

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/32149> holds various files of this Leiden University dissertation.

**Author:** Renema, Jelmer Jan

**Title:** The physics of nanowire superconducting single-photon detectors

**Issue Date:** 2015-03-05

# Samenvatting

Dit proefschrift beschrijft onderzoek naar het werkingsprincipe van supergeleidende fotondetectoren (SSPDs, naar het Engelse acroniem). Zulke detectoren hebben belangrijke technologische toepassingen, maar er is nog veel onbekend over het werkingsmechanisme. Om deze detectoren te onderzoeken maken we gebruik van *quantumdetectortomografie* (QDT). Dit is een methode om de respons van een fotondetector in de basis van aantaltoestanden (Fock-basis) te meten. In het eerste, inleidende hoofdstuk geven we een korte introductie op de stand van het vakgebied en van de technieken die in dit proefschrift gebruikt worden. We bespreken verder de verschillende theorieën die opgesteld zijn voor het detectiemechanisme van SSPDs.

In het tweede hoofdstuk demonstreren we hoe quantumtomografie gebruikt kan worden om een supergeleidende fotondetector te karakteriseren. We hebben de methode aangepast om hem geschikt te maken voor detectoren met een kleine absorptie. Door een extra factor in de vergelijkingen toe te voegen die deze absorptiekans beschrijft kunnen we de (interne) detectiekans na absorptie scheiden van de absorptiekans zelf. Door het toevoegen van deze extra variabele wordt het systeem van vergelijkingen dat onze respons beschrijft onbepaald; we lossen dit op door via een aanname van schaarsheid (sparsity) modelselectie te introduceren. We vinden dat de absorptiekans overeenkomt met de op basis van de experimentele geometrie verwachte waarde. We vinden verder dat de absorptiekans onafhankelijk is van de instelstroom door de detector. Uit deze twee waarnemingen trekken we de conclusie dat we daadwerkelijk de interne en externe processen in de detector gescheiden hebben. We laten zien dat de detector niet-lineair gedrag kan vertonen: het is mogelijk om de instelstroom zo te kiezen dat de detector sterker reageert op twee tegelijkertijd geabsorbeerde fotonen dan op basis van de detectiekans van individuele fotonen te verwachten is.

In het derde hoofdstuk beginnen we met de fysische interpretatie van de meetresultaten die verkregen zijn door QDT. In dit hoofdstuk wordt de *energie-stroomrelatie* geïntroduceerd, die verderop een cruciale rol zal spelen. De energie-stroomrelatie is het functioneel verband dat aangeeft hoeveel instelstroom nodig is om een foton van een gegeven energie met een vooraf gekozen detectiekans (typisch 1%) te detecteren. We laten zien dat enkel de totale energie van de excitatie belangrijk is voor de energie-stroomrelatie, en

niet de manier waarop die energie over een aantal fotonen verdeeld is. Met andere woorden: als de detector aangeslagen wordt door twee fotonen met een golflengte  $\lambda$ , dan reageert de detector precies zo als wanneer hij aangeslagen wordt met een foton met golflengte  $\lambda/2$ . We laten zien dat er een universele responscurve bestaat voor SSPDs: voor detectiekansen tussen de  $10^{-4}$  en 0.3 is de detectiekans enkel een functie van een lineaire combinatie van de totale energie en instelstroom. We vinden dat de dark counts zich niet aan deze relatie houden.

Het vierde hoofdstuk is gewijd aan een meting van de energie-stroomrelatie. De verschillende modellen van het werkingsmechanisme in een SSPD zijn van elkaar te onderscheiden doordat ze elk een andere voorspelling doen voor deze energie-stroomrelatie. We maken gebruik van de in hoofdstuk 2 vastgestelde eigenschappen van multifotonexcitatie om het dynamisch bereik van onze meting op te rekken tot in het vacuum-ultraviolet. Door verschillende foton aantallen binnen een enkel experiment met elkaar te vergelijken lukt het ons om de energie-stroomrelatie met een precisie van 50 nA te meten. We vinden dat de energie-stroomrelatie ook bij deze nauwkeurigheid lineair is. Hiermee sluiten we modellen uit waarin er een cilindervormig normaal domein in de detector aanwezig is, of laten we in ieder geval zien dat het normale domein geen rol speelt in de detectiegebeurtenis. Vervolgens meten we de temperatuurafhankelijkheid van de energie-stroomrelatie. We vinden dat deze de temperatuurafhankelijkheid volgt van de intreeënergie van een vortex in het materiaal. Hieruit trekken we de conclusie dat vortices een belangrijke rol spelen in de detectiegebeurtenis. We concluderen dat in het detectiemechanisme zowel diffusie van quasideeltjes als vortexdynamica een belangrijke rol spelen.

In hoofdstuk vijf onderzoeken we de energie-stroomrelatie op microscopisch niveau. Door de detector aan te slaan met licht van verschillende polarisaties en golflengtes kunnen we selectief excitatie aanbrengen op verschillende posities in de breedterichting van de draad. We nemen waar dat licht dat loodrecht op de draad gepolariseerd is een lagere instelstroom nodig heeft dan licht dat parallel aan de draad gepolariseerd is. Omdat de parallelle polarisatie meer in het midden geabsorbeerd wordt, leiden we hieruit af dat de grenswaarde van de instelstroom die nodig is om een detectiegebeurtenis te veroorzaken aan de randen van de draad lager is dan in het midden van de draad. Deze resultaten bieden een verklaring voor het verschijnsel dat de stroom die nodig is voor een efficiënte detector geen scherpe drempelwaarde heeft: bij lage stromen worden de randen van de detector actief, en naarmate de stroom hoger wordt, gaat langzaam steeds meer van het midden meedoen met het detectieproces. We vergelijken deze metingen met berekeningen in de context van een numeriek model dat diffusie van quasideeltjes, herverdeling van stroom onder invloed van de quasideeltjes en het binnendringen van vortices omvat. We zien sterke kwalitatieve overeenkomst: zowel het model als het experiment voorspellen een gebied midden in de draad waar de grenswaarde van de instelstroom min of meer constant is, gevolgd door een snel

dalende waarde aan de randen. De berekende waarde en de experimentele waarden liggen minder dan een factor 2 uit elkaar.

In het zesde hoofdstuk onderzoeken we hoe de detectiekans afhangt van een extern aangebracht magneetveld. We vinden drie regimes. Bij lage magneetvelden neemt de benodigde instelstroom voor een vaste detectiekans kwadratisch af met toenemend magneetveld. In een tussenregime wijkt de detector af van dit gedrag; de benodigde stroom neemt nog steeds af, maar minder sterk dan op basis van het kwadratisch verband verwacht zou worden. In het derde regime is de detectiekans slechts zwak afhankelijk van de instelstroom. We interpreteren het kwadratisch regime in termen van de oplossing van de Usadel-vergelijking voor een homogene stroomdragende draad in een magneetveld. We vinden goede overeenstemming tussen de gemeten en berekende waarden van de coëfficiënten die het functioneel verband tussen instelstroom en magneetveld beschrijven. Voor de andere twee regimes vinden we een kwalitatieve verklaring die steunt op het idee dat er permanent vortices in de draad aanwezig zijn. Uit deze resultaten trekken we de conclusie dat het onmogelijk is om het fundamentele detectiemechanisme efficiënter te maken door een magneetveld aan te leggen. Metingen waarbij dit wel gezien is, moeten geïnterpreteerd worden in termen van herverdeling van de stroom door bochten en andere obstakels in meanderstructuren.

In hoofdstuk zeven presenteren we een voorlopige dataset van metingen aan de interactielengte tussen twee excitaties naast elkaar in de draad. Op basis van eerdere experimenten verwachten we dat er een zekere afstand is waarbinnen de twee excitaties samen tot een detectiegebeurtenis leiden. We vinden dat deze afstand ongeveer 25 nm bedraagt voor de hoogste stromen die we in ons experiment kunnen bereiken. Bij lagere stromen neemt de interactieafstand linear af. Deze metingen zijn kwalitatief consistent met de modellen die we in eerdere hoofdstukken hebben onderzocht.

In het laatste hoofdstuk vatten we de belangrijkste conclusies uit het proefschrift samen.

