

Prof. dr hab. inż. Andrzej Napieralski

Łódź, dn. 11.11.2014 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**

Niniejsza recenzja dotyczy drugiej wersji rozprawy doktorskiej, która została gruntownie przeredagowana na podstawie rozporządzenia MNiSW z 22.09.2011r art. 6.6 po uwagach recenzentów. W przedłożonej wersji zmieniono strukturę pracy oraz naniesiono szereg korekt i ulepszeń odnoszących się do uwag zawartych w poprzedniej recenzji. Autor rozprawy zawarł w nowej wersji rozważania dotyczące wykorzystania niekonwencjonalnego złącza Josephsona jako układu implementującego *qubit* z różnymi układami kontrolującymi – koncepcja fazowa i strumieniowa. Ponadto Autor wykluczył koncepcje kontroli *qubitu* przez bramkę napięciową (ang. *charge superconducting qubit*) oraz przedstawił analityczne rozwiązania zlinearyzowanego równania GL¹ dla przypadku zmodyfikowanego niekonwencjonalnego złącza Josephsona (μJJ^2) w różnych geometriach (tj. prostokątnej, cylindrycznej i sferycznej).

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 BCS³, BdGe⁴, GL⁵ model RSCJJ⁶ i FCS⁷, 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 i przewodzącego paska na powierzchnię nadprzewodnika. Złącze to może zostać uogólnione do przypadku polikrystalicznych (*granulowanych*) nadprzewodników. Wielką zaletą tego typu układów jest prostota procesu

¹ GL – ang. *Ginzburg-Landau equations*

² μJJ – ang. *modified unconventional Josephson junction*

³ BCS – ang. *Barden-Cooper-Schreiffer theory*

⁴ BdGe- ang. *Bogoliubov de Gennes equations*

⁵ GL – ang. *Ginzburg-Landau equations*

⁶ RSCJJ -ang. *Resistor Capacitor Shunted Josephson junction*

⁷ FCS – ang. *Full Counting Statistics*

technologicznego w jakim są one uzyskiwane, co w połączeniu z unikatowymi własnościami nadprzewodników czyni je świetnymi kandydatami do implementacji układów nadprzewodzących wysokiej skali integracji oraz w przyszłości być może także do implementacji *qubitów* i komputera kwantowego.

Autor definiuje nową klasę struktur uJJ⁸ i FIJJ⁹ dla przypadku mono i polikrystalicznego, jako powstałe przez nałożenie paska nienadprzewodzącego będącego metalicznym materiałem nieferromagnetycznym lub ferromagnetykiem na pasek nadprzewodzący o zadanej grubości i nazywa je odpowiednio: niekonwencjonalne złącze Josephsona (uJJ) i połowo indukowane złącze Josephsona (FIJJ). Wydaje się, że główną motywacją do podjęcia powyższych badań przez mgr inż. Krzysztofa Pomorskiego, są wyniki eksperymentalne uzyskane przez Luisa Gomeza (rys. 1.2 na str.7; [3]) oraz wyniki eksperymentów przeprowadzonych przez W. Clintona [5, 44-46] i S. Reymonda [52, 66].

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 jednowymiarowego. Pod sam koniec pracy (rys.2.31 na stronie 62) 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 jest uwzględnione przez poszerzony funkcjonal energii GL (2.33-2.41, str. 46-48) opisany w [29,31].

W pracy wprowadzono również koncepcję temperaturowo indukowanych niekonwencjonalnych złączy Josephsona (TuJJ¹⁰ i TFIJJ¹¹). Autor zaprezentował też uogólnienie koncepcji architektury nadprzewodzącego *qubitu* w postaci nadprzewodzącego *qudity* 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*).

W rozprawie Autor zaproponował wykorzystanie niekonwencjonalnego złącza Josephsona jako układu implementującego *qubit* z różnymi układami sterującymi – koncepcja fazowa i strumieniowa oraz wykluczył koncepcje kontroli *qubitu* przez bramkę napięciową (ang. *charge superconducting qubit*).

Zagadnienia opisywane przez Autora rozprawy są istotne zarówno z punktu widzenia teorii efektu Josephsona, nowych architektur urządzeń nadprzewodzących wyrażonych przez uJJ, FIJJ, *qudity* i *qutrity* oraz opisu rozważanego temperaturowo indukowanego złącza

⁸ uJJ – ang. unconventional Josephson junction

⁹ FIJJ – ang. field induced Josephson junction

¹⁰ TuJJ – ang. Temperature induced FIJJ

¹¹ TFIJJ – ang. Temperature induced uJJ

Josephsona. Wskazują one na 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 scalonych systemów analogowych i cyfrowych.

Tezy rozprawy nie są przedstawione w sposób jawny, można jednak je podać w następującej postaci:

1. *Istnieją trzy fundamentalne konfiguracje pola magnetycznego mające bezpośredni wpływ na własności fizyczne złącza FIJJ. W ogólnym przypadku mamy do czynienia z jednoczesną nieliniową superpozycją (współistnieniem) tych trzech, dwóch albo pojedynczej konfiguracji (patrz rys. 5.5 na str. 92).*
2. *Złącze FIJJ może zachowywać się (w zależności od parametrów fizycznych) jako słabe złącze lub też jako quasitunelowe złącze Josephsona.*
3. *Układ μJJ^2 może być uznany jako złącze Josephsona (patrz rozdział 6) przez podanie analitycznego rozwiązania dla zlinearyzowanego formalizmu GL. Istnieje analogia GL z rozwiązaniem równaniem Schrödingera dla cząstki swobodnej ze zmodyfikowanymi warunkami brzegowymi.*

Częściowe potwierdzenie pierwszej i drugiej tezy znalazło uzasadnienie w jakościowych wynikach numerycznych zaprezentowanych w publikacji doktoranta w EJTP w [C] oraz w PSS B'2012 [B] jak również zostało przedstawione na rys. 2.13, 2.14 oraz rys.5.4 str. 91. Trzecia teza została uzasadniona [N].

Dodatkowo Autor rozprawy zajął się również następującymi zagadnieniami badawczymi:

- W artykule EJTP'2010 [C] wskazał możliwość występowania "topologicznego efektu Meissnera"¹³, który polega na tym, że w przypadku SQUIDu typu FIJJ z dwoma paskami ferromagnetycznymi namagnesowanymi w płaszczyźnie SQUIDu i silnie z sobą oddziałyującymi tak, że magnetyzacja każdego z pasków ferromagnetycznych jest wzmocniona przez wzajemne oddziaływanie pasków (rozdział 3.1.1 str. 69; rys. 10 w [C]) w pewnych warunkach 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 niekiedy obracać się o kąty dyskretne¹⁴ (rys.3.5 na str. 73). Autor nie zbadał tego ciekawego efektu, ale jego podjęcie jest wskazane w

¹² μJJ – ang. *modified unconventional Josephson junction*

¹³ Nazwa zaproponowana przez Autora przedłożonej rozprawy.

¹⁴ α_1, α_2 mogą przyjmować w stanie nadprzewodzącym wartości dyskretne, podczas gdy nadprzewodnik w stanie normalnym przyjmują wartości ciągłe.

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.

- Autor przedstawił również analityczne rozwiązania zlinearyzowanego równania GL dla przypadku zmodyfikowanego niekonwencjonalnego złącza Josephsona (μ JJ) w geometrii prostokątnej oraz wskazał kierunek analizy dla geometrii sferycznej i cylindrycznej (rozdział 6).

W rozdziale 5.1 Autor rozprawy postuluje, że złącze FIJJ może być przybliżane złączem quasi-tunelowym Josephsona bądź też słabym złączem Josephsona (rys. 5.5, str. 92). Jest to częściowo potwierdzone przez wyniki numeryczne przedstawione na rys. 5.4 (str. 91). Dalsze potwierdzenie można uzyskać przez wskazanie efektywnego współczynnika odbicia pakietu falowego BdGe przechodzącego przez FIJJ. W rozdziale tym Autor postuluje również istnienie polowo indukowanego złącza Josephsona w układzie multiferroicznego paska nałożonego na pasek nadprzewodzący z uwagi na podobieństwo równań (2.18-2.20) z równaniami (2.9-2.11). Propozycja analizy własności uJJ (FIJJ) za pomocą pakietów falowych BdGe została zobrazowana na rys. 2.16 oraz zapisana w postaci równań przedstawionych w rozdziale 2.3 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 14 publikacjach w tym w 1 publikacji filadelfijskiej i 10 punktowanych na liście MNiSW uzyskując 61 punktów (oraz 14 pkt. zaakceptowane do publikacji w 2014r.), 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**
- [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". *Bulletin de la société et des sciences et des lettres de Lodz, Recherches sur les déformations* (2012) – **7 pkt. MNiSW**

- [E] K.Pomorski, P.Tempczyk, P.Prokopow. "Transport properties of multi pendulum system". *Bulletin de la société et des sciences et des lettres de Lodz, Recherches sur les d'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". *Bulletin de la société et des sciences et des lettres de Lodz, Recherches sur les d'déformations* (2013) – 7 pkt. MNiSW'2014
- [H] K.Pomorski, M.Zubert, P.Prokopow. Transport properties of dirty unconventional Josephson junction devices in RCSJJ 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*. Praca magisterska obroniona na Uniwersytecie Łódzkim, 2007. 68, 158
- [J] K.Pomorski, P.Prokopow, Bulletin de la société et des sciences et des lettres de Lodz, vol. LXI, no. 2, Numerical solutions of time-dependent Ginzburg-Landau equations for various superconducting structures. *Bulletin de la société et des sciences et des lettres de Lodz, Recherches sur les d'déformations* (2011),, 7 pkt. MNiSW
- [K] P.Prokopow, S.Szyniewski, K.Pomorski, Muscle control in vertical squat jump, *Human movement*, Vol. 6 (2005), No 2, pp. 116–123, 7 pkt. MNiSW
- [L] P.Prokopow, K.Pomorski, A novel motion simulator technique for generating a realistic physical human jump movement. *International Journal of Computer and Information Technology*, Vol.1 (2012), No 2
- [M] M. Zubert, K. Pomorski et.al The Heat Transport in Nanoelectronic Devices and PDEs Translation into Hardware Description Languages, *Bulletin de la société et des sciences et des lettres de Lodz, Recherches sur les d'déformations* (zaakceptowana do publikacji w 2014), 7 pkt. MNiSW
- [N] K.Pomorski, M.Zubert, P.Prokopow, Numerical solutions of nearly time-independent Ginzburg-Landau equation for various superconducting structures: III. Analytical solutions and improvement of relaxation method, *Bulletin de la société et des sciences et des lettres de Lodz, Recherches sur les d'déformations* (zaakceptowane do publikacji w 2014), 7 pkt. MNiSW

W spisie literatury zacytował 82 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 [8,9], K.K. Likharev [2,47], W. Clinton [5,46,44], S. Reymonda [52,66], J.J.V. Alvarez [59], L. Gomez [3,4].

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 doktoranta obejmującą problematykę teoretycznego opisu zjawisk fizycznych z wykorzystaniem formalizmów matematycznych oraz implementacji algorytmów numerycznych. Autor przedstawił własne kompleksowe rozwiązanie problemu opisu indukowanych (niekonwencjonalnych) złączy Josephsona (rozdziale 2 i 3) oraz zaproponował przydatne do ich rozwiązywania algorytmy numeryczne. Zaprezentowane podejście jest bardzo ciekawe z

punktu widzenia metod numerycznych (rozdział 4). W przypadku zastosowanego algorytmu relaksacyjnego do nieliniowych równań cząstkowych w dwóch wymiarach (rozdział 4; wzór (4.1-4.2), rys. 4.1) zamieszczono dodatkowe informacje o właściwościach użytego schematu numerycznego na przykładzie znanych literaturowo układów fizycznych zobrazowanych przykładowym rozwiązaniem równania GL w przypadku nadprzewodzącego kwadratu dla nadprzewodnika typu s oraz wysokotemperaturowego nadprzewodnika typu d (opisywanych przez model $GL(x^2-y^2)$ w płaszczyźnie ab). Na konferencji ICSM2014 Autor przedstawił układ *granulowanego* uJJ i FIJJ poprzez formalizm RCSJJ stosując sieć dwuwymiarowych złączy tunelowych, który w rozdziale 2.9 odwołuje się do nieliniowych równań ODE¹⁵ danych wzorami 2.73 i 2.74, których rozwiązania są przedstawione na (rys. 2.28, 2.29 na str. 60). Ten sam problem fizyczny Autor opisał przez formalizm PDE¹⁶ oraz stosując przybliżenia przez sieć złączy Josepsona aproksymacją 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, muJJ, TFIJJ oraz *qudity* i *qutrity*, pogłębiające dotychczasowy poziom wiedzy.

Głównym osiągnięciem rozprawy jest:

- wprowadzenie koncepcji polowo i temperaturowo indukowanego złącza Josepsona (uJJ i FIJJ) i zaproponowanie metodologii jego modelowania,
- uogólnienie/generalizacja architektury nadprzewodzącego qubitu do nadprzewodzącego quditu i qutritu w nadprzewodnikach wykazujących anizotropowy parametr porządku,
- postulowanie klasy nadprzewodzących złączy Josepsona 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 Josepsona (przy pewnej grubości obszaru nienadprzewodzącego rys. 3.6). Nie zostało to w pełni podkreślone w pracy, a jest to ciekawe zarówno z punktu widzenia fizyki jak i możliwości realizacji praktycznej. Charakteryzacja struktur uJJ i FIJJ w różnych geometriach została przedstawiona w tabeli 3.1 na str. 77.
- 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 Josepsona przy odpowiedniej ich geometrii i odpowiedniej początkowej magnetyzacji paska ferromagnetycznego. Autor rozprawy wprowadza również nową klasyfikację możliwych architektur nadprzewodzącego quditu i qutritu (rysunek 7.8 i tabela 7.1). 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

¹⁵ ODE – ang. *Ordinary Differential Equations*

¹⁶ PDE – ang. *Partial differential equation*

elektroniki jest wprowadzenie macierzy niekonwencjonalnych złączy Josephsona typu uJJ i FIJJ. Mogłyby one służyć do konstruowania nadprzewodzących kamer będących detektorami promieniowania elektromagnetycznego. Interesujące byłoby modelowanie czułości tego układu na sygnał pochodzący od anteny dipolowej poprzez zastosowanie równań TDGL¹⁷ 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 *granulowatych* polowo 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* polowo indukowane złącza nie są tym samym co polowo indukowane złącza Josephsona to wydają się prostsze w opisie fenomenologicznym, gdyż bazują na modelu RCSJJ i część wniosków z tego opisu mogą być użyte do przypadku monokrystalicznego nadprzewodnika. W takich układach mechanizm transportu *vorteksów* może być znacznie uproszczony, gdyż *vorteksy* (wiry pola magnetycznego) będą lokowały swoją obecność w przestrzeni pomiędzy ziarnami nadprzewodzącymi, gdzie nadprzewodzący parametr porządku $|\psi|$ osiągnie wartość minimalną. Raz określony mechanizm transportu dla *granulowatych* 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 RCSJJ 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 RCSJJ (ewentualnie połączenie GL z RCSJJ).

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 (na str. 81-85). 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 rozwiązanych przez Autora jest znalezienie wzoru analitycznego określającego rozkład parametru porządku dla struktury muJJ (w geometrii prostokątnej przedstawionemu na Rys.6.2 na stronie 114) 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. Co więcej Autor nakreśla perspektywę udoskonalenia metody relaksacyjnej w połączeniu z naszą wiedzą o analitycznych rozwiązaniach w strukturach muJJ w różnych geometriach. Takie podejście jest bardzo obiecujące i powinno zwiększyć dokładność obliczeń numerycznych, ale nie zostało przeprowadzone przez Autora poza

¹⁷ TDGL – ang. *Time Dependent Ginzburg–Landau*

wskazaniem wzoru występującego w zmodyfikowanej metodzie relaksacyjnej (wzór 6.40, strona 113). Co więcej przy odpowiednio niewielkiej perturbacji problem nieliniowego równania GL z potęgą 3 przy parametrze porządku może zostać zredukowany do innego nieliniowego równania z potęgą 2 lub do liniowego równania (bardzo mała perturbacja). W równaniach (6.39) i (6.40) brakuje minusa przy pierwszym wyrazie.

W rozprawie podjęto również tematykę opisywania procesów fizycznych zachodzących w wirach pola magnetycznego w nadprzewodniku (tzw. *vorteksów* Abrikosowa i Josephsona) w strukturach uJJ i FIJJ. Została ona zobrazowana w tabelach na stronie 86 oraz rys. 2.8 na str. 31; tabeli 2.2 na str. 32. Metodologia badawcza studiowania fizyki *vorteksów* w strukturach uJJ i FIJJ została wskazana przez Autora w rozdziale 2, ale nie została wykorzystana w obliczeniach - została wyszczególniona na str. 55-57 oraz wyrażona poprzez rys. 2.22-2.23 na str. 54-55 oraz rys.2.25. W nowej wersji pracy brakuje rys. 8.17 ze str. 142 (poprzedniej wersji rozprawy). Przedstawione również w poprzedniej wersji rozprawy mody poruszania się *vorteksów* w uJJ (FIJJ) przedstawione na str. 141-144 (poprzedniej wersji rozprawy) zostały niestety pominięte w nowej edycji. 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 wnikaniem pola magnetycznego do nadprzewodnika znany jako efekt 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 istotne, 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. 4.1 na str. 80). Praktyczny przykład aplikacji (i weryfikacja) tej metody, potwierdzający wyniki znane z literatury, zostały przedstawione między innymi na rys. 5.27 na str.101.
- 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. 3.3 na str. 71) wynikające z rozwiązań numerycznych równań GL (2.84-2.85). 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. 3.2 na str. 70 (patrz również rys. 2.19 na str. 44), zaś przypadek wymuszenia gradientu temperatury w czasie został zobrazowany na rys. 5.28 i 5.29 na stronie 101.
- Również ciekawe aplikacyjne rozwiązanie uJJ dla nadprzewodnika typu D zostało zaprezentowane na rys. 5.30-5.34 na str. 102. Wynik ten jest nieznany literaturowo. Na rys. 5.35-5.39 na str. 103 przedstawiono dalszą ewaluację tego układu do postaci podwójnego asymetrycznego uJJ (patrz. 5.39). Szkoda, że nie podjęto analogicznych rozważań dla podwójnego symetrycznego uJJ przedstawionego na rys. 2.12 (lewy rysunek).
- 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. 5.42-5.43 na str. 104 i 105.
- Zaproponowanie ogranicznika prądowego (Fig.3.8. na str. 76) w nadprzewodniku typu d wykorzystując pasek ferromagnetyka lub pasek w stanie normalnym (nienadprzewodzącym). Dzięki temu wydaje się, że układ gwałtowniej i bardziej nieliniowo 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 3.1, str. 77). 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. 7.8 na str. 126 oraz w tabeli 7.1 na str. 127.
- Zaproponowanie wzoru (8.1) na str. 146 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 obszerna. Dostarczony manuskrypt liczy łącznie 178 strony, w tym część główna rozprawy obejmuje 158 stron. W rozprawie Autor zastosował formalizmy fizyczne opisujące stan nadprzewodzący, jak na przykład: Ginzburga-Landaua, Bogoliubova de Gennea, a także formalizm Hamiltonowski opisujący nadprzewodzące *qubity*, *qudity* i *qutrity* oraz wskazał na potrzebę użycia formalizmów propagatorowych Usadela. Związki między rozdziałami niekiedy 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 5.15-5.17 na str. 91 i 97. Ponadto opis niektórych ilustracji graficznych i myśli jest zbyt ogólnikowy. Rys. 2.22 na str. 54 powinien odwoływać się do tabeli 2.3.

Chciałbym uzyskać od doktoranta odpowiedź na następujące pytania:

- Jak wygląda równanie TDGL w wielopasmowej teorii nadprzewodnika mając na uwadze sytuację w nadprzewodniku, w której dwa pasma generują rezerwuar par Coopera i przyczyniają się do własności nadprzewodnictwa?
- 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. 7.6 na str. 123 uzupełnić wzór (7.4) na str. 122 tak aby uwzględnił wzajemne oddziaływanie wszystkich nadprzewodzących igieł.

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.:

- Część wniosków nie jest dobrze opisana w rozdziałach poprzedzających podsumowanie. Niektóre z wniosków mają charakter spekulatywny,
- Niekonsekwentne formatowanie bibliografii.
- Brak numeracji równań na str. 124, 129, etc
- Mało klarowny rys. 9.5 na str. 162.

Wykaz pozostałych drobnych błędów edytorskich zamieściłem poniżej:

| Pozycja w tekście | Jest | Opis |
|--------------------|---|-------------|
| Str. ii-xv, 1-4 | Problemy z formatowaniem szablonu LaTeX - Numeracja stron powinna być ujednolicona. | |
| Str. 80 i następne | Fig 4.3,4,4.4.5 | Fig 4.3-4.5 |
| Str 1-2 | Brak konsekwencji w stosowaniu myślników pomiędzy oznaczeniem i jego opisem. | |
| Str. 3 | Powinny być myślniki pomiędzy akronimem i jego rozwinięciem. | |

| | | |
|------------------|---|--------------------------------|
| Str. 28 | „f” | Powinno być „I ₁ ”. |
| Str. 37 | Brak kursywy i stylu matematycznego we wzorach w tekście np. „5 ^b ”, „t”, etc, | „5 ^b ”, „t”. |
| Str. 35, 74, 101 | Niedopasowana wielkość rysunków w stosunku do rozmiarów strony. | |
| Str. 104 | Niewycentrowany rys. 5.41. | |
| Str. 77 | Tabela 3.1 wchodzi na marginesy strony. | |
| Str. 79 | Zły numer podrozdziału „4.0.4”. | „4.1” |
| Str. 93 | Niekonsekwentne formatowanie wzorów np. (5.1). | |

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Przedstawione w pracy podejście i wyniki skupiają się nad poszukiwaniem nowej architektury złączy Josephsona oraz badaniem ich właściwości. Z punktu widzenia elektroniki bardzo interesującym poruszonym w pracy zagadnieniem jest przypadek *granulatowego* złącza Josephsona 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 SPICE¹⁸. 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 ASIC¹⁹ (klasa układów scalonych wysokiej i najwyższej skali integracji projektowanych dla konkretnych zastosowań i wytwarzana w małych seriach) wykorzystujących klasyczne i niekonwencjonalne złącza Josephsona, 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 LINPACK²⁰ FLOPS/s). Jednym z realnych i obiecujących rozwiązań jest budowa superkomputerów kriogenicznych opartych na złączach Josephsona, dla których szacowane jest ca. 500 (czy nawet 10000) krotne zmniejszenie rozpraszanego ciepła. Prace nad takimi systemami zostały podjęte zarówno przez DARPA²¹ 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

¹⁸ SPICE – ang. *Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*

¹⁹ ASIC – ang. *an Application-Specific Integrated Circuit*

²⁰ Standardyzowany algorytm do porównywania mocy obliczeniowej komputerów.

²¹ DARPA – ang. *Defense Advanced Research Projects Agency, USA*

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:

- 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*.

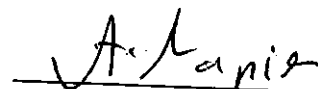
8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

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 inż. 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.
- Motywując się [3,4,5] zaproponował koncepcje FIJJ, uJJ i muJJ i ich opis przez rozwiązania GL, BdGe, RCSJJ, 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. Wnioskuje zatem o dopuszczenie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Krzysztofa Pomorskiego do publicznej obrony.


Podpis