

Supravodljivi prijelaz u nanostrukturama od zlata s mrežom tankog filma niobija

Cerović, Antonio¹

¹Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb
(Datum: 21. siječnja 2023.)

Supravodljivo stanje materijala je ono u kojem materijal vodi struju bez otpora te "izbacuje" magnetsko polje iz sebe. U prirodi postoje materijali koji su supravodiči ispod neke kritične temperature te oni koji nisu. Ako se napravi spoj supravodiča i običnog metala između kojih je kontakt dobar, na nekoj temperaturi doći će do induciranja supravodljivosti u običnom metalu koji inače nije supravodljiv. U ovom eksperimentu se istražuje spoj tankih slojeva zlata i niobija te se očekuje nastanak supravodljivosti u zlatu. Uzorak se mjeri u različitim jačinama okomitog magnetskog polja te se prati promjena kritične temperature u odnosu o jačini polja.

I. UVOD

U prirodi postoji stanje materijala u kojem isti vodi struju bez otpora te "izbacuje" magnetsko polje iz sebe. To stanje se naziva supravodljivo i ono je makroskopski kvantni fenomen. Prvu mikroskopsku teoriju supravodljivosti napravili su Bardeen, Cooper i Schrieffer 1957. godine koja je po njima dobila naziv BCS teorija.

Ta teorija polazi od pretpostavke da između elektrona postoji privlačna sila koja može nadvladati Coulomb-ovo odbijanje. U većini materijala, ta privlačna sila dolazi od međudjelovanja elektrona sa fononima. Ukupno međudjelovanje elektrona u materijalu se tada sastoji od direktne interakcije te fononom posredovane interakcije. Na dovoljno niskim temperaturama, u nekim materijalima, fononom posredovano međudjelovanje elektrona nadvlada direktno međudjelovanje te dolazi do sparivanja parova elektrona. Spareni elektroni su suprotnih momenata i spinova, jer je to najniže energetska stanje, a nazivaju se Cooperovi parovi. Naziv su dobili po Leonu Cooper-u koji ih je otkrio. Cooperovi parovi nastaju sparivanjem elektrona blizu Fermijeve površine te imaju energiju manju od pripadnih slobodnih elektrona. Sparivanjem elektrona također dolazi i do procjepa u energijskom spektru od 2Δ , gdje je Δ parametar uređenja. Treba uzeti u obzir da se Cooperovi parovi u nekom smislu ponašaju kao bozoni te ih može biti više u istom stanju, što znači da oni čine kolektivno stanje najniže energije. Također, elektroni u Cooperovom paru su prostorno udaljeniji nego što je udaljenost susjednih elektrona u metalu. Razlog zašto materijal mora biti na dovoljno niskoj temperaturi da bi bio u supravodljivom stanju je procjep u energijskom spektru. Ako je temperatura previsoka tako da je termalna energija veća od energijskog procjepa, Cooperovi parovi se raspadaju na obične elektrone te ne može doći do supravodljivosti.

Sada je moguće zapitati se što će se dogoditi ako se u kontakt sa supravodičem dovede normalni metal. Na slici 1 shematski je prikazano međudjelovanje na granici dva materijala. Jednadžbe koje opisuju to ponašanje su Bogoliubov-de Gennes-ove jednadžbe [1]. Radi jednostavnosti, u ovom slučaju dane su u 1D prostoru

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d}{dx^2} - \mu\right) u(x) + \Delta(x)v(x) = E\psi(x) \quad (1)$$

$$\left(\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d}{dx^2} + \mu\right) v(x) + \Delta(x)u(x) = E\psi(x), \quad (2)$$

gdje u i v predstavljaju elektronsku odnosno šupljinu komponentu, a $\Delta(x)$ predstavlja procjep ovisan o prostornoj koordinati. Dodatno je pretpostavljeno da se raspršenje događa samo na granici materijala u $x = 0$, što je također pojednostavljeno. Potencijal je pretpostavljen kao $V(x) = H\delta(x)$. Prema rubnim uvjetima, valna funkcija je kontinuirana, a njena derivacija ima diskontinuitet u $x = 0$

$$\psi_S(0) = \psi_N(0) \quad (3)$$

$$H\psi(0) = \frac{\hbar^2}{2m} \left(\psi'_S(0) - \psi'_N(0)\right). \quad (4)$$

Rješavanjem prethodnih jednadžbi za upadni elektron $\psi_{inc} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} e^{iq^+x}$, dobiju se rješenja

$$\psi_{ref} = a \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} e^{iq^-x} + b \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} e^{-iq^+x} \quad (5)$$

$$\psi_{trans} = c \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} e^{ik^+x} + d \begin{pmatrix} v \\ u \end{pmatrix} e^{-ik^-x}, \quad (6)$$

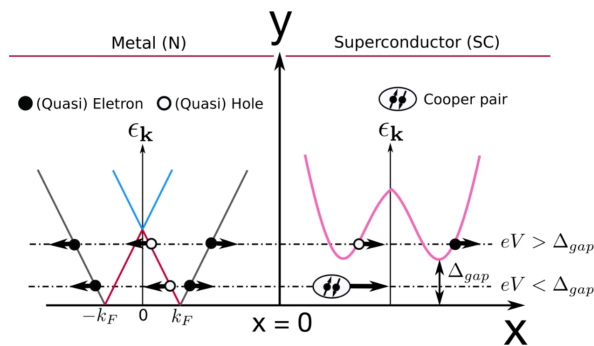
a k^\pm i q^\pm su dani relacijama

$$\hbar k^\pm = \sqrt{2m} \sqrt{\mu \pm \sqrt{E^2 - \Delta^2}} \quad (7)$$

$$\hbar q^\pm = \sqrt{2m} \sqrt{\mu \pm E^2}. \quad (8)$$

Iz formula je jasno vidljivo da se elektron može elastično odbiti na granici, te da se može Andreev raspršiti. Za pojednostavljeno je moguće staviti $H = 0$, posljedično $b = d = 0$, što znači da postoji savršen kontakt i nema elastičnog odbijanja, već samo Andreevog raspršenja. Kod Andreevog raspršenja upadni elektron valnog vektora q^+ te spina gore odbije se kao šupljina valnog vektora q^- te spina dolje, a u supravodiču nastane

Cooperov par. Ako je kinetička energija upadnog elektrona manja od supravodljivog procjepa u supravodiču, nastali Cooperov par ima imaginarnu komponentu valnog vektora, te će u kratkom vremenu izgubiti dodatnu energiju i vratiti se u osnovno stanje (Slika 1). U slučaju da je energija elektrona veća od supravodljivog procjepa, elektron će normalno proći kroz barijeru te će u supravodiču nastati Bogoljubljeva čestica. U realnom slučaju postojati će upadni elektrona manjih i većih energija od supravodljivog procjepa. Za energije manje od supravodljivog procjepa, struja u normalnom metalu biti će duplo veća, dok će u supravodiču biti 0. Ponovnim uključivanjem nesavršenog kontakta ($H \neq 0$) te povratkom u realnost, sustav ima dodatna elastična raspršenja. Također, potencijal više nije delta funkcija, već postoje raspršenja i dalje od granice. Kao ukupan rezultat dobije se inducirana supravodljivost u tankom sloju normalnog metala, te smanjena supravodljivost u tankom sloju supravodiča, oko granice dvaju materijala.



Slika 1. Shematski prikaz mogućih događaja na granici supravodiča i normalnog metala. [2]

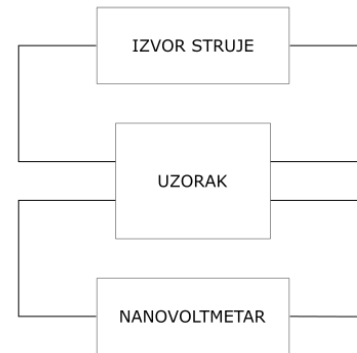
II. MATERIJALI I METODE

Istraživani uzorak u ovom eksperimentu sastoji se od nanostrukture zlata, koje nije supravodljivo, na kojem je mreža tankog filma niobija. Svi uzorci, među kojima je i promatrani, napravljeni su pod vodstvom prof. dr. sc. Nine Marković u Goucher College, Baltimore, MD, te u čistim sobama na Singh Center for Nanotechnology, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA, SAD. Popunjenost niobijem ispitivanog uzorka je 50% te se on nalazi na slici 2, dolje desno. Pošto je niobij supravodič s kritičnom temperaturom od 9.33 K [3], očekuje se na nekoj temperaturi ispod 9.33 K induciranje supravodljivosti u zlatu.

Eksperimentalni postav sastoji se od uzorka, izvora struje Keithley 6221, nanovoltmetra Keithley 2182A te uređaja za hlađenje Cryogenic Ltd Cryogen-Free Magnet System. Sa slike 2 je vidljivo da svaki uzorak ima po dva zlatna izvoda sa svake strane koji služe za 4-kontaktno mjerenje otpora. Uzorak se tankim žicama, pomoću *bon-*



Slika 2. Četiri uzorka od kojih je svaki uzorak nanostruktura zlata prekrivena mrežom tankog filma niobija određene popunjenosti. Popunjenost uzorka: gore lijevo - 20%, gore desno - 30%, dolje lijevo - 40%, dolje desno - 50%.



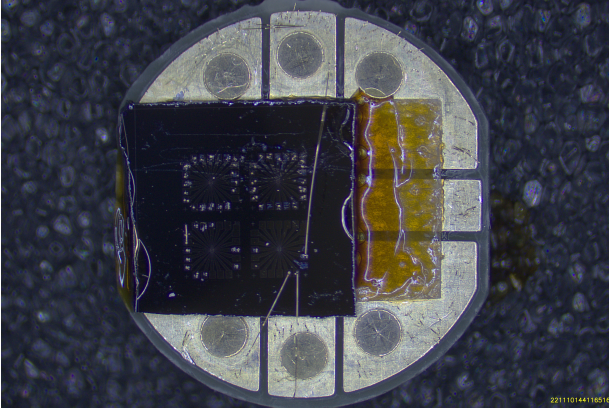
Slika 3. Shema spajanja instrumenata na uzorak. Crte predstavljaju žice.

*dera*¹, spaja na adaptersku pločicu tako da je sa svake strane uzorka, na jedan izvod spojen izvor struje, a na drugi nanovoltmetar. (Slika 3)

Na slici 4 je prikazan spoj uzorka na adaptersku pločicu iz koje se vidi da su spojena samo tri kontakta zbog problema nastalog pri spajanju žica. Četvrta žica nije se mogla spojiti na uzorak, pa je taj četvrti kontakt spojen žicom između gornjeg lijevog i gornjeg desnog izvoda na adapterskoj pločici. To znači da je mjerenje 3-kontaktno te da postoji dodatni otpor spojen u seriju koji će biti potrebno prilikom obrade podataka eliminirati. Ovakvo spojena pločica spaja se na adapter koji se potom umeće u sustav hlađenja.

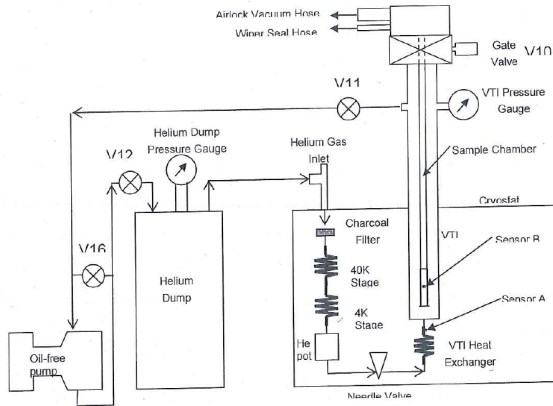
Shema uređaja za hlađenje dana je na slici 5. Uređaj ima zatvoren sustav hlađenja, te koristi pulse-tube hlađenje. Ciklus hlađenja započinje uključivanjem pumpe koja ispumpava helij iz posude u kojoj se nalazi. Helij potom ulazi u kriostat te prolazi kroz ugljeni filter

¹ Uređaj za stavljanje kontakata na uzorak



Slika 4. Pločica sa 4 skupine uzoraka, od kojih svaka skupina sadrži 4 uzorka. Promatrani uzorak spojen je sa tankim žicama na adaptersku pločicu.

u kojem se pročišćava od nečistoća. Potom prolazi kroz prvi fazu hlađenja u kojem se hladi na temperaturu od 40 K . U toj se fazi također hladi i zaštitni sloj koji se nalazi oko hladnog dijela sustava. U drugoj fazi helij se hladi na 4 K te se kondenzira i skuplja u posudu. U toj fazi se direktnim toplinskim kontaktom također hladi supravodljiva zavojnica, koja se nalazi oko VTI-ja. Iz te posude, helij teče kroz ventil na kojem ekspandira te se dodatno hladi na temperaturu od oko 1.6 K . Za kraj prolazi kroz VTI (Variable Temperature Input) izmjenjivač topline gdje se po potrebi grije na željenu temperaturu. Helij potom hladi uzorak oko kojeg prolazi, te se vraća nazad prema pumpi.



Slika 5. Shema sustava za hlađenje. [4]

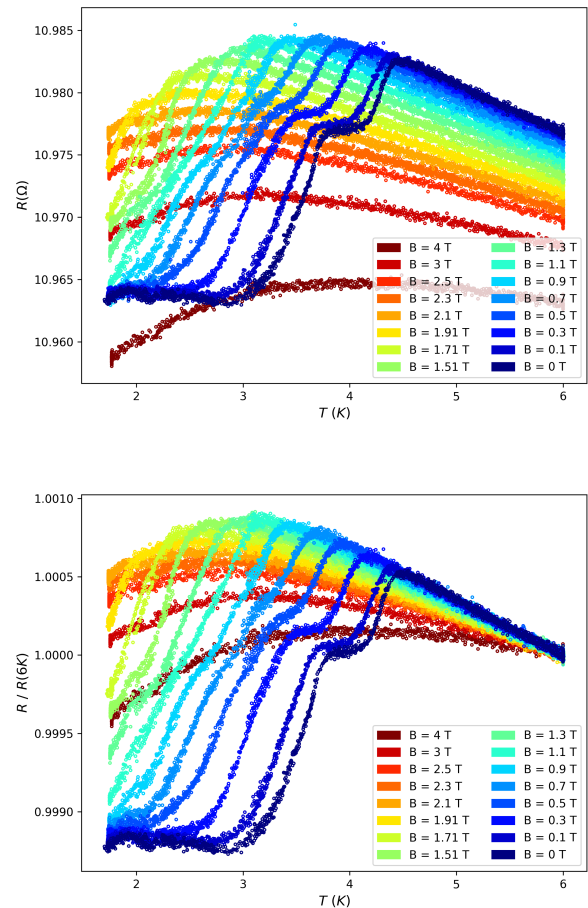
Provedba eksperimenta započinje hlađenjem uzorka na temperaturu od 6 K . Uzorak se mjeri u rasponu temperatura od 1.6 K do 6 K . Nakon što je uzorak ohlađen, mjerenje se provodi puštanjem struje od $10\text{ }\mu\text{A}$ te mjerenjem napona, a nakon tog i puštanjem struje od $-10\text{ }\mu\text{A}$ te mjerenjem napona. Iz dobivenih napona i struja računa se otpor za svaki od smjerova struja, a kao rezultat mjerenja uzima se prosječna vrijednost dobivenih otpora.

Tim se postupkom eliminira eventualna neravnopravnost smjerova prolaska struje. Postupak se ponavlja dok se temperatura polako smanjuje prema 1.6 K i povećava nazad prema 6 K . Dvostruko mjerenje, za vrijeme grijanja i hlađenja, daje potvrdu da nije došlo do eventualne ireverzibilne promjene otpora. Također, mjerenja su provedena za različite jačine magnetskog polja koje je okomito na uzorak.

Na kraju je provedeno mjerenje uzorka zlata koji na sebi nema niobija. To mjerenje će služiti kao referentno mjerenje, te će pokazati postoji li u uzorku sa niobijem inducirana supravodljivost u zlatu.

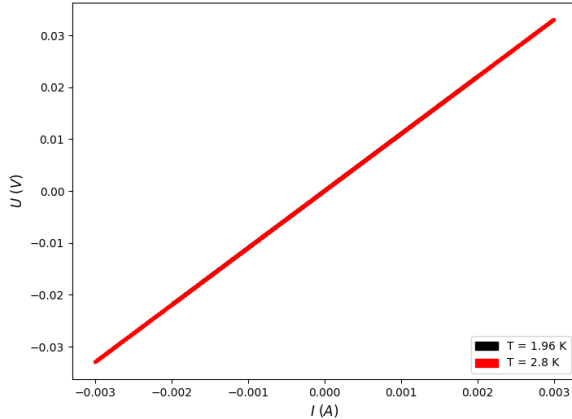
III. REZULTATI

Za uzorak sa niobijem, izmjeren je otpor u rasponu temperatura od 1.6 K do 6 K za magnetska polja okomita na uzorak u rasponu od 0 T do 4 T . Na slici 6 prikazani su podaci dobiveni iz mjerenja.



Slika 6. Gornja slika prikazuje otpor uzorka u ovisnosti o temperaturi te za različita magnetska polja. Donja slika prikazuje normalizirani otpor pojedine krivulje sa otporom iste krivulje na temperaturi od 6 K .

Iz grafova se jasno vidi inducirani supravodljivi prijelaz u zlatu. Za jača magnetska polja, temperatura prijelaza je niža, a za polja jača od oko 2 T, više nije vidljiv jasan prijelaz. Obje stvari su u skladu s očekivanjima. Iako pad otpora izgleda jako vidljiv, pogledom na y os može se vidjeti da je promjena otpora minimalna.

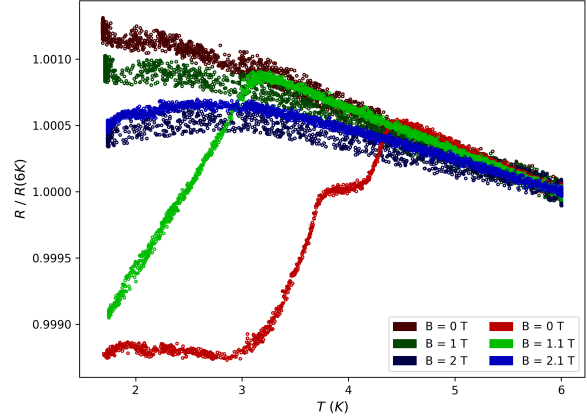


Slika 7. I-V karakteristika uzorka na dvije različite temperature.

To se također može vidjeti na I-V karakteristici na slici 7. Sa grafa je očito da je I-V karakteristika pravac, što je inače karakteristično za obične Ohmske vodiče. I-V karakteristika za supravodiče nije pravac na dovoljno maloj struji, nego se tek za veće struje približava pravcu, jer jača struja smanjuje supravodljivost. Također postaje sve više nalik pravcu kako se temperatura supravodiča približava kritičnoj. U ovom slučaju graf 7 ne kaže da nema supravodljivosti, već kaže da je smanjenje otpora toliko malo da je skoro nezamjetno.

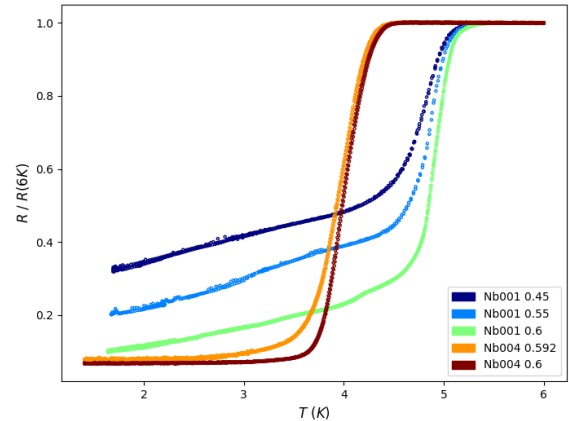
Dodatna potvrda da je stvarno došlo do malog supravodljivog prijelaza vidi se na slici 8. Svaka boja prikazuje odnos uzorka sa niobijem (svjetlije) i uzorka bez niobija (tamnije) za jednaka (približno jednaka) magnetska polja. Zelene i crvene krivulje su više dane okvirno jer postoji razlika u magnetskim poljima. Iz tog grafa je vidljiva jasna razlika između uzoraka te iako je mala, postoji inducirana supravodljivost.

S obzirom na to da ovo nije prvi mjereni uzorak, moguće je usporediti mjerenja drugih uzoraka sa ovim. Prijašnja mjerenja prikazana su na slici 9. Izmjereni uzorci su iz dvije različite skupine uzoraka. Sa slike je vidljivo da su mjerenja drugih uzoraka dala puno bolje rezultate, ali isto tako su uzorci iz skupine Nb004 dali bolja mjerenja od uzoraka iz skupine Nb001. Inducirana supravodljivost u ovim uzorcima, a pogotovo u Nb004, puno je veća nego u uzorku koji je ovdje promatran. Iz mjerenja uzoraka iz skupine Nb001, vidi se da inducirana supravodljivost ovisi i o postotku popunjenosti niobijem. Također treba uočiti da niti u najboljim mjerenjima na uzorcima iz skupine Nb004 nije došlo do pada otpora na



Slika 8. Slika prikazuje odnos normaliziranog otpora u uzorku sa niobijem te u uzorku bez niobija. Krivulje uzoraka sa niobijem su svjetlije, a bez tamnije.

nulu. To je zato što se uvijek mjere i serijski spojeni zlatni izvodi koji su prikazani na slici 2.



Slika 9. Prijašnja mjerenja ostalih uzoraka iz drugih skupina uzoraka (Nb001 i Nb004) za magnetsko polje od 0 T.

Moguće objašnjenje malog pada otpora je loš kontakt između niobija i zlata, odnosno nakupina nečistoća između ta dva sloja. To bi rezultiralo lošim "curenjem Cooperovih parova" u zlato te posljedično manjom induciranom supravodljivošću od očekivane.

IV. ZAKLJUČAK

Zaključno, u uvodu je ukratko objašnjen nastanak supravodljivosti u sklopu BCS teorije. Također je detaljnije objašnjen nastanak inducirane supravodljivosti. Ona nastaje u materijalu koji nije supravodič kada je on u kon-

taktu sa supravodičem, a za nju je odgovorna Andreeva refleksija.

Nadalje opisan je uzorak te princip spajanja uzorka na adaptersku pločicu i umetanje u uređaj za hlađenje. Ukratko je opisan princip rada uređaja za hlađenje. Mjerenje otpora uzorka je 3-kontaktno, zbog neuspjelog spajanja žica, te se mjeri otpor dva puta, za struje istog iznosa, a suprotnog smjera i uzima prosjek. Za kraj je izmjereno zlato bez niobija kao referentno mjerenje za potvrdu inducirane supravodljivosti.

Kao što se vidi na slikama, zlato je prešlo u inducirano supravodljivo stanje na temperaturi od oko 4 K te u magnetskom polju 0 T . Kako se magnetsko polje pojačava, tako se i kritična temperatura smanjuje dok se na velikim poljima više ne vidi jasan supravodljivi prijelaz. Pad otpora ispod kritične temperature ispao je jako mali, to-

liko da je čak i I-V karakteristika pravac, što je obilježje običnih vodiča. Ipak, potvrdu supravodljivog prijelaza dala je usporedba sa mjerenjam uzorka koji nema niobij. Također, usporedba sa prijašnjim mjerenjima drugih uzoraka, pokazala je da su ostali uzorci imali puno veći supravodljivi prijelaz. Moguće objašnjenje je loše proizveden uzorak koji nema dobar kontakt između niobija i zlata.

V. ZAHVALE

Rad je napravljen pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Emila Tafre, kojemu zahvaljujem na mentoriranju, pomoći pri mjerenju uzorka i interpretaciji rezultata te sugestijama u pisanju seminara.

-
- [1] T. M. Klapwijk, Proximity effect from an andreev perspective, *Journal of Superconductivity* **17**, 593 (2004).
 - [2] Y.-Y. Chang, C.-Y. Mou, and C.-H. Chung, Andreev reflection in two-dimensional relativistic materials with realistic tunneling transparency in normal-metal/superconductor junctions, *Phys. Rev. B* **96**, 054514 (2017).
 - [3] M. A. Tanatar, D. Torsello, K. R. Joshi, S. Ghimire, C. J. Kopas, J. Marshall, J. Y. Mutus, G. Ghigo, M. Zarea, J. A. Sauls, and R. Prozorov, Anisotropic superconductivity of niobium based on its response to nonmagnetic disorder, *Physical Review B* **106**, 10.1103/physrevb.106.224511 (2022).
 - [4] *Cryogen-Free Magnet System User Manual*, Cryogenic Limited, London, UK (2016).
 - [5] G. E. Blonder, M. Tinkham, and T. M. Klapwijk, Transition from metallic to tunneling regimes in superconducting microconstrictions: Excess current, charge imbalance, and supercurrent conversion, *Phys. Rev. B* **25**, 4515 (1982).
 - [6] N. Marković, C. Christiansen, and A. M. Goldman, Thickness–magnetic field phase diagram at the superconductor–insulator transition in 2d, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 5217 (1998).