



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Signatures of Majorana zero-modes in nanowires, quantum spin Hall edges, and quantum dots

Mi, S.

Citation

Mi, S. (2015, April 22). *Signatures of Majorana zero-modes in nanowires, quantum spin Hall edges, and quantum dots*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/32780>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Leiden University Non-exclusive license](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/32780>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/32780> holds various files of this Leiden University dissertation

Author: Shuo Mi

Title: Signatures of Majorana zero-modes in nanowires, quantum spin Hall edges, and quantum dots

Issue Date: 2015-04-22

Samenvatting

Majorana nul-toestanden zijn gebonden toestanden die optreden in het midden van de excitatie-gap (het nulpunt van energie), in materialen die bekend staan als topologische supergeleiders. Zij hebben de potentie om een bouwsteen te worden voor een kwantumcomputer, en zij zijn ook van zichzelf interessant vanwege het bijzondere effect dat zij hebben op transporteigenschappen. Het onderwerp van dit proefschrift is de theoretische studie van Majorana nul-toestanden in systemen van verschillende dimensionaliteit: de twee-dimensionale kwantum-spin-Hall-isolator, de één-dimensionale nanodraad, en de nul-dimensionale kwantumdot.

Na een korte inleiding in Hoofdstuk 1, over het concept van een Majorana nul-toestand, beginnen we in Hoofdstuk 2 met het theoretische onderzoek aan de InSb nanodraad die experimenteel is onderzocht door de Kouwenhoven groep in Delft. De zachtheid van de geïnduceerde supergeleidende gap is een raadselachtig aspect van het experiment, dat we graag zouden willen begrijpen. We vinden dat de betrekkelijk grote vrije weglengte, in combinatie met de gedeeltelijke bedekking van de nanodraad door de supergeleider, de vermoedelijke oorzaak is van de zachte gap. Een belangrijke conclusie van onze studie is dat de aanwezigheid van de zachte gap noch de vorming noch de detectie belemmert van de Majorana nul-toestanden, die aan het eindpunt van de nanodraad zouden moeten optreden.

We gaan door met een ander systeem, de rand van een kwantum-spin-Hall-isolator, gevormd door een kwantumput in een samengestelde structuur van HgTe en CdTe of van InAs en GaSb. Het ontbreken van een tunnelbarrière in zo'n systeem was een obstakel in de zoektocht naar Majorana nul-toestanden. In Hoofdstuk 3 stellen we voor dat zwakke wanorde en een zwak magnetisch veld het mogelijk moeten maken om een barrière te vormen door middel van een gate-elektrode. Op deze

manier kan een Majorana nul-toestand worden opgesloten tussen deze gate-elektrode aan de ene kant en een supergeleidende elektrode aan de andere kant. Dit is een praktisch alternatief voor een barrière die gevormd zou moeten worden met behulp van een magnetische isolator. We laten zien dat een constrictie in de kwantumput het mogelijk maakt om Majorana nul-toestanden uit te wisselen (te “vlechten”). Dit is de stap die nodig is voor de toepassing in een kwantumcomputer.

We vervolgen onze studie van dit tweedimensionale systeem in Hoofdstuk 4, waar wij een opvallende waarneming onderzoeken van een groep uit Rice University, die hebben gevonden dat de randtoestanden in een InAs/GaSb kwantumput blijven bestaan in de aanwezigheid van een loodrecht magnetisch veld van 8 Tesla. Hoewel we de experimentele data niet helemaal kunnen verklaren, vinden we wel een ongebruikelijk fasediagram in onze modelberekening. Het kritische veld voor het verdwijnen van de randtoestanden splitst zich in tweeën op als de wanorde toeneemt. Er is een hoog kritisch veld voor de overgang naar een kwantum-Hall-isolator (met randtoestanden die slechts één richting op bewegen), en een laag kritisch veld voor de overgang naar metallische bulk-geleiding. The ruimtelijke scheiding van de geïnverteerde banden van de kwantumput, typisch voor de combinatie InAs/GaSb, is essentieel voor het optreden van de bulk-geleiding — het treedt niet op in de HgTe/CdTe kwantumputten die de Würzburg groep heeft onderzocht.

De laatste twee hoofdstukken gaan over kwantumdots, kleine halfgeleidende structuren die via puntcontacten met supergeleiders zijn verbonden. In Hoofdstuk 5 onderzoeken we het optreden van resonanties in the stroom-spanning karakteristiek bij spanning nul. Deze zouden een kenmerk zijn van Majorana nul-toestanden. We vinden dat het karakteristieke Y-vormige resonantieprofiel in het B, V vlak (B is magnetisch veld, V is spanning) niet noodzakelijkerwijs een teken is van Majorana nul-toestanden. De polen van de verstrooiingsmatrix in het complexe energievlak hebben de neiging om vast te blijven zitten aan de imaginaire as, zelfs in het topologische triviale regime, eenvoudigweg als gevolg van deeltje-antideeltje symmetrie. Wat hiervoor nodig is, is gebroken tijdsomkeersymmetrie en gebroken spin-rotatiesymmetrie. (We spreken dan van symmetrie-klasse D.) Als de spin behouden is (klasse C) treedt het effect niet op. We stellen methodes voor, waarop deze “valse” Majorana-resonanties van de echte kunnen worden onderscheiden.

Tenslotte onderzoeken we in Hoofdstuk 6 of het mogelijk is om

tijdsomkeersymmetrie effectief te breken door het aanbrengen van een faseverschil tussen supergeleiders in een kwantumdot met meerdere puntcontacten. De noodzaak om een magnetisch veld aan te leggen is een ernstige experimentele complicatie, en het zou prachtig zijn als die vermeden zou kunnen worden. Drie contacten zijn voldoende om een “discrete vortex” te realiseren, die de meeste effecten nabootst van een werkelijke magnetische vortex. We tonen aan dat het mogelijk is om de elektronenpariteit van de supergeleidende grondtoestand te wisselen door de supergeleidende faseverschillen te variëren, zonder enig magnetisch veld in de kwantumdot aan te brengen. Een aanpassing van dit ontwerp (in combinatie met een topologische isolator) zou gebruikt kunnen worden om Majorana nul-toestanden te vangen en te manipuleren zonder magnetisch veld.

