycia formalizmów propagatorowych Usadela. Hierarchia użytych formalizmów została zilustrowana na rysunku A.1.

Związki między rozdziałami czasami nie są zbyt silne, ale zauważalne. W pracy czasami pojawiają się powtórzenia (podobne rysunki i analogiczne wyprowadzenia wzorów).

Manuskrypt zawiera usterki typograficzne w niektórych rysunkach i wzorach (np. wzory zachodzące na margines, braku zastosowania odpowiednich wyróżnień funkcji trygonometrycznych i cyklometrycznych, które obniża jej wartość estetyczną).

Treść pracy została napisana poprawnym językiem. Plan przedstawiony we wstępie rozprawy został zrealizowany. Uzyskane wyniki zostały zilustrowane graficznie, jednak niektóre z ilustracji graficznych wymagają powiększenia np. Fig. 5.4 i 5.5 na str. 80. Ponadto opis niektórych ilustracji graficznych i myśli jest zbyt ogólnikowy. Rys. 4.12 na str. 70 powinien odwoływać się do Rys. 8.1-8.6, 8.12-8.20 oraz tabeli 8,1 a także do rys. 10.17.

Chciałbym uzyskać od doktoranta odpowiedź na następujące pytania:

- Czy uJJ lub FIJJ mogą służyć do implementacji *qubitu*?
- Czy nadprzewodnik w schemacie uJJ lub FIJJ musi być singletowy i czy mógłby być trypletowy (odnosząc się do łącznego spinu pojedynczej pary Coppera)?

- Proszę podać czynniki wpływające na współczynnik γ we wzorze (6.14) na str. 102. Jak wygląda to równanie w wielopasmowej teorii nadprzewodnika opisanego za pomocą formalizmu GL mając na uwadze sytuację w nadprzewodniku, w której dwa pasma generują rezerwuar par Coopera i przyczyniają się do własności nadprzewodnictwa?
- Proszę przedstawić charakterystykę prądowo-napięciową układu uJJ dla przypadku *granulowanych* nadprzewodników.
- Proszę przedstawić strukturę fizyczną implementującą *qubit* za pomocą uJJ (FIJJ) z kontrolowanym źródłem prądowym oraz *qubit* uJJ kontrolowany strumieniem pola magnetycznego
- Proszę omówić łącznie układ przedstawiony na rys. 9.1b i rys. 6.12.
- Proszę przedstawić prądowo-fluksonowo kontrolowany nadprzewodzący *qudit* w nadprzewodniku typu *p*.
- Proszę przedstawić prądowo-fluksonowo-napięciowo kontrolowany nadprzewodzący *qutrit* w nadprzewodniku typu *p*.
- Odnosząc się do układu z rys. 9.4 na str. 159 uzupełnić pierwszy od góry wzór na str. 161 tak aby uwzględniał wzajemne oddziaływanie wszystkich nadprzewodzących igieł.
- Proszę odnieść rys. 5.6 do równań (B.4, (B.5) i wzorów ze str. 225.

Pewnym mankamentem rozprawy jest podjęcie przez jej Autora wielu wątków wykorzystujących różnego rodzaju formalizmy bez pełnej koncentracji na jednym formalizmie zastosowanym do jednego typu układu fizycznego.

Na podstawie analizy tekstu rozprawy można stwierdzić, że jej Autor operuje bardzo obszerną wiedzą eksperymentalną, która nie została szerzej opisana *explicite*. Jak można sądzić zwiększyłoby to znacznie objętość manuskryptu.

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Autor rozprawy nie ustrzegł się drobnych błędów podczas redagowania pracy, które nie zmieniają rangi uzyskanych wyników i wkładu doktoranta do teorii np.:

- Przedstawiony na stronie xxi wykaz oznaczeń i skrótów powinien być podzielony na dwie części (np. ang. „*Nomenclature and symbols*”, „*Acronyms*”).
- Rys. 1.6 na str. 11 powinien zostać uzupełniony o strzałki wskazujące układ współrzędnych *a, b, c*.
- Niewłaściwa typografia oraz brak systematyczności (np. *rot()* na str. 13, $a=b \neq c$ na str. 15, etc.).
- Brak numeracji tabel na str. 42-44, 46, 47, 54, 57, 58, 238-239.
- Rys. 4.4 i 4.5 a także rys. 4.8 i 4.9 ilustrujący zachowanie wielkości fizycznych podczas kolejnych iteracji metody relaksacyjnej mógłby zostać przeniesiony do załącznika.
- Na rys. 4.14 na str. 72 nie podano osi. zakładam, że Autorowi chodziło o magnetyzację. Nie opisano wartości d_S i d_F na osi odciętych.
- Powtarzanie rys. 6.1. i wzorów (6.1-6.2) na str. 94-95.
- Na str. 160-161 brak numeracji równań.
- Mało klarowny rys. 9.5 na str. 162.

Wykaz pozostałych drobnych błędów edytorskich zamieściłem poniżej:

Pozycja w tekście	Jest	Opis
Str. xxi-xxiii	Xx	Brak numeru strony.
Str. 8	dc, Ac	DC, AC

Str. 2 i dalsza część pracy	Fig. [1.2]	Fig. 1.2
Str. 2	!	Symbol do pominięcia
Str. 30	Fig. ??	Brak numeru obrazka.
Str. 99, 143 i następne	Fig 6.6,6.7,6.8,6.9,6.10,6.11 Fig. 8.22,8.23,8.24,8.25	Fig 6.6-6.11 Fig. 8.22-8.25
Str. 151	[?]	Brak numeru referencji.
Od str. 154		Zbyt mała czcionka.
Str. 164	Fig. ???	Zły rysunku.
Str. 165	[?]	Zły numer referencji
rów. (10.1) na str. 185		Brak $f(t)$ w niektórych składnikach po prawej stronie równania.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Przedstawione w pracy podejście i wyniki skupiają się nad poszukiwaniem nowej architektury złącza Josepshona oraz badaniem ich właściwości. Z punktu widzenia elektroniki bardzo interesującym poruszonym w pracy zagadnieniem jest przypadek *granulatowego* złącza Josepshona w architekturze uJJ (FIJJ), które jest względnie proste do zamodelowania i zostało zaprezentowane przez autora rozprawy na konferencji ICSM'2014 [H]. Zaproponowany model można bezpośrednio zaimplementować w postaci nowego urządzenia w specjalizowanym symulatorze obwodowym Berkeley SPICE¹¹. Ponadto można opracować dedykowany pakiet przeznaczony do modelowania obwodów nadprzewodzących oparty na przedstawionej w pracy metodzie relaksacyjnej. Połączenie tego z projektami przyszłych eksperymentów dla uJJ i FIJJ oraz nadprzewodzących *quditu* i *qutritu* czyni pracę ciekawą z punktu widzenia analizy i projektowania specjalizowanych układów scalonych ASIC¹² (klasa układów scalonych wysokiej i najwyższej skali integracji projektowanych dla konkretnych zastosowań i wytwarzana w małych seriach) wykorzystujących klasyczne i niekonwencjonalne złącza Josepshona, a także budowy superkomputerów nowej generacji wykorzystujących własności fizyczne zjawiska nadprzewodnictwa. Podejście takie jest w chwili obecnej bardzo poważnie rozważane ze względu na nieustany wzrost zapotrzebowania na moc obliczeniową superkomputerów, który prowadzi do znacznego wzrostu wydzielanego w nich ciepła. Problem odprowadzenia ciepła wydzielonego w jednostkach obliczeniowych jest krytycznym elementem systemów komputerowych (np. 10MW przy mocy obliczeniowej 1016 LINPACK¹³ FLOPS/s). Jednym z realnych i obiecujących rozwiązań jest budowa superkomputerów kriogenicznych opartych na złączach Josepshona, dla których szacowane jest ca. 500 (czy nawet 10000) krotne zmniejszenie rozpraszanego ciepła. Prace nad takimi systemami zostały podjęte zarówno przez DARPA¹⁴ oraz czołowe naukowe ośrodki europejskie, zaś przedstawione rozważania pozwolą na lepsze projektowanie i modelowanie tych maszyn. Praca proponuje nowe konstrukcje elementów elektronicznych oraz metodykę ich modelowania, która jest niezwykle istotna w przypadku bardzo kosztownego procesu ich wytwarzania. Poza koniecznością wykorzystania elementu skali (ang. mass effect) istotnym elementem prac powinno być wykazanie, że struktury FIJJ (uJJ) będą szybsze od klasycznie stosowanych układów (np. CMOS). Uważam, że w przyszłych pracach powinno się również:

¹¹ SPICE – ang. Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis

¹² ASIC – ang. an Application-Specific Integrated Circuit

¹³ Standaryzowany algorytm do porównywania mocy obliczeniowej komputerów.

¹⁴ DARPA – ang. Defense Advanced Research Projects Agency, USA

- Określić charakterystykę prądowo-napięciową FIJJ i uJJ dla różnych częstotliwości prądu elektrycznego przepływającego przez strukturę i przy różnych zewnętrznych polach magnetycznych,
- Wykazać możliwości implementacji *qubitu* w układach uJJ, FIJJ w sytuacji zastosowania nadprzewodnika monokrystalicznego oraz w sytuacji *granulowanego* nadprzewodnika.
- Przeprowadzić analizę możliwych źródeł dekoherencji w nadprzewodzącym *qudicie* i *qutricie* oraz wykonać symulacje zadawania i odczytu stanów kwantowych poszczególnych *qubitów*.

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

Opracowanie, opis i wyprowadzenie podstawowych fizycznych własności uJJ, FIJJ oraz *quditów* jest niewątpliwie dużym osiągnięciem Autora. Posiada on duży zasób wiedzy teoretycznej w przedmiocie rozprawy. Z całą pewnością można stwierdzić, że rozprawa spełnia wymagania stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora.

Biorąc pod uwagę, że w pracy mgr Pomorski:

- Wskazał co najmniej dwa układy fizyczne o możliwym zastosowaniu praktycznym (nadprzewodzący *qudit* i *qutrit* oraz nadprzewodzący ogranicznik prądu), które powinny znaleźć odzwierciedlenie w postaci zgłoszeń patentowych.
- Zaproponował nowy kierunek badań teoretycznych układów fizycznych zidentyfikowanych przez niego jako FIJJ i uJJ oraz TIJJ.
- Zaproponował koncepcje i rozwiązania, które znalazły odzwierciedlenie na okładce i w artykule [B] wrześniowego wydania *Physica status solidi B* (publikacja z *listy filadelfijskiej*) w 2012 roku, oraz zostały również wyróżnione pierwszym miejscem za prezentację w sesji plakatowej [H] na jednej z największych konferencji dotyczących nadprzewodnictwa ang. *International Conference on Superconductivity and Ferromagnetism 2014* (ICSM 2014),

moja ocena pracy jest bardzo wysoka, pomimo jej mankamentów wynikających zapewne z pośpiechu przy jej pisaniu. Wnioskuje zatem o dopuszczenie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Krzysztofa Pomorskiego do publicznej obrony.



Podpis