



Universiteit
Leiden

The Netherlands

Insights from scanning tunneling microscopy experiments into correlated electron systems

Benschop, T.

Citation

Benschop, T. (2023, September 26). *Insights from scanning tunneling microscopy experiments into correlated electron systems*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3642190>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/3642190>

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

Samenvatting

Dit proefschrift bevat inzichten verkregen door het doen van scanning tunneling microscopie metingen op zogenaamde gecorreleerde elektronen systemen. Gecorreleerde elektronen systemen zijn materialen waarin elektronen sterk met elkaar interageren. In normale metalen treden deze interacties ook op, echter, door het grote aantal vrije elektronen in metalen word deze sterk afgeschermd. Daarom is het voldoende om de elektronen in normale metalen te beschrijven als een gasachtige toestand waarin elektronen geen of weinig interactie met elkaar hebben. Op deze manier kan men zeer adequaat de elektrische eigenschappen van normale metalen verklaren. Het blijkt alleen dat dit model niet toepasbaar is op de zogenoemde gecorreleerde elektronen systemen. Doordat de elektron-elektron interacties hierin zo prominent aanwezig zijn doen zich hierin een breed scala aan exotische elektronische toestanden voor. Sommige hiervan komen aan bod in dit proefschrift.

In hoofdstuk 2 presenteren we de resultaten van STM metingen op zwaar gedoteerde koper oxide kristallen.

Koper oxide kristallen (cupraten) zijn hoge-temperatuur supergeleiders met veel onbegrepen elektronische toestanden. Echter, voor lange tijd dacht men dat de supergeleiding die optreed bij voldoende hoge zuurstof dotering, onder de gebruikelijke Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) theorie valt. Dit is in tegenspraak met recente metingen van de dichtheid van gepaarde ladingsdragers in cupraten. Deze blijkt namelijk te verdwijnen wanneer de kritische temperatuur van de materialen naar nul gaat, in tegenspraak met wat men vanuit de BCS theorie verwacht. Onze scanning tunneling microscopie metingen van zwaar gedoteerde $(\text{Pb,Bi})_2\text{Sr}_2\text{CuO}_{6+\delta}$ hoge-temperatuur supergeleiders laten zien dat de verdwijnende paardichtheid verklaard kan worden aan de hand van een speciale supergeleidende toestand die ontstaat. We observeren een toestand waarbij supergeleidende eilandjes van enkele nanometers ingesloten worden door een metallische matrix. Daarnaast laten onze metingen zien dat deze supergeleidende toestand tot stand komt doordat het gat in de toestandsdichtheid, veroorzaakt door de supergeleiding, opgevuld word in plaats van sluit naarmate de kristallen zwaarder gedoteerd zijn. Verder zien we dat het gat in de toestandsdichtheid ook aanwezig is in kristallen die geen macroscopische supergeleiding meer vertonen. Een belangrijke implicatie van deze observaties is dan ook dat supergeleiding dus niet verdwijnt door een zwakker wordende bindings interactie tussen elektronen. Bovendien kunnen we uit de gemeten ratio tussen de spectroscopische gat-grootte en de gat-opvulling con-

cluderen dat wanorde in de kristallen niet substantieel bijdraagt aan het breken van de supergeleidende elektronenparen. Om deze redenen kunnen we daarom niets anders dan concluderen dat het mechanisme achter supergeleiding in zwaar gedoteerde cupraten kwalitatief anders is dan dat beschreven is in gebruikelijke (BCS) mean-field theorie.

In hoofdstuk 3 bestuderen we structuren van gedraaid dubbellaags grafeen en kwantificeren we hun locale draaihoek en deformatie op de schaal van enkele nanometers.

De elektrische eigenschappen van gedraaid dubbellaags grafeen hangen sterk af van de exacte draaihoek tussen de individuele lagen grafeen. Door de draaiing tussen de lagen ontstaat er een Moiré patroon. Over het algemeen zijn de elektronische eigenschappen van de gedraaide dubbellaag triviaal. Echter, bij een paar zo geheten “magische” draaihoeken kunnen de elektrische eigenschappen van de dubbellaag niet meer verklaart worden met conventionele banden theorie, omdat elektronen hier sterk met elkaar interageren. Deze toestanden doen zich alleen voor in een klein interval van ongeveer een tiende van een graad rondom deze magische draaihoeken. Daarom is het erg belangrijk om deze draaihoek accuraat te kunnen bepalen. We kunnen dit doen door het ontstane Moiré patroon te meten, omdat de periodiciteit hiervan direct afhangt van de draaihoek tussen de lagen. Wij introduceren een nieuwe methode om inhomogeniteiten in een Moiré patroon in kaart te brengen en passen deze toe op grote topografieën gemeten op gedraaide dubbellaags grafeen (TBG). We stellen vast dat de gemeten variatie in de draaihoek van een doorsnee TBG structuur, gemeten over enkele honderden nanometers, ongeveer 0.08° is rond het gemiddelde van 2.02° . Dit is vergelijkbaar met TBG structuren die ingekapseld zijn in hBN. Dit is belangrijk omdat in de huidige literatuur, structuren waarvan verondersteld wordt dat ze dezelfde draaihoek hebben, vaak verschillend elektronische gedrag laten zien. De inhomogeniteit van de draaihoek in de structuur wordt hiervoor vaak als oorzaak aangewezen. Bij onze methode onderscheiden we een effectieve draaihoek en een locale anisotropie, waarbij de laatste gekoppeld wordt aan roosterdeformatie tussen de twee lagen. Onze bevindingen laten zien dat voor de door ons onderzochte TBG structuren, de heterogeniteit van de locale draaihoek evenveel invloed heeft op de elektronische eigenschappen als de locale roosterdeformatie. De methode die wij hier introduceren is breed toepasbaar op data van verschillende microscopie technieken, en van verschillende Moiré materialen.

In hoofdstuk 4 beschrijven we hoe hardware benodigd voor het uitvoeren van ruis spectroscopie metingen in een commerciële lage temperatuur STM opstelling gebouwd en gekarakteriseerd kan worden.

Bij reguliere STM metingen beperkt men zich vaak tot het meten van de tijdsgemiddelde, DC tunnelstroom. Tijdsafhankelijke fluctuaties van de tunnelstroom worden vaak niet in acht genomen, terwijl deze inzicht kunnen geven in bijvoorbeeld de aard van ladingsdragers in een materiaal. Dit komt omdat de meeste STM opstellingen maar over een beperkte bandbreedte beschikken. Wij beschrijven hier het ontwikkel-, bouw- en testproces van een nieuwe versterker die de tunnelstroom kan meten bij frequenties van enkele MHz en tegelijkertijd conventionele STM metingen kan doen. Dit

is mogelijk door toepassing van een LC resonator en een huis-gemaakte high electron mobility transistor met een zeer lage ruis in het versterker schema. De versterker is operationeel gedurende alle conventionele STM meetprocessen, en kan dus opereren in een junctiebereik van enkele giga-ohms tot puntcontact. Hierdoor blijft de gebruikelijke atomaire resolutie van STM metingen behouden. De versterker heeft een hoge signaal-ruis verhouding en kan gebruikt worden in een commerciële lage temperatuur, ultra-hoog vacuüm STM opstelling. Dit wordt mogelijk gemaakt door het gebruik van supergeleidende spoelen en het kiezen van materialen en elektrische componenten die een lage thermische belasting hebben bij de bouw van de versterker. Om de uitstekende prestatie van onze versterker aan te tonen, meten we de Poissonian hagelruiskarakteristiek van tunnelende elektronen op een atomair schoon goud oppervlak (Au(111)).

In hoofdstuk 5 bespreken we de resultaten van ruismetingen op het oppervlak van Sr_2IrO_4 en zetten we uiteen hoe een random telegraph ruisbron de versterking van de ruis die we meten kan verklaren.

Sr_2IrO_4 is een Mott isolator met tevens een sterke spin-baan koppeling. Hier bespreken wij de resultaten van onze ruis spectroscopie metingen op dit materiaal. In de gemeten ruis zijn substantiële verhogingen zichtbaar ten opzichte van de gebruikelijke Poissonian ruiskarakteristiek. Deze versterkingen lijken sterk gelokaliseerd te zijn, maar tevens niet gecorreleerd aan kenmerken van de lokale elektronische toestandsdichtheid. Het bestaan van een bron van random telegraph ruis naast de normale (Poissonian) hagelruis van de elektronen zou de gemeten versterkingen van de ruis kunnen verklaren. Door onze data te fitten met een model vinden we bijbehorende karakteristieke frequenties van ongeveer ~ 100 GHz. We denken dat deze ruis versterkingen een indicatie kunnen zijn van polaron formatie in Sr_2IrO_4 .

