

Marković-ETF

By Boris Marković



Univerzitet Crne Gore
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

A Džordža Vašingtona bb., 81000 Podgorica Crna Gora
T +382 20 245 839 F +382 20 245 839 E etf@ucg.ac.me W www.ucg.ac.me/etf



Broj: 01/2-2071
Datum: 30.10.2024

UNIVERZITET CRNE GORE

- Odbor za doktorske studije -

- Prof. dr Boris Vukićević, predsjednik -

OVDJE

U skladu sa članom 41 Pravila doktorskih studija, u prilogu dostavljamo elektronsku verziju (CD) doktorske disertacije „**Uticaj magnetnog polja na THz zračenje generisano sistemima Josephson-ovih spojeva**“ kandidata mr **Borisa Markovića**, radi provjere softverom za utvrđivanje plagijata.



DEKAN,
[Signature]
Prof. dr Budimir Lutovac

UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

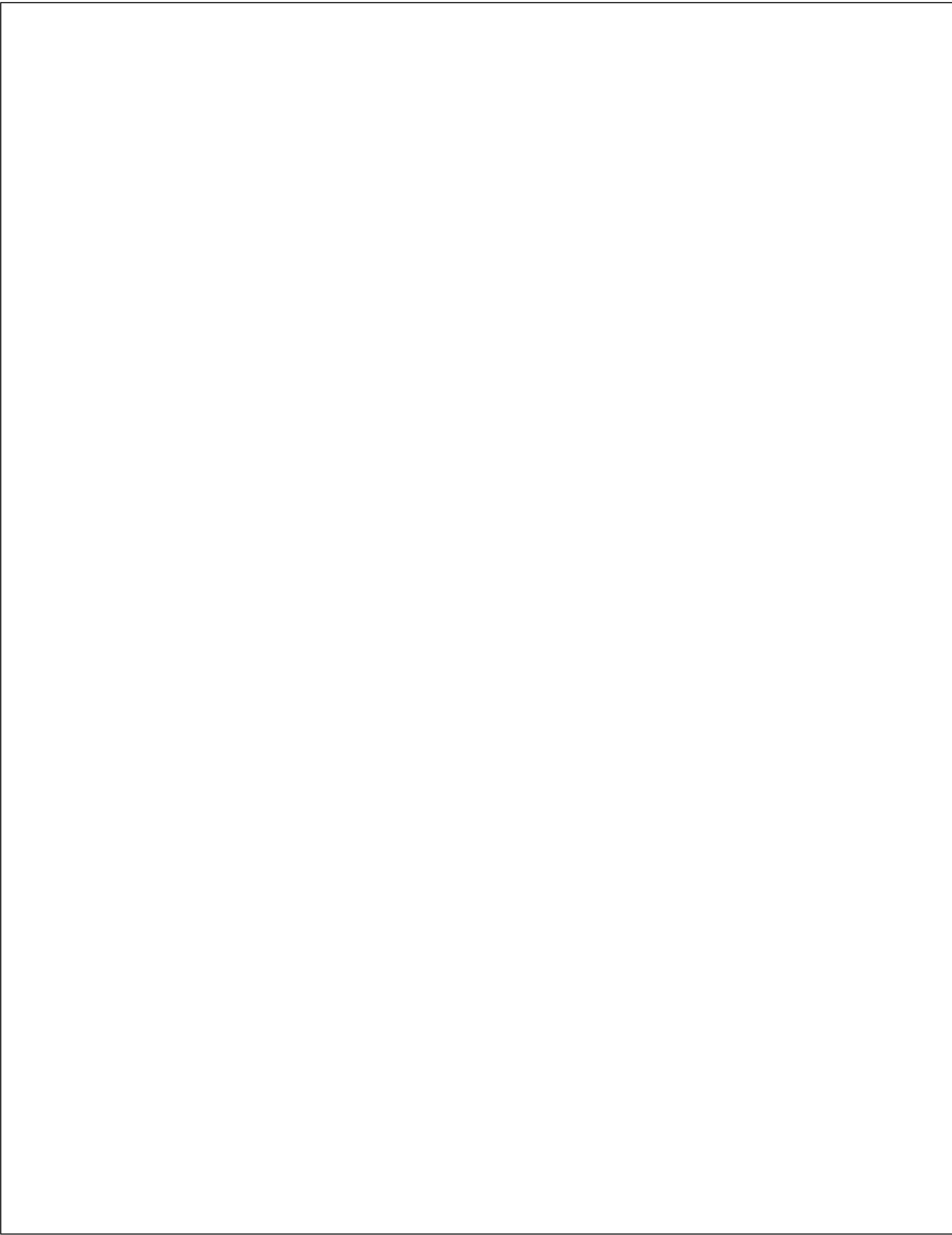
Boris Marković

UTICAJ MAGNETNOG POLJA NA THz ZRAČENJE
GENERISANO SISTEMIMA JOSEPHSON-OVIH
SPOJEVA

2

DOKTORSKA DISERTACIJA

Podgorica, 2024



PODACI I INFORMACIJE O DOKTORANTU

Ime i prezime: Boris Marković
Datum i mjesto rođenja: 13.11.1970. godine, Titograd, Crna Gora, SFRJ
Naziv završenog postdiplomskog studijskog programa i godina završetka: Elektrotehnika - Mikroprocesorski sistemi, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija, SRJ, 1996. godina

2 INFORMACIJE O DOKTORSKOJ DISERTACIJI

Naziv doktorskih studija: Doktorske studije elektrotehnike, Mikrotalasna tehnika
Naziv teze: Uticaj magnetnog polja na THz zračenje generisano sistemima Josephson-ovih spojeva
Fakultet na kojem je disertacija odbranjena: Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore

UDK, OCJENA I ODBRANA DOKTORSKE DISERTACIJE

Datum prijave doktorske teze: 11.04.2008. godine
Datum sjednice Senata Univerziteta na kojoj je prihvaćena teza: 22.12.2024. godine
Komisija za ocjenu podobnosti teze i kandidata: 2 prof. dr Milutin Ostojić
prof. dr Dragan Filipović
prof. dr Ana Jovanović
Mentor: prof. dr Dragan Filipović
Komisija za ocjenu doktorske disertacije: prof. dr
prof. dr
prof. dr
Komisija za odbranu doktorske disertacije: prof. dr
prof. dr
prof. dr
prof. dr
prof. dr
Lektor:
Datum odbrane: __.__.202_. godine
Datum promocije: __.__.202_. godine

PREDGOVOR

Ova doktorska disertacija, na kojoj je rad započet u decembru 2007. godine i najveći dio završen do septembra 2009. godine, bila je zamišljena da pokaže kako se naučna istraživanja u inženjerskim naukama direktno primjenjuju na praktičnim problemima i u tehnološkim inovacijama.

Rezultati naučno istraživačkog rada na kojima je disertacija utemeljena objavljeni su u renomiranim časopisima u periodu od 2014. do 2016. godine [58, 59, 93, 100].

Senat UCG je odobrio doktorsku tezu u decembru 2022. godine.

U Podgorici 19.09.2024.godine

Boris Marković

ZAHVALNICE

Naučno istraživački dio ovog rada je realizovan zahvaljujući nesebičnoj podršci i razumijevanju prof. dr Jovana Mirkovića i prof. dr Kazuo Kadowakia sa Univerziteta u Tsukubi, Japan.

Zahvaljujem se mom mentoru prof. dr Draganu Filipoviću posebno na pomoći u realizaciji stručnog dijela rada.

Veliku zahvalnost dugujem prof. dr Veselinu Ivanoviću, Ministru energetike prof. dr Saši Mujoviću i Rektor UCG prof. dr Vladimiru Božoviću, koji su svojom hrabrošću, profesionalnošću i akademskom etičnošću omogućili da dođem u situaciju da predam ovu doktorsku disertaciju.

Mojim roditeljima i porodici se ne mogu odužiti za podršku i svaki drugi vid pomoći koje su mi pružali tokom cijelog procesa izrade doktorske disertacije.

U Podgorici 19.09.2024. godine

Boris Marković

IZVOD TEZE

Razvoj uređaja koji emituju elektromagnetsko zračenje u terahercnom (THz) domenu predstavlja ključan korak u ostvarivanju brojnih naučnih i tehnoloških primjena. Upotreba ovih uređaja posebno je značajna u medicinskoj dijagnostici, biologiji, farmaciji, nadzornim i komunikacionim sistemima visoke propusnosti, kao i u sigurnosnim i odbrambenim sistemima. Takođe, ključnu ulogu imaju u analizi fizičkih i hemijskih karakteristika organskih i neorganskih materijala.

Do 2008. godine, kada su započeta istraživanja prezentovana u ovom radu, najmoćniji uređaji koji su emitovali THz elektromagnetsko zračenje imali su snagu reda veličine μW i bili su zasnovani na *Intrinsic Josephson Junction* (IJJ) sistemima od $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ monokristala, čiji spojevi su koherentno zračili u THz domenu. Ipak, snaga zračenja ovih sistema bila je nedovoljna za praktične primjene, što je nametnulo potrebu za istraživanjem novih metoda za njeno pojačanje i širu upotrebu.

Kroz analizu ranijih istraživanja, postavljena je pretpostavka da jako magnetno polje može imati pozitivan uticaj na pojačanje snage THz zračenja postojećih oscilatora. Takođe, smanjenje negativnih efekata samozagrijavanja kod realizovanih terahercnih oscilatora sa *intrinsic Josephson*-ovim spojevima prepoznato je kao efikasan metod za povećanje broja spojeva koji koherentno zrače, odnosno za pojačanje zračenja.

Međutim, rani eksperimentalni rezultati ostvareni u laboratorijama u kojima se ovaj rad realizovao, pokazali su da već relativno slaba magnetna polja uzrokuju pomjeranja I - V karakterističnih krivih izvan uslova potrebnih za generisanje THz zračenja, odnosno da značajno smanjuju snagu zračenja u postojećim IJJ sistemima. Ovi rezultati su doveli do dublje analize vorteksnog stanja unutar $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ monokristala, posebno fokusirane na formiranje i ponašanje nakošene vorteksne rešetke pod uticajem magnetnog polja. Analiza je ukazala da magnetno polje doprinosi formiranju složenog vorteksnog stanja, što može narušiti uslove potrebne za koherentno THz zračenje *intrinsic Josephson*-ovih spojeva i dovesti do smanjenja ili potpunog gašenja generisanog THz zračenja.

Da bi se prevazišli prethodno navedeni problemi, i postigla praktično upotrebljiva snaga THz zračenja, pristupilo se redizajnu postojećih terahercnih oscilatora. Primijenjeni redizajn je značajno smanjio efekat samozagrijavanja, omogućivši povećanje broja spojeva u IJJ sistemima baziranim na $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ monokristalima, i posljedično pojačanje snage zračenja do nivoa upotrebljivosti. Novodizajnirani terahercni oscilatori su uspješno realizovani, a njihova praktična primjenjivost potvrđena je kroz implementaciju sistema za refleksiono THz snimanje i sistema za THz kompjuterizovanu tomografiju.

ABSTRACT

The development of devices that emit electromagnetic radiation in the terahertz (THz) domain represents a crucial step toward achieving numerous scientific and technological applications. The use of these devices is particularly important in medical diagnostics, biology, pharmacy, surveillance and high-bandwidth communication systems, as well as in security and defense systems. Additionally, they play a key role in the analysis of the physical and chemical characteristics of organic and inorganic materials.

At the beginning of this research, the most powerful available devices that emitted THz electromagnetic radiation had power levels in the order of μW and were based on Intrinsic Josephson Junction (IJJ) systems made from $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ crystals, whose junctions coherently radiated in the THz domain. However, the radiation power of these systems was insufficient for practical applications, which created the need to explore new methods for enhancing the power and enabling broader usage.

Through the analysis of previous research, a hypothesis was proposed that a strong magnetic field could have a positive impact on increasing the power of THz radiation generated by existing oscillators. Additionally, reducing the negative effects of self-heating in realized terahertz oscillators with intrinsic Josephson junctions was identified as an effective method for increasing the number of coherently radiating junctions, thereby enhancing the overall radiation power.

However, early experimental results from the laboratories where this work was conducted demonstrated that even relatively weak magnetic fields cause shifts in the I–V characteristic curves away from the conditions required for THz radiation generation, significantly reducing the radiation power in existing IJJ systems. These findings led to a deeper analysis of the vortex state within $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ crystals, with a particular focus on the formation and behavior of the tilted vortex lattice under the influence of a magnetic field. The analysis suggested that the magnetic field contributes to the formation of a complex vortex state, which may disrupt the conditions necessary for coherent THz radiation from intrinsic Josephson junctions, potentially leading to a reduction or complete cessation of generated THz radiation.

To overcome the aforementioned challenges and achieve practically usable THz radiation power, a redesign of the existing terahertz oscillators was undertaken. The applied redesign significantly reduced the self-heating effect, allowing for an increase in the number of junctions in IJJ systems based on $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ crystals, and consequently enhancing the radiation power to a usable level. The newly designed terahertz oscillators were successfully implemented, and their practical applicability was confirmed through the implementation of a system for reflective THz imaging and a system for THz computed tomography.

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Definicija zadatka	3
3. Analiza uticaja magnetnog polja na IJJ THz emitere bazirane na $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ monokristalima	5
3.1. Uticaj magnetnog polja na snagu zračenja IJJ-THz emitera	5
3.2. Uticaj magnetnog polja na vorteksno stanje $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ monokristala	7
4. Efikasna izrada IJJ-THz emitera uz značajno smanjene efekte samozagrijavanja.	10
4.1. Priprema uzoraka	15
4.1.1. Procesi izrade samostalnih mesa struktura	15
4.1.2. Povezivanje i fiksiranje samostalnih mesa struktura	17
4.2. Mjerna postavka	19
4.3. Rezultati	20
4.3.1. Karakteristike uzoraka	20
4.3.2. Strujno-naponske i karakteristike frekvencije zračenja	21
4.3.3. Procjena snage zračenja	26
4.3.4. Karakteristike zračenja na I-V strukturi sa višestrukim grananjem	27
4.3.5. Oblici zračenja	33
5. Praktična primjena realizovanih ijj-thz emitera	34
5.1. Sistem za refleksiono THz snimanje realizovan pomoću IJJ-THz emitera	35
5.2. Kompjuterizovana tomografska slika korišćenjem IJJ-THz emitera	43
6. Zaključak	48
Literatura	50

1. UVOD

Razvoj uređaja koji emituju elektromagnetsko zračenje u terahercnom (THz) domenu predstavlja ključan korak u ostvarivanju brojnih naučnih i tehnoloških primjena. Upotreba ovih uređaja posebno je značajna u medicinskoj dijagnostici, biologiji, farmaciji, nadzornim i komunikacionim sistemima visoke propusnosti, kao i u sigurnosnim i odbrambenim sistemima. Takođe, ključnu ulogu imaju u analizi fizičkih i hemijskih karakteristika organskih i neorganskih materijala.

Intrinsic Josephson-ovi spojevi (IJJ) u visokotemperaturnom superprovodniku $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ su pokazali veliki potencijal za izradu oscilatora koji emituju elektromagnetno zračenje u terahercnom (THz) frekventnom opsegu.

Međutim, uređaji kreirani 2007 godine sa podlogama-substratima od $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ monokristala imali su izražene efekte samozagrijavanja koji negativno utiču na njihov rad i ograničavaju maksimalnu frekvenciju na približno 1 THz. Takođe je i snaga zračenja bila ograničena na nekoliko μW , što je onemogućavalo praktičnu primjenu, odnosno moglo se koristiti samo u naučno istraživačke svrhe.

Ze potrebe eliminisanja prethodno navedenih problema i ograničenja, tražila su se rješenja u okviru dostupnih tehnologija. Uticaj jakih magnetnih polja na THz zračenje i promjena tehnologije izrade i dizajna emitera na prvom mjestu u cilju eliminisanja efekta samozagrijavanja, uzeti su u razmatranje.

Cilj rada koji se realizuje u sklopu doktorske disertacije je da se naučno-istraživačkim metodama pojača THz zračenje sistema *intrinsic Josephson*-ovih spojeva realizovanih pomoću $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ monokristala, do nivoa praktične upotrebljivosti, čime bi se potpomoglo prevazilaženje terahercnog jaza po pitanju nepostojanja uređaja koji zrače elektromagnetne talase u opsegu istog. Takođe bi se omogućila pojava široke palete novih tehnologija baziranih na THz zračenju.

U disertaciji će se analizirati razlozi eksperimentalno potvrđenog slabljenja THz zračenja usljed primjene magnetnog polja na $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ monokristale i prezentovaće se efikasan postupak izrade samostalnog IJJ terahercnog oscilatora sa značajno smanjenim efektima samozagrijavanja, čime se očekuje znatno proširenje mogućnosti podešavanja maksimalne vrijednost frekvencije, potencijalno čak do 15 THz. Predstaviće se tipične strujno-naponske karakteristike realizovanih IJJ THz oscilatora, podešavanje frekvencije i snage zračenja.

Takođe se očekuje da će novi dizajn THz oscilatora omogućiti povećanje broja spojeva u IJJ sistemima baziranim na $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ monokristalima, i posljedično pojačanje snage zračenja do nivoa upotrebljivosti.

Novodizajnirani terahercni oscilatori će se implementirati u refleksionim i transmisionim sistemima za snimanje realnih uzoraka i rezultati njihovog rada će biti prezentirani..

2. Definicija zadatka

Polaznim istraživanjima odrađenim krajem 2007. i početkom 2008. godine ustanovljeno da je razvoj uređaja koji emituju elektromagnetsko THz zračenje (oblast između mikrotalasnog i infracrvenog (IR) dijela elektromagnetnog spektra, gde tradicionalne tehnologije detekcije i generisanja signala imaju ograničene performanse) veoma značajan sa aspekta realizacije velikog broja naučnih i tehnoloških aplikacija, odnosno da bi primjena takvih uređaja koji emituju zračenje posebno bi bila od značaja u medicinskoj dijagnostici, biologiji, farmaciji, nadzornim sistemima, komunikacionim sistemima visoke propusne moći, sigurnosnim i odbrambenim sistemima, kao i u oblastima analize fizičkih i hemijskih karakteristika organskih i neorganskih materijala.

U skladu sa činjenicama da u to vrijeme ne postoje THz emiteri koji imaju snagu zračenja upotrebljivu za praktične svrhe, kao i da je 2007. godine u laboratorijama profesora Kadowakia na Univerzitetu u Tsukubi, (Japan), počela da se razvija tehnologija THz emitera primjenom $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ monokristala, obrađenih mlazom Argonovih jona (*Argon-ion-milling*) i fotolitografskim tehnikama kojom je postignuto elektromagnetsko zračenje u THz domenu snage do $5\mu\text{W}$, definisan je cilj disertacije: Kreiranje THz emitera baziranog na $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ monokristalu sa snagom zračenja koja je praktično upotrebljiva.

Za postizanje navedenog cilja na raspolaganju su bile pretpostavka da će uticaj jakog magnetnog polja na THz emitere pojačati zračenje, kao i da se pojačanje zračenja može postići izmjenom tehnologije izrade uzoraka, odnosno promjenom dizajna koja je na prvom mjesu usmjerena ka eliminaciji samozagrijavanja.

Na osnovu svega prethodnog, definisan je zadatak koji treba realizovati u disertaciji, kako slijedi: "analiza uticaja magnetnog polja na karakteristike THz zračenja postojećih sistema Josepson-ovih spojeva realizovanih korišćenjem $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ monokristala, kao i njihovo modifikovanje u cilju postizanja zračenja većih snaga".

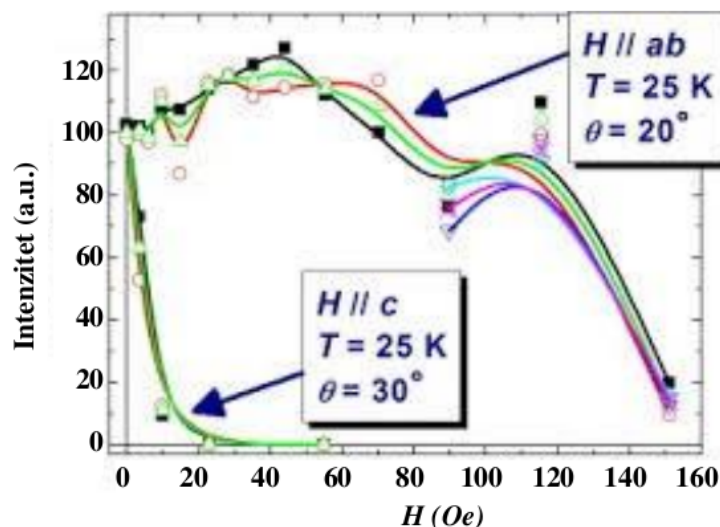
3. Analiza uticaja magnetnog polja na IJJ THz emitere bazirane na $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ monokristalima

U ovom poglavlju su prikazani objavljeni podaci vezani sa istraživanjem uticaja magnetnog polja na THz zračenja IJJ THz oscilatora [99]. No, i pored činjenice da magnetno polje nema značajnog uticaja na THz zračenje postojećih sistema Josepson-ovih spojeva realizovanih korišćenjem $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ monokristala, odnosno da ima dominantno negativan uticaj na snagu zračenja, pristupilo se analizi tog uticaja u domenu koji je bio tehnološki i eksperimentalno moguć, kako slijedi:

3.1 Uticaj magnetnog polja na snagu zračenja IJJ-THz emitera

Za potrebe ispitivanja uticaja magnetnog polja na snagu THz zračenja, korišćen je IJJ THz emiter realizovan sa čistim (neizmijenjenim) $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ monokristalom koji je imao $T_c = 91\text{K}$, dimenzije mese (mesa - španska riječ za "plato"): $400 \times 80 \times 1,1 \mu\text{m}$ i koji je zračio snagom od $\sim 5 \mu\text{W}$.

Eksperiment je sproveden mijenjanjem magnetnog polja u koracima od 0 do 150 Oe, gdje je za svaki korak vršena rotacija emitera u stalnom magnetnom polju [99].



Slika 1. Prikaz zavisnosti snage zračenja THz emitera u zavisnosti od jačine magnetnog polja primijenjenog na emiter. Gornji grafici predstavljaju intezitet zračenja u zavisnosti od jačine magnetnog polja koje se prostire u ab ravni – ravni paralelnoj slojevima monokristala. Donji grafici predstavljaju intezitet zračenja u zavisnosti od jačine magnetnog polja koje se prostire u pravcu c ose – normalno na ravan slojeva monokristala. [99]

Grafici prikazani na slici 1 ukazuju da magnetno polje primijenjeno duž c-ose $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ monokristala, snažno suzbija snagu emitovanog THz zračenja, dok je u slučaju magnetnog polja paralelnog sa ab-ravni monokristala snaga zračenja pokazala slab i širok vrh u području slabog magnetnog polja (0~50 Oe), nakon čega je opadala i nestala oko 150 Oe. Sugerisano je da se dobijeni rezultati mogu objasniti detektovanim pomjeranjem $I-V$ karakterističnih krivih izvan uslova potrebnih za generisanje THz zračenja [99].

Gledano sa aspekta praktične promjene *intrinsic Josephson*-ovih emitera THz zračenja baziranih na $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ monokristalima, navedeni rezultat je ukazao da upotreba magnetnog polja nema značajnog uticaja na pojačanje snage njihovog THz zračenja.

Iz prethodnog se može zaključiti da na pomjeranje karakteristike oblika $I-V$ krivih utiče promjena otpornosti mesa struktura, odnosno promjene u superprovodnom stanju $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$

monokristala koji je superprovodnik klase II. Očigledno je da su te promjene isključivo izazvane primijenjenim magnetnim poljem.

Stoga je dalje istraživanje usmjereno na uticaj magnetnog polja na vorteksno stanje $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ monokristala kao jedan od najvjerovatnijih uzroka promjene otpornosti mesa strukture, odnosno pomjeranja I - V karakterističnih krivih izvan uslova potrebnih za generisanje THz zračenja.

3.2 Uticaj magnetnog polja na vorteksno stanje

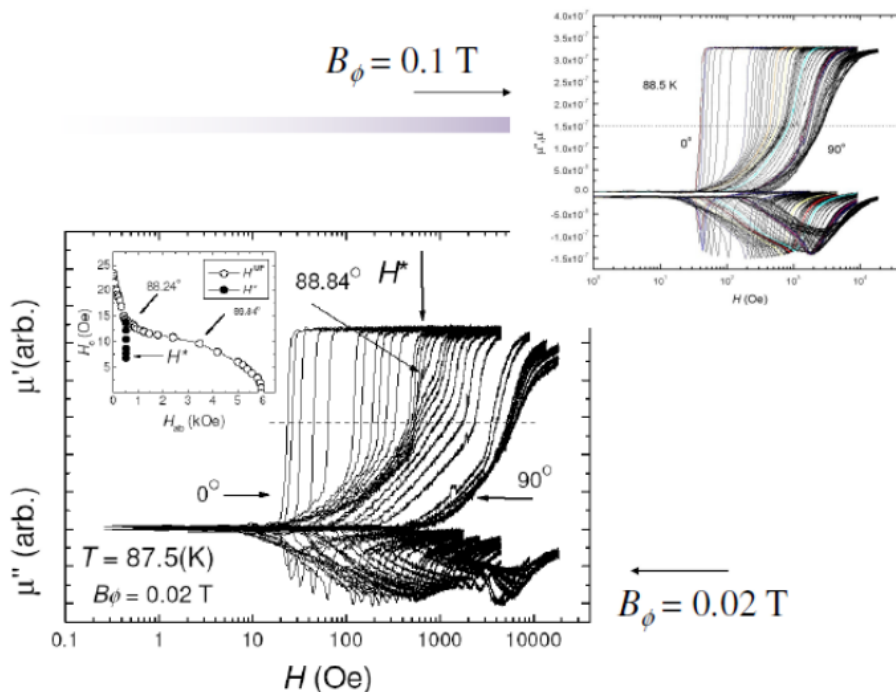
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ monokristala

Kako bi se razjasnila struktura vorteksnog stanja u ozračenim slojevitim $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ monokristalima, istraživana je interakcija Josephsonovih vorteksa i "pancake" vorteksa putem mjerenja lokalne ac-magnetne permeabilnosti, koristeći minijature lokalne kalemове. Istovremeno, vorteksno stanje u netaknutim monokristalima proučavana je mjerenjem otpora u ravni [100].

U naklonjenim (*tilted*) magnetskim poljima, uzorci $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ sadrže dvije vrste vorteksa: komponenta magnetskog polja duž c-ose - H_c , proizvodi (2D) "pancake" vortekse (PV) [101], dok komponenta polja u ravni, H_{ab} , generiše Josephsonove vortekse (JV) između CuO_2 ravni [102, 103]. Interakcije između ukrštenih rešetki PV i JV proučavane su teorijski [103-107], a opažene su i korišćenjem Lorentzove mikroskopije [108, 109], skenirajuće mikroskopije Hall-ovim sondama [110] i magnetno-optičkim snimanjem [111].

Za potrebe eksperimenta, korišćeni su raspoloživi uzorci $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ monokristala u originalnoj formi (neizmijenjenoj) i dva ozračena $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ monokristala koji su imali defekte duž c-ose, uvedene zračenjem teškim jonima ($^{127}\text{I}_{28+}$, 650 MeV). Magnetno polje u eksperimentu je podešeno na $B_\Phi = 0,1\text{T}$ i $0,02\text{T}$.

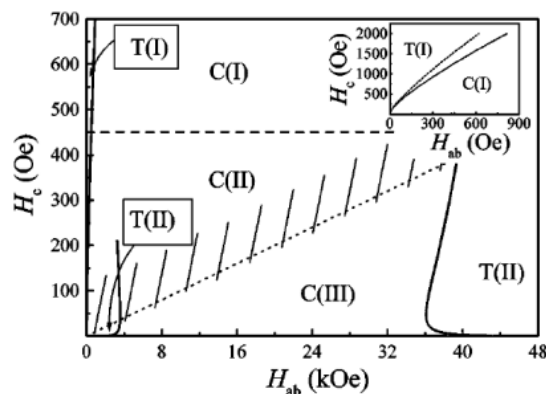
Faze vorteksnog stanja ispitivane su putem lokalnih ac mjerjenja međusobne indukcije koristeći set od dva minijturna kalema. Veličina kalemova bila je 0,35 mm, što je dovoljno manje od veličine uzoraka ($\sim 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$) kako bi se smanjila površinska barijera.



Slika 2. Zavisnost magnetskog polja od realnih i imaginarnih dijelova lokalne ac-magnetne permeabilnosti μ za ozračeni $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$, sa dvije vrijednosti magnetnog fluksa $B_\phi = 0,1 \text{ T}$ (gore) i $B_\phi = 0,02 \text{ T}$ (dole), sa odgovarajućim faznim dijagramom (lijevo).

Jednosmjerno magnetno polje, generisano magnetom sa podijeljenim kalemovima od 70 kOe, rotirano je sa finom ugaonom rezolucijom od $0,01^\circ$. Reprezentativan set podataka (lokalna ac-magnetna permeabilnost u odnosu na jednosmjerno magnetsko polje za različite uglove) prikazan je na Slici 2. Da bi se konstruisala fazna granica, korišćen je napon od $15 \mu\text{V}$ (približno srednja tačka između nule i saturacione vrijednosti realnog dijela permeabilnosti - μ).

Poređenje slobodnih energija ukrštenih i naklonjenih vrtložnih rešetki daje složenu sliku faznih prelaza između ovih struktura vorteksa. Predloženi fazni dijagram prikazan je na slici 3.



Slika 3. Predloženi fazni dijagram vorteksne-solid faze u kosim magnetnim poljima [104].

Sprovedena su mjerenja vorteks-solid faznog dijagrama u netaknutim i ozračenim uzorcima $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ i opažene su fazne granice duboko u čvrstoj fazi vorteksa, koja se mogu pripisati tranziciji strukture vorteksa. Uočeno je da tranzicija postaje manje izražena kod snažnije ozračenih uzoraka. Analiziranje tranzicije je urađeno na osnovu vorteksnog faznog dijagrama koji sadrži i naklonjene i ukrštene strukture vorteksne rešetke, i dobijeni rezultati su konzistentni sa predloženim faznim dijagramom za slojevite superprovodnike. [100].

Sprovedena analiza je ukazala da magnetno polje doprinosi formiranju složenog vorteksnog stanja, što može narušiti uslove potrebne za koherentno THz zračenje *intrinsic Josephson*-ovih spojeva i dovesti do smanjenja ili potpunog gašenja generisanog THz zračenja.

Za dobijanje THz zračenja, kroz mesa strukture se propuštaju struje većeg inteziteta. Time se kod mesa struktura realizovanih na $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ supstratu, dobijaju nehomogeni rasporedi temperature uzrokovani *Joule* samozagrijavanjem u situaciji kada se mesa struktura kvalitetno hladi sa donje strane preko supstrata, dok se ostali dio mese slabo hladi disipacijom elektromagnetnog zračenja (toplotno i THz) u vakumu. Nehomogeni raspored temperature može dovesti do situacije da su *Josephson*-ovi spojevi u nižem-hladnijem dijelu mese u superprovodnom stanju, dok se u višem-toplijem dijelu mese (posebno kod visokih mesa struktura - sa velikim brojem *Josephson*-ovih spojeva) počne gasiti superprovodnost što uzrokuje povećanje otpornosti, odnosno povećanje samozagrijavanja mese, čime se lako dolazi do gašenja THz zračenja.

U cilju eliminisanja prethodno navedenih problema, efikasan metod za značajno smanjenje efekta samozagrijavanja terahercnih oscilatora sa *intrinsic Josephson*-ovim spojevima elaboriran je u nastavku rada.

4. Efikasna izrada IJJ-THz emitera uz značajno smanjene efekte samozagrijavanja

Generisanje i detekcija elektromagnetnih talasa (EMT) u opsegu terahercnih frekvencija postali su fascinantna oblast naučnih istraživanja, obzirom da se za ove frekvencije smatra da su veoma korisne za praktične primene u medicinskoj dijagnostici, razvoju farmaceutskih lijekova, biotehnologiji, ekološkim studijama, tehnikama snimanja, kvantnim računarima, ultra-brzom komunikacijama, itd. [1,2].

U vrijeme započinjanja ovog istraživanja prije više od 16 godina, nijesu postojali emiteri elektromagnetnih talasa koji su mogli zračenjem sa korisnim snagama popuniti takozvanu "terahercni jaz" koja postoji samo u uskom dijelu ovog spektra elektromagnetnih talasa.

Za dobijanje THz zračenja koristile su se infracrvene optičke i mikrotalasne tehnike. Takođe su od interesa i poluprovodničke tehnologije, kojima su realizovani kompaktni terahercni emiteri, poput dioda za rezonantno tunelovanje (RTD) i kvantni kaskadni laseri (QCL). Na primjer, frekvencija zračenja f u opsegu od 0,4 do 1,4 THz dobijala se na sobnoj temperaturi koristeći RTD [3,4], iako izlazna snaga P značajno opada sa povećanjem f , dostigavši oko $1 \mu\text{W}$ na 1,42 THz. Kod QCL-a, nivo snage P u milivatima postizao se na 3,2 THz na temperaturama ispod 200 K. Međutim, f ispod

2 THz nije se mogla se generisati uz dovoljno snage (otprilike nekoliko mikrovata) bez hlađenja ispod 40 K [5–7].

Dobjene snage THz zračenja su bile reda μW , odnosno daleko slabije od snaga sa kojima bi se mogli napraviti korisni EMT emiteri i koje se kreću od nekoliko mW pa na više.

Godine 2007. prvi put su prijavljeni kontinuirani monohromatski koherentni terahercni talasi generisani iz mesa strukture izrađene od visoko-temperaturnog superprovodnog $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ monokristala [8]. Osnovna svojstva dobijenih elektromagnetskih talasa su proučavana kako bi se razumjelo ovo potpuno novo zračenje na terahercnim frekvencijama. Osnovni princip rada zasnovan je na koherentnoj sinhronizaciji zračenja iz velikog broja *intrinsic Josephson*-ovih spojeva (IJJs) koji postoje unutar jednog $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ monokristala. Poznato je da $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ sa $T_c \sim 90$ K sadrži naizmjenične duple slojeve supraprovodnog CuO_2 i izolacionog Bi_2O_2 unutar jedne ćelije, koji su poređani duž kristalografske c-ose sa efektivnim ponovljenim rastojanjem od otprilike 1,533nm, što odgovara jednom IJJ i polovini c-ose jedinične ćelije.

Stoga se *intrinsic Josephson*-ovi spojevi formiraju sa kristalografskom preciznošću u ovom jedinjenju [9–11]. Primjera radi, u $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ monokristalu debljine $1,5\mu\text{m}$ postoji približno 1000 identičnih IJJs.

Kada se $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ mesa struktura pobuđuje strujom I i naponom V , koji se dovode na nju, oscilujuća struja se generiše preko svakog IJJ-a, pri čemu svaki emituje elektromagnetno zračenje. Prema AC *Josephson*-ovom odnosu [12], ova EMT ima definisanu frekvenciju f datu kao $f = f_J = (2e/h) \varphi$, gde je $\varphi = V/N$ napon primenjen na svaki pojedinačni IJJ od njih N , dok su e i h količina elementarnog naelektrisanja i Plankova konstanta, respektivno, pod uslovom da je $hf < |2\Delta|$ za izotropni supraprovodnički jaz $|2\Delta|$ na svakoj strani IJJ [12].

Važno je napomenuti da se elektromagnetna snaga koja je jednaka intezitetu Pointingovog vektora (vektorski proizvod električnog i magnetnog vektora) značajno pojačava zbog koherentne sinhronizacije emisije iz N (otprilike 10^3) IJJ slojeva u mesa strukturi, te se očekuje da će izlazna snaga biti proporcionalna N^2 [8,13,14], rezultujući snagom otprilike 10^6 puta većom od snage pojedinačnog spoja [15–17].

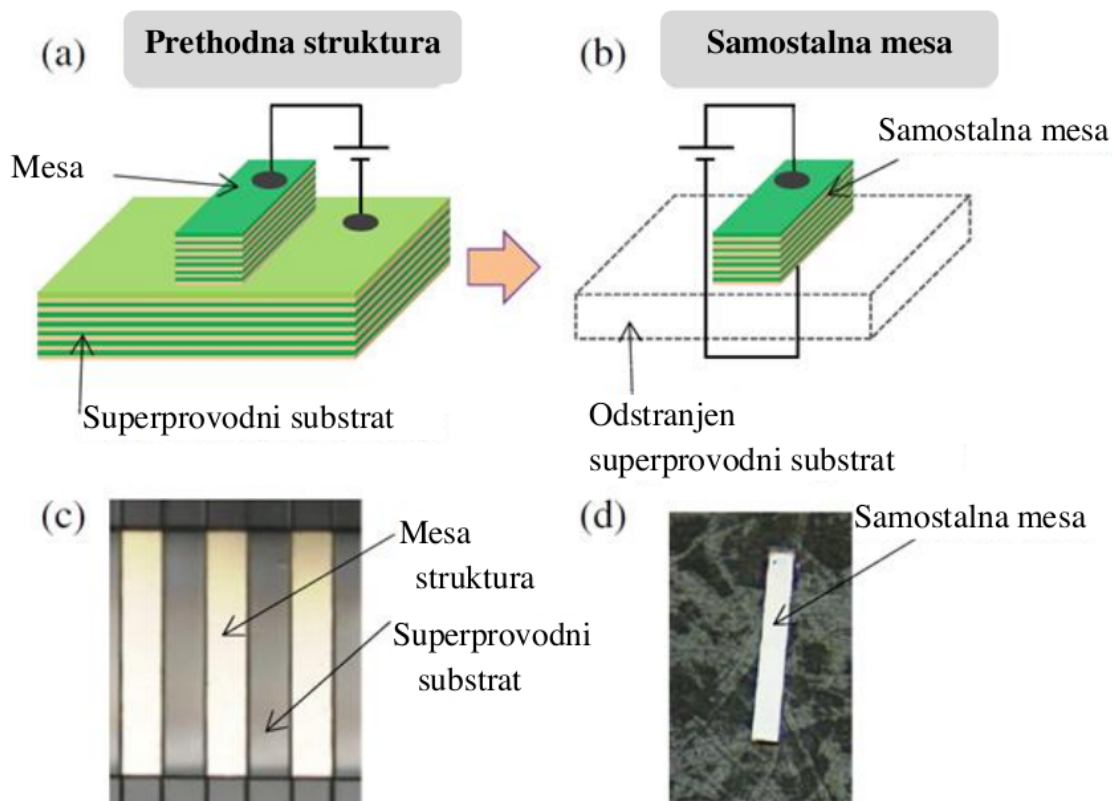
Ako svaki supraprovodni sloj u mesi $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ ima izotropni jaz veličine 60 meV, AC *Josephson*-onov efekat potencijalno omogućava da se frekvencija f prilagođava do 15 THz. Međutim, primjećeno je da su i funkcije anizotropnog jaza zbog konkurentskih talasa gustine naelektrisanja, kao i dva supraprovodna jaza, uočeni u dihalogenidima prelaznih metala [18]. Na primjer, skenirajuća tunel mikroskopija 2H-NbSe_2 pokazala je nisko-temperaturni jaz koji je bio oko 40% od maksimalne vrednosti [19], dok je *Josephson*-ovo tunelovanje sa Pb vrhovima dalo vrednosti za proizvod IcRn (kritične struje pomnožene sa normalnim otporom po c -osi) koje su bile znatno niže od Ambegaokar-Baratofovog rezultata [20,21], čak i kada je Ic procenjena pomoću ovog minimalnog (realnog) jaza, čije je ponašanje bilo slično onome viđenom kod kuprata [22].

Kako $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ takođe pokazuje redosled talasa gustine naelektrisanja, ukoliko bi imao anizotropnu supraprovodnu funkciju jaza veličine $|2\Delta n(k)|$ za Kuperove parove sa unutar-slojnim vektorom talasa k unutar n -tog supraprovodnog sloja računajući od vrha mesa, da bi došlo do monohromatske emisije iz svakog IJJ-a i za njihovu ukupnu koherentnu sinhronizaciju faza, ova funkcija jaza mora imati minimalnu konstantnu vrijednost $|2\Delta_{\min}| > 0$ u osnovnim slojevima sa $l \ll n \ll N$, a jaka emisija će biti ograničena uslovom $hf < |2\Delta_{\min}|$.

Opažanja emisija do 1.6 THz [23] i, a zatim do 2.4 THz [24], sa snažnim emisijama na 1.0 THz i relativno jakim emisijama na 1.6 THz, sugerišu da je minimalni osnovni jaz u kvazipartikularnom spektru $|2\Delta_{\min}| \sim 4.1$ do 6.5 meV ili veći, čije su vrednosti približno u skladu sa ranijim eksperimentima na *over-doped* $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ uzorcima [25,26]. Međutim, pošto ovakvi eksperimenti nisu izvođeni na *under-doped* $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ uzorcima, nepoznato je da li će ti rezultati biti relevantni za jaz u uzorcima koji emituju terahercne talase, jer su svi oni *under-doped*.

Pored toga, prema studijama *Josephson*-ovih spojeva u konvencionalnim s -talasnim supraprovodnicima (Al, Nb) u visokofrekventnim mikserima i detektorima zračenja, ti spojevi podržavaju elektromagnetne oscilacije na frekvencijama znatno iznad frekvencije jaza $2\Delta/\hbar = 2eV/\hbar$, iako uz cijenu povećanja gubitaka [27,28]. Stoga, dalja proučavanja frekvencije zračenja terahercnih oscilatora na bazi $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ IJJ mogla bi pružiti precizniji način za procjenu vrijednosti minimalnog osnovnog jaza.

Kako bi se bolje razumjele karakteristične osobine terahercnih oscilatora sa IJJ, aktivno su sprovedene eksperimentalne [8,23,24,29–64] i teorijske [65–89] studije. Predstavljen je i razvoj ranijih oscilatora [90].



Slika 4. (a), (b) Prikazi konvencionalne i samostalne pravougaone mesa strukture. (c), (d) Odgovarajuće optičke fotografije tri konvencionalne mesa strukture i jedne samostalne mesa strukture.

Snaga zračenja iz pojedinačnih IJJ terahercnih oscilatora postepeno je povećana do oko $30\mu\text{W}$ zahvaljujući unapređenju procesa proizvodnje i optimizaciji uslova zračenja [49–51,61]. Iako takvi nivoi snage nisu bili dostižni u prvobitnim mesa strukturama, visoka snaga zračenja se dosljedno dobija iz samostalnih mesa struktura. Skice konvencionalnih i samostalnih mesa struktura prikazane su na slikama 4(a) i 4(b), dok su njihove fotografije prikazane na slikama 4(c) i 4(d). Visoke performanse samostalnih mesa struktura su bile teoretski predložene prije njihove izrade [81,82].

Bitno je napomenuti da je postignuta i izlazna snaga na nivou od 610 μW sinhronizacijom tri konvencionalne pravougaone mesa strukture [48]. Ovaj rezultat upućuje na dalja istraživanja u razvoju sinhronizacije samostalnih mesa struktura kako bi se postigla ukupna izlazna snaga veća od 1mW.

Uočava se da su mesa strukture kojima se generiše zračenje, uglavnom pravougaonih oblika. Kod stvarnih mesa struktura, postoji još jedan veoma važan uslov za snažno zračenje, pored AC *Josephson*-ovog efekta i zahtjeva da je hf manji od minimalne vrednosti masivnog supraprovodnog jaza. Taj uslov je rezonantno stanje šupljine (*cavity*), $f = f_c(m, p)$ za poprečno-magnetni (TM) mod, indeksiran cijelim brojevima (m, p) za specifičnu geometriju tanke mese koja se ponaša kao elektromagnetna šupljina. U stvarnom radu sa terahercnim zračenjem, veoma je važno da oba uslova ($f = f_J$ i $f = f_c(m, p)$) budu istovremeno ispunjena kako bi se postiglo snažno zračenje.

Međutim, usklađivanje ovih uslova je teško optimizovati zbog brojnih efekata koji pogoršavaju sinhronizovanu operaciju velikog broja IJJ-ova (*intrinsic Josephson*-ovih spojeva). Najznačajniji negativni efekat je *Joule*-ovo samozagrijavanje, koje izaziva primenjena struja.

Nehomogena raspodela temperature $T(r)$ mesa strukture eksperimentalno je potvrđena tehnikama kao što su mikroskopija skenirajućim laserom na niskoj temperaturi, fluorescentna linija Eu^{3+} u europijum helatu, i fotoluminiscencija uz upotrebu SiC mikropরাহা. Prethodno je predviđeno i proučavano pomoću numeričkih simulacija, a svi ovi rezultati jasno ukazuju da *Joule* samozagrijavanje snažno utiče na karakteristike zračenja i uslove rada.

Nakon što su primijećeni i proučeni ovi neželjeni efekti, razvijena je metoda koja iz značajno umanjuje. Ključna ideja je da je korišćenje samostalne mesa strukture, kao što je prikazana na slici 4(c), veoma pogodna za rješavanje problema samozagrijavanja, jer je loše termalno provodljiva $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ superprovodna podloga ispod nje kod konvencionalnih mesa uklonjena cijepanjem (eng. *cleavage*) monokristala. Umesto na podlogu, samostalna $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ mesa je direktno povezana i sa gornje i sa donje strane sa daleko boljim termalnim provodnicima, kao što su safir, zlato ili bakar. Primjenom ovakvih i sličnih samostalnih mesa struktura omogućene su izlazne snage veće od 30 μW i frekvencije zračenja koje su podesive od približno 0,3 do 1,6 THz, kao i od 0,5 do 2,4 THz. Zbog toga je bilo važno razumjeti karakteristike zračenja ovih samostalnih mesa

struktura kako bi se dodatno unaprijedile njihove osobine za praktične primjene snažnih IJJ terahercnih emitera.

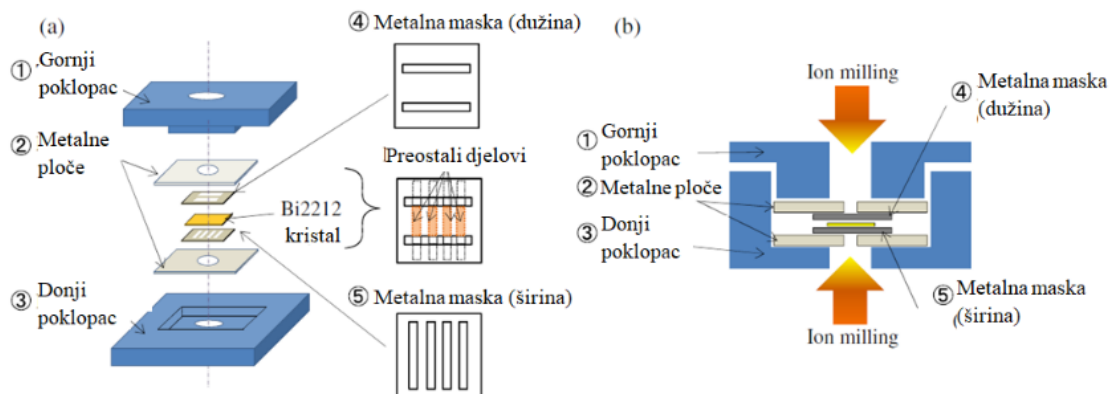
Za potrebe izrade i montaže navedenih samostalnih mesa struktura razvijena je jednostavna procedura. U nastavku slijedi detaljniji opis strukture uređaja i njegovih karakteristika. Prvo će se opisati tehnika za izradu samostalnih mesa struktura. Zatim će biti opisana jednostavna i pouzdana procedura za montažu uređaja, koja omogućava efikasno uklanjanje toplote i električno povezivanje. Na kraju, predstavljene su fizičke karakteristike nekoliko uzoraka unutar sastavljenih uređaja.

4.1. Priprema uzoraka

Priprema IJJ THz emitera se sastoji iz faze izrade samostalnih mesa struktura i faze povezivanja, odnosno ožičavanja i pakovanja u robustno kućište namijenjeno za dalju eksploataciju.

4.1.1. Procesi izrade samostalnih mesa struktura

Visokokvalitetni monokristali $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ kreiraju se metodom plivajuće zone sa putujućim rastvaračem korišćenjem modifikovane infracrvene peći. Dio monokristala $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ se zatim peče desetak sati kako bi se postigao odgovarajući nivo dopiranja. Sa obje površine monokristala se razljepljuju površinski slojevi (eng: *cleaving*) kako bi se dobile čiste površine, sa debljinom od nekoliko mikrometara. Ove svježije površine zatim se oblažu filmovima od srebra i zlata, debljine od 50 do 100 nm, putem naparavanja.



Slika 5. (a) Skica prije montaže komponenti uređaja za glodanje (eng: *milling-rig*) korišćenih u izradi samostalnih $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ mesa struktura. (b) Poprečni prikaz sastavljenih komponenti uređaja za glodanje prije Ar ionskog glodanja odozgo i odozdo.

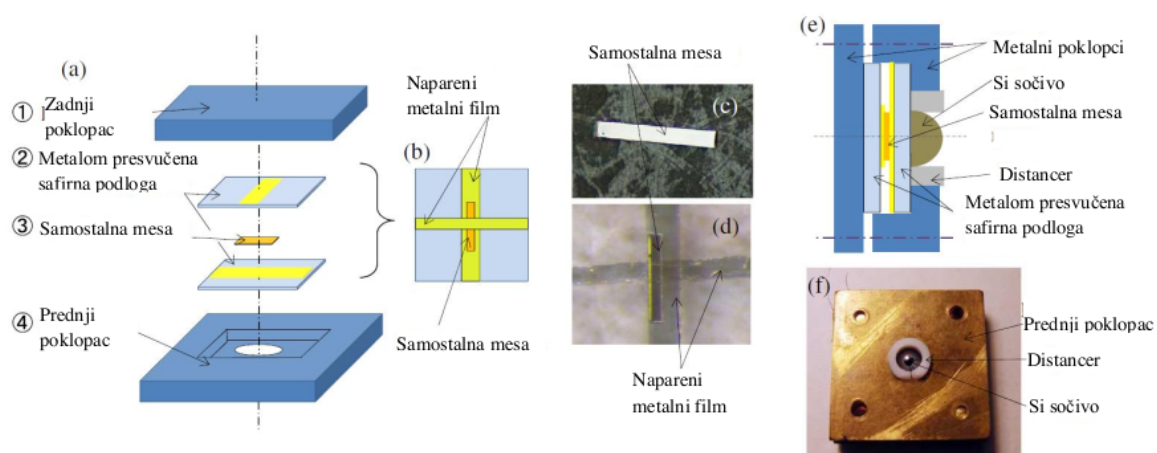
Slika 5(a) prikazuje skicu prije montaže uređaja za *Ar Ion milling*, korišćenog za izradu samostalnih mesa struktura. Monokristal $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ sa dvoslojnim metalnim premazom postavlja se između dvije metalne maske korišćenjem metalnih ploča i poklopaca. Svaka metalna ploča i poklopac imaju otvor dovoljno velik da omogući *Ar Ion milling* monokristala $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ u oblik mesa strukture.

Za *Ion milling* se koriste dvije različite metalne maske. Gornja maska definiše dužinu mesa struktura, dok donja maska određuje širinu. Nakon što su ove dimenzije definisane putem dvostrukog procesa *Ion milling*-a, preostale samostalne mesa strukture pažljivo se uklanjaju s metalnih maski.

Broj mesa struktura koje se mogu istovremeno izraditi zavisi samo od broja prereza u donjoj metalnoj maski, što ovu metodu čini pogodnom za masovnu proizvodnju. Raposloživom opremom se uspješno proizvodi osam samostalnih mesa struktura istovremeno.

4.1.2. Povezivanje i fiksiranje samostalnih mesa struktura

Nakon izrade samostalne mesa strukture, potrebno je postaviti električne kontakte na njene gornje i donje površine kako bi se omogućila primjena jednosmjernog *bias* napajanja V (napon koji dovodi uzorak na poziciju I - V krive u kojoj emituje THz zračenje). U prethodnim studijama, električni kontakt se na jednoj površini uspostavljao korišćenjem steznog spoja ili provodljive paste, poput srebrne paste, kako bi se površina spojila na zlatni sloj deponovan na safirnu podlogu. Električni kontakt na drugoj površini uspostavljao se pomoću zlatne žice (prečnika $10\ \mu\text{m}$) i srebrne paste. Kvalitet ovih električnih kontakata zavisio je od vještine istraživača.



Slika 6. (a) Skica montaže komponenti uređaja za povezivanje korišćenih za mehaničko povezivanje električnih kontakata na samostalnu mesa strukturu. Zlatne trake su deponovane na površinama safirnih podloga koje su u kontaktu sa $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ mesom. (b) Skica samostalne mesa strukture postavljene između dve safirne podloge djelimično obložene metalom. (c),(d) Odgovarajuće optičke fotografije samostalne mesa strukture i njene sendvič-strukture sa dvije safirne podloge sa metalnim tankim kontakt trakama. (e),(f) Bočna skica sastavljenog uređaja za povezivanje i odgovarajuća gornja optička fotografija.

Kako bi se prevazišla ova ograničenja, razvili smo jednostavan mehanički postupak za formiranje električnih kontakata. Slika 6(a) prikazuje skicu montaže uređaja kojom se uspostavlja kontakt sa mesom, odnosno kojom se ostvaruje mehaničko pričvršćivanje električnih kontakata na površine samostalne mesa strukture. Koriste se dvije safirne podloge dimenzija $7.0 \times 7.0 \times 0.5 \text{ mm}^3$, preko kojih se deponuju tanke zlatne trake, a zatim se ove podloge postavljaju licem u lice sa metalnim trakama kako bi se samostalna mesa struktura "sendvič" metodom postavila između njih, ostvarujući mehaničke i električne kontakte.

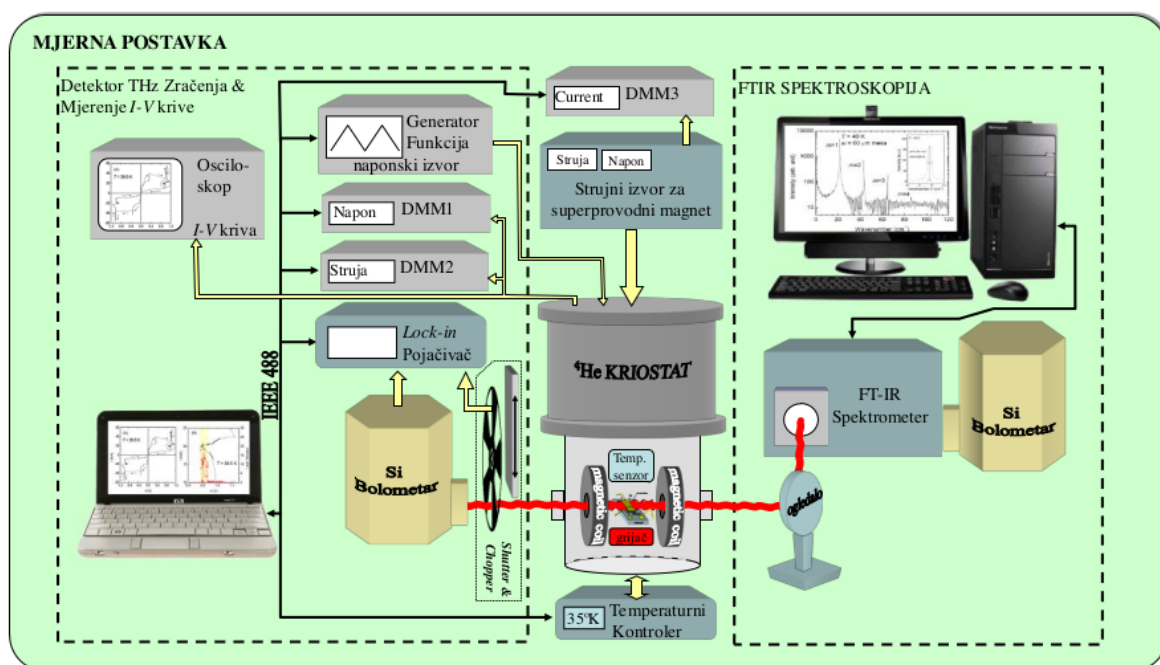
Fotografije samostalne mesa strukture prije i poslije ovog "sendvič" spoja prikazane su na slikama 6(c) i 6(d). Iako je teoretski moguće ostvariti *high-Q* rezonance sa ovom strukturom, svi efekti nisu još detaljno istraženi.

Kako bi se zategli zlatno-zlatni kontakti iznad i ispod svake samostalne mesa strukture, četiri šrafa se labavo postavljaju kako bi se mehanički spojile zadnja i prednja maska uređaja za kontakt. Prije nego što se šrafovi zategnu, zlatne žice se povezuju na tanke metalne trake deponovane na safirnim podlogama, kako bi se omogućili električni kontakti sa spoljnim izvorom napona. Na kraju, hemisferična Si sočiva prečnika 4 mm postavljaju se na vrh prednje safirne podloge, i pozicioniraju se pomoću distancera. Prilikom finalnog pritezanja četiri šarafa, vrši se monitoring kontaktne otpornost uzorka u cilju pravljenja kvalitetnih kontakata.

Slika 6(f) je fotografija prednje strane sklopljenog kontaktnog uređaja sa četiri šrafa u rupama blizu uglova. Uloga Si sočiva je da fokusira terahercne talase generisane iz samostalne mesa strukture. Si sočivo poboljšava odziv na detektoru za najmanje nekoliko puta i fokusira snop, što može biti korisno za primene u terahercnom snimanju.

4.2. Mjerna postavka

Na slici 7 dat je blok dijagram mjerne postavke realizovane za potrebe ovog rada.



Slika 7. Blok dijagram mjerne postavke

Za mjerenje svojstava zračenja samostalnih mesa struktura korišćen je ^4He kriostat (CF1104, Oxford Instruments) za hlađenje uzoraka, Si bolometar (Infrared Laboratories) i brzi InSb *hot-electron* bolometar (QFI/2BI, QMC Instruments Ltd.) za detekciju terahercnih talasa iz samostalnih mesa struktura. Apsolutna snaga zračenja mjerena je pomoću submilimetarskog mjerača snage (Model PM4, Virginia Diodes, Inc.). Za određivanje frekvencija zračenja koristi se Fourierov transformacioni infracrveni (FTIR) spektrometar (FARIS-1, JASCO). FeRh termometar je postavljen na držač uzorka unutar kriostata kako bi mjerio temperaturu kupke T_b (*bath temperature*)

na koju se hladi uzorak. Za mjerenja strujno-naponskih karakteristika (I - V karakteristike), koristi se izvor napona i standardni otpornik $R_s = 10 \, \Omega$, koji omogućavaju primjenu jednosmjernog napona V i mjerenje jednosmjerne struje I primijenjene na mesa strukturu.

4.3. Rezultati

U ovom podpoglavlju prikazane su karakteristike realizovanih uzoraka, strujno naponske karakteristike i karakteristike frekvencija zračenja, izvršena je procjena snage zračenja, date su karakteristije zračenja na I - V strukturi sa višestrukim grananjem, a takođe je prikazan i oblik zračenja mese.

4.3.1. Karakteristike uzoraka

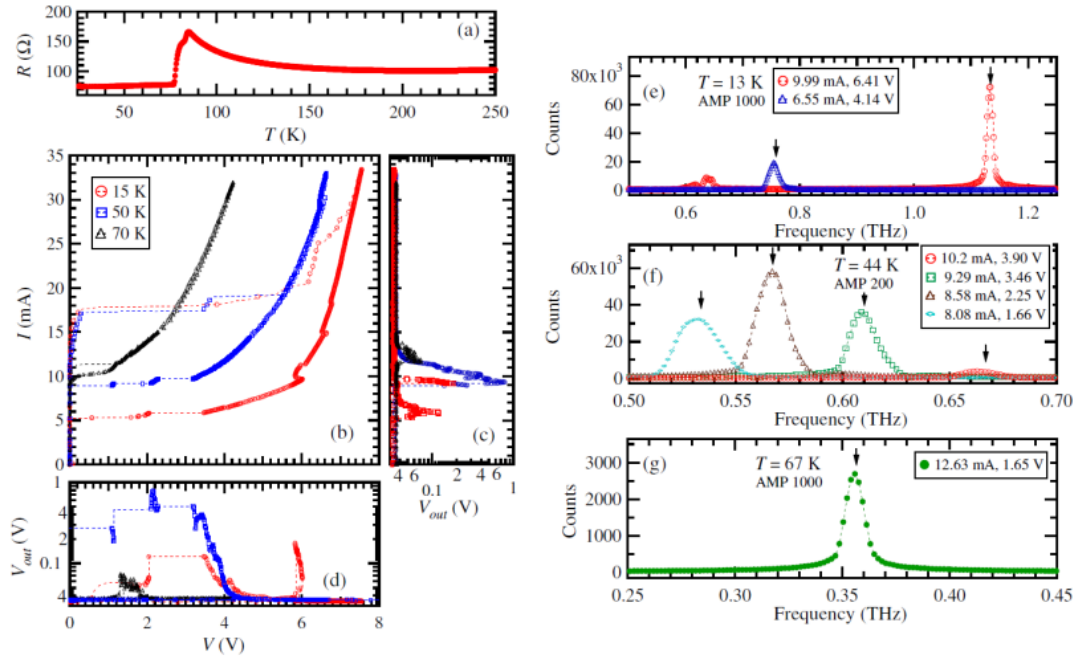
Metalne maske opisane u sekciji II A, skicirane na slici 5, korišćene su za izradu nekoliko samostalnih mesa struktura dimenzija $350 \, \mu\text{m}$ dužine, $58\text{-}66 \, \mu\text{m}$ širine (od vrha do dna u trapezoidnom presjeku), i $4.7 \, \mu\text{m}$ debljine, uključujući kontaktne jastučice sa Ag i Au metalnim slojevima. Debljina svake mesa strukture procijenjena je pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa. Električni kontakti su mehanički primijenjeni, kao što je opisano u odjeljku 4.1.2. i prikazano na slici 6.

Slika 6(f) prikazuje fotografiju sklopljenog uređaja sa Si sočivom za fokusiranje. Nakon sklapanja, dimenzije cijelog uređaja su oko $20 \times 20 \times 5 \, \text{mm}^3$. Ovaj potpuno sklopljeni terahercni oscilator je dovoljno kompaktan i jednostavan za rukovanje u mnogim praktičnim primjenama.

Za mjerenja su korišćena četiri mesa uređaja sa gore opisanim strukturama koji dosljedno tokom niza ponovljenih eksperimenata emituju koherentno terahercno zračenje. U nastavku su opisane karakteristike zračenja i primjene ovih novih uređaja, s rezultatima dobijenim iz uzorka br. 1,

naj snažnijeg emitera od četiri razmatrana uređaja. Uzorak br. 2 je izrađen u istoj seriji kao i uzorak br. 1, a njegova svojstva poređena su sa svojstvima uzorka br. 1.

4.3.2. Strujno-naponske i karakteristike frekvencije zračenja



Slika 8. (a) $R_c(T_b)$ uzorka br. 1. (b) Tipične I - V karakteristike uzorka br. 1 dobijene na $T_b = 15, 50$ i 70 K. (c), (d) Semilogaritamski grafici izlaznih napona V_{out} bolometra *hot-electron* InSb u odnosu na struju I i napon V primenjen na uzorak br. 1, respektivno. (e), (f), (g) Spektri zračenja na *bias* tačkama prikazanim u legendama, posmatrani na $T_b = 13, 44$ i 67 K, respektivno, sa pojačanjima pojačala (AMP) od 1000, 200 i 1000, respektivno.

Slika 8(a) prikazuje zavisnost otpora $R_c(T_b)$ duž c -ose uzorka br. 1 u odnosu na temperaturu kupke T_b . Temperatura superprovodnog prelaza T_c iznosi oko 76 K, a otpor kontakta u ovom uređaju iznosi oko 75Ω . Ovaj otpor se može smanjiti dodatnim zatezanjem četiri šrafa na uređaju, ali prekomerno zatezanje može oštetiti mesa strukturu. Otpor kontakta uzorka br. 1 je eliminisan iz podataka kako bi se prikazali pravi podaci.

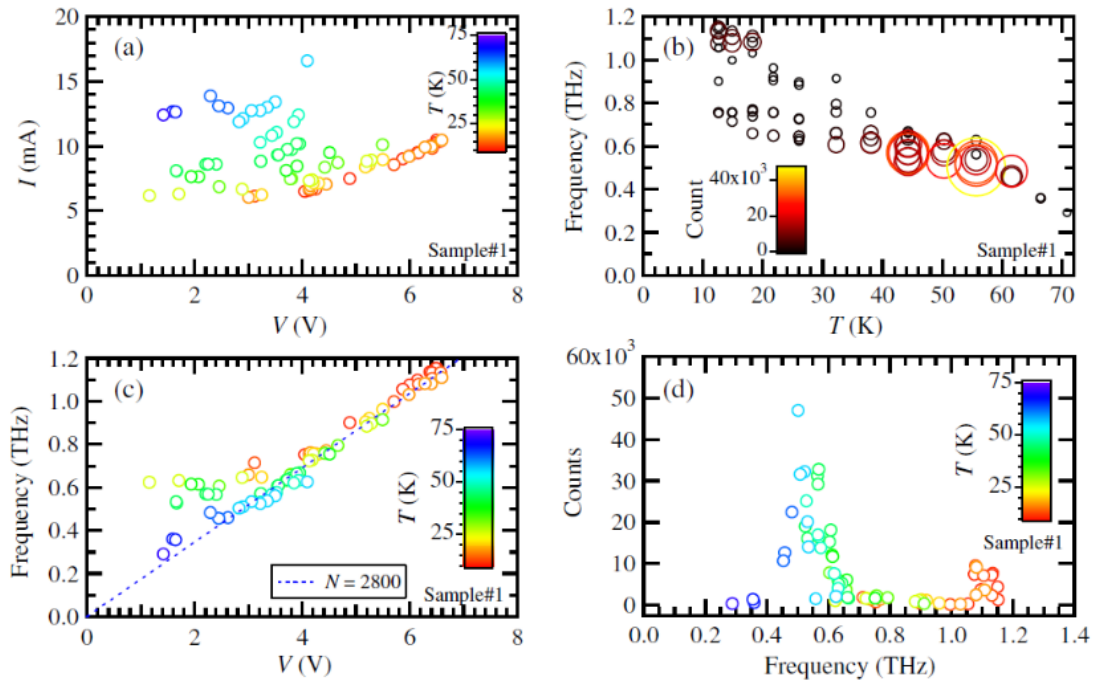
Slika 8(b) prikazuje tipičnu zavisnost spoljne I - V karakteristike samostalnog mesa uzorka br. 1 pri temperaturama kupke od 15, 50 i 70 K. Postignut je $bias$ V do 7V na 15 K, iako je mesa 3-4 puta deblja nego u prethodnim istraživanjima. Ovaj rezultat se pripisuje efikasnijem odstranjivanju toplote putem safirnih ploča koje okružuju mesa strukturu. Ova efikasna disipacija toplote doprinosi činjenici da I - V karakteristike ne pokazuju jasnu negativnu diferencijalnu otpornost, što je karakteristično za samozagrijavanje u prethodnim mesa strukturama sa $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ podlogom.

Snaga zračenja detektovana putem InSb HE bolometra pri različitim T_b prikazana je na slikama 8(c) i 8(d). Na logaritamskoj skali, zračenje se pojavljuje na $bias$ naponima od oko 4 i 6 V na $T_b=15$ K. Zapaženo je da je snaga zračenja pri $T_b=50$ K i $bias$ naponu od 2,2V za red veličine veća nego pri 15K i $bias$ naponu od 3,5 V. Zračenje iz uzorka br. 1 je i dalje snažno na 1,3V čak i pri temperaturi $T_b=70$ K, nekoliko Kelvina ispod $T_c=76$ K.

Slika 8(e) prikazuje spektar zračenja dobijen pri $T_b=13$ K za dvije različite $bias$ tačke. Na nižem $bias$ naponu od oko 4,1V primjećen je spektar sa vršnom frekvencijom od 0,75 THz. Na višem $bias$ naponu od oko 6,4V, detektovan je oštar vrh na 1,14 THz, uz manji vrh na 0,63 THz.

Dalje, 7(f) i 7(g) prikazuju primjere neobičnih karakteristika emisije pri različitim temperaturama. Neki spektri, kao na slici 8(e), pokazuju dodatne vrhove ili široke linije, što je takođe primećeno u područjima niskih $bias$ struja.

Širina ovih linija može zavisiti i od frekvencije i temperature, dok pritisak između safirnih ploča može uzrokovati nehomogeni stres, što može uticati na pojavu malih nepravilnosti u I - V karakteristikama.



Slika 9. Karakteristike emisije posmatrane na uzorku br. 1. (a) Odnos između *bias* struje I i napona V za sve posmatrane podatke o elektromagnetnom zračenju na različitim temperaturama T_b prikazane u šifri boja. (b) Odnos između posmatranih frekvencija zračenja i T_b . Posmatrani intenziteti terahercnog zračenja, mjereno FTIR spektrometrom, prikazani su i bojama i veličinama krugova. (c) Odnos između posmatranih frekvencija zračenja i primijenjenih napona V i T_b prikazanih u šifri boja. Isprekidana linija prikazuje ac Josephsonovu relaciju sa $N = 2800$. (d) Odnos između intenziteta spektra zračenja i njegovih frekvencija na temperaturama T_b prikazanim u šifri boja.

Sljedeći korak bio je mjerenje zavisnosti frekvencija zračenja i njihovih intenziteta od temperature kupke T_b na nekoliko *bias* tačaka. Ovi podaci su prikazani na slici 9 i uglavnom su dobijeni iz najudaljenije grane I - V karakteristika i uključuju eksperimentalne tačke u *retrapping* oblasti I - V karakteristika (oblast niskog I *bias*-a). Detalji o frekvencijama zračenja dobijenim iz I - V strukture sa višestrukim grananjem su razmotreni u odjeljku 4.3.4.

Na slici 9(a) prikazan je graf zavisnosti *bias* struje I u odnosu na napon V za različite vrijednosti T_b , označene bojama. Pošto se histerezis I - V karakteristika smanjuje sa porastom T_b , *bias* tačke pri

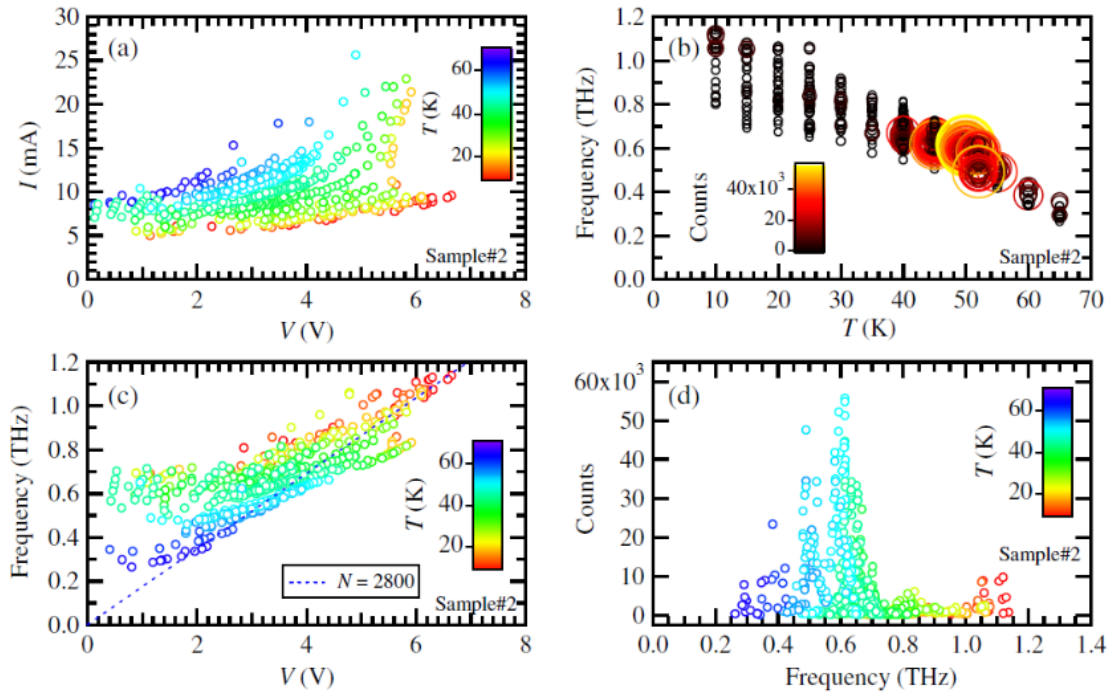
kojima je opaženo terahercno zračenje, postepeno se pomjeraju sa većih napona V i nižih struja I na niže napone V i veće struje I kako T_b raste.

Na slici 9(b), frekvencije zračenja f dobijene sa različitih *bias* tačaka prikazane na slici 9(a) iscrtane su kao funkcija T_b . Opaža se jaka zavisnost frekvencije emisije od T_b : više frekvencije su zabilježene pri nižim vrijednostima T_b , dok su niže frekvencije zabilježene pri višim vrijednostima T_b . Maksimalna zabilježena frekvencija je 1,14THz na $T_b=13K$, dok je najniža zabilježena frekvencija 0,30THz na $T_b=71K$. Slična temperaturno zavisna ponašanja ranije su prijavili Wang i saradnici, kao i Benseman i saradnici. Podaci prikazanih na slici 9(b) se dobro slažu sa njihovim podacima.

Navedena zavisnost frekvencije terahercnog zračenja f od T_b pripisuje se zavisnosti I - V karakteristika od T_b , prikazanoj na slici 8(b). Promjene u *bias* naponu V sa promjenama T_b u skladu su sa ac *Josephson*-ovim odnosom, $f=f_J=(2e/h)V/N$. Ovo ponašanje se jasno vidi na slici 9(c), gdje je frekvencija f iscrtana u odnosu na napon V , pri čemu većina podataka prati zakonitost $f \propto V$, što je u skladu sa ac *Josephson*-ovim odnosom za određenu vrijednost N .

Međutim, postoje podaci koji odstupaju od linearne isprekidane linije, posebno ispod $f=0,75$ THz. Ove tačke dolaze iz unutrašnjih grana I - V karakteristika, a ne iz najudaljenijih grana I - V karakteristika. Iako na prvi pogled djeluje da krše ac *Josephson*-ov odnos, u stvarnosti to nije slučaj jer je u unutrašnjim granama broj aktivnih *intrinsic Josephson*-ovih spojeva N_{act} smanjen u odnosu na ukupan broj N , pa je i *bias* napon proporcionalno smanjen.

Na slici 9(d), intenzitet zračenja dobijen FTIR spektrometrom prikazan je kao funkcija frekvencije emisije f kod različitih temperatura T_b . Spektri emisije pokazuju dva izražena vrha na 0,5 i 1,1THz, koji odgovaraju poprečnim magnetnim rezonancama TM(1,0) i TM(2,0) kaviteta mesa strukture sa širinom u opsegu od 58 do 66 μm (0,62–0,54THz). Ova podudarnost sugerise da ti specifični pravougaoni modovi kaviteta povećavaju snagu emisije. Slično ponašanje se primjećuje i u drugim mjerenjima [51]. Većina gore opisanih karakteristika zračenja dobro je reprodukovana na uzorku br. 2, kao što je prikazano na slici 10.

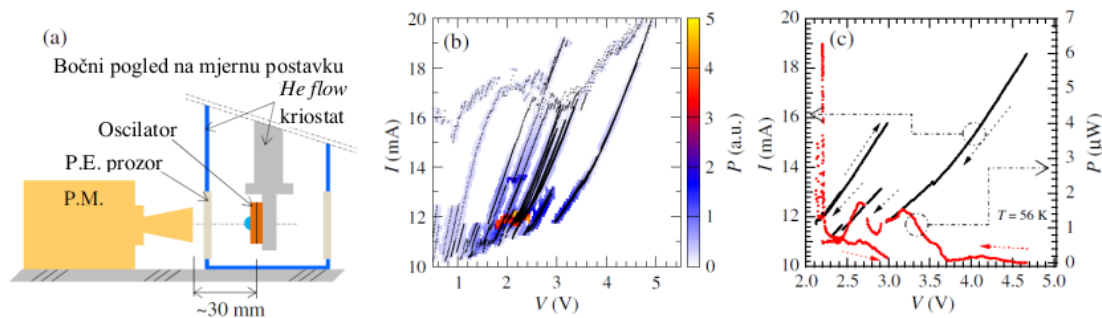


Slika 10. (a)–(d) Iste karakteristike emisije uzorka br. 2 kao one prikazane u slici 9 za uzorak br. 1.

Međutim, podaci f u odnosu na V dobijeni od uzorka br. 2, prikazani na slici 10(c), pokazuju širi opseg napona V (ili frekvencije f) sa izraženijim odstupanjima od linearnog ac *Josephson*-ovog odnosa nego podaci prikazani na slici 9(c) za uzorak br. 1. Ovi podaci o zračenju uzorka br. 2 dobijeni su na tačkama sa višim bias strujama I u I - V karakteristikama. Za tačke podataka prikupljene blizu $T_b=20$ K na slici 10(c), primjećene su različite vrijednosti frekvencija f na sličnim bias naponima V . Vrijednosti frekvencija f zabilježene pri nižim bias strujama I bile su veće od onih zabilježenih pri višim bias strujama I . Ovaj rezultat bi mogao biti uzrokovan povećanjem efektivne temperature T mesa strukture zbog efekata samozagrijavanja, jer smanjenje efektivnog napona V usljed samozagrijavanja izaziva smanjenje centralne frekvencije zračenja f . Slično ponašanje je takođe razmotreno u radu *Benseman*-a i saradnika [64].

4.3.3. Procjena snage zračenja

Kao što je prikazano na slikama 9(b) i 9(d), najsnažnije zračenje je opaženo iz uzorka br. 1 pri temperaturi kupke od oko $T_b=55\text{K}$. Snaga zračenja je procijenjena pomoću mjerača snage na $T_b=56\text{K}$. Šematski prikaz bočnog pogleda eksperimentalne postavke za mjerenje snage prikazan je na slici 11(a). Mjerač snage je postavljen na udaljenosti od približno 30 mm od emitera i nalazi se blizu polietilenskog optičkog prozora *He flow* kriostatata.



Slika 11. (a) Šematski bočni prikaz postavke za mjerenje snage zračenja. (b) I - V karakteristika sa višestrukim grananjem zabilježena na $T_b = 56\text{K}$. Intenzitet zračenja je označen bojama na I - V karakteristikama. (c) Neki detalji I - V karakteristika prikazanih u (b) (crno, lijeva osa) i odgovarajuća snaga zračenja (crveno, desna osa) detektovana mjeračem snage (P.M.).

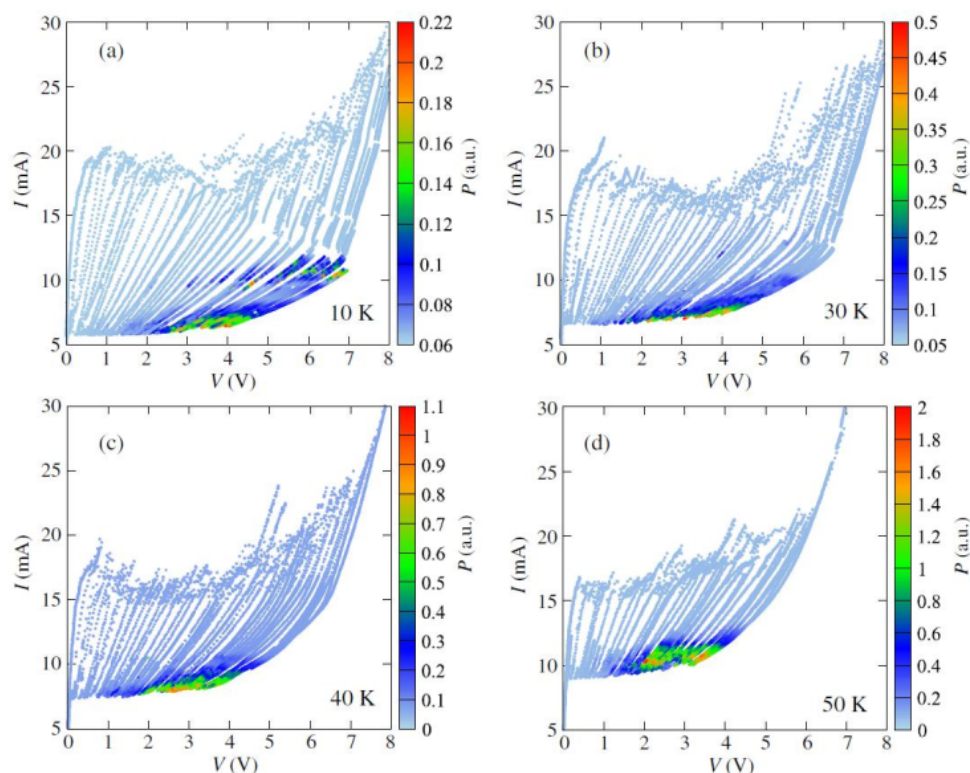
Crni simboli na slici 11(b) prikazuju I - V karakteristiku sa višestrukim grananjem za uzorak br. 1 dobijenu pri $T_b=56\text{K}$. Intenziteti zračenja na I - V karakteristikama su kodirani bojama prema skali na desnoj ordinatnoj osi. Najsnažnije zračenje je zabilježeno pri *bias* naponu od oko 12mA i 2,2V. Slika 11(c) detaljno prikazuje ovo područje visoke intenzivne I - V karakteristike sa I (lijeva osa) i intenzitetima zračenja detektovanim mjeračem snage (desna osa), pri istim *bias* naponima V . Maksimalna izlazna snaga iz ovog uzorka je otkrivena na oko 6,5μW na *bias* tački od oko 2,2V.

Prema radijacionom obrascu uzorka br. 1, diskutovanom u sljedećem odjeljku, i gubicima na detektoru, ukupni nivo snage zračenja procijenjen je na red veličine od nekoliko desetina mikrovata, što je uporedivo sa maksimalnom snagom od oko 30μW koja je zabilježena iz drugih samostalnih

mesa struktura. Maksimalna izlazna snaga zabilježena iz jedne samostalne mesa strukture proizvedene u Kadowaki-jevim laboratorijama tokom 2013. i 2014. godine iznosi približno $30\mu\text{W}$ [49–51].

Ova vrijednost intenziteta zračenja je takođe provjerena pomoću odgovora InSb HE bolometra. Izlazni napon bolometra na istoj *bias* tački iznosi oko $V_{\text{der}} \approx 2,5\text{V}$. Prema prethodnim istraživanjima [49], ovo odgovara incidentnoj terahercnoj snazi zračenja $P \approx 2.1\mu\text{W}$, gdje je $\alpha = 3.3\text{ mV/nW}$ optička osjetljivost sistema kalibrisana zračenjem crnog tijela. Dakle, procjene izlazne snage dobijene mjeračem snage i InSb HE bolometrom su konzistentne.

4.3.4. Karakteristike zračenja na I - V strukturi sa višestrukim grananjem



Slika 12. Temperaturna zavisnost I - V strukture sa višestrukim grananjem prikazanih kroz njihove odgovarajuće intenzitete zračenja označene bojama za 10K u (a), 30K u (b), 40K u (c), i 50K u (d).

Na slikama 12(a)–12(d) prikazana je zavisnost I - V strukture sa višestrukim grananjem, od temperature sa odgovarajućim intenzitetima zračenja kodiranim bojama za vrijednosti T_b od 10, 30, 40 i 50K. Na ovim slikama, nivoi pozadinskih signala desno prikazanih skala intenziteta su 0,06–0,07 u proizvoljnim jedinicama.

Kao što se vidi na slikama 12(a)–12(d), histerezis I - V karakteristike postepeno se smanjuje s porastom T_b , što je uobičajeno opažanje. Detaljno ispitivanje intenziteta zračenja dok se T_b mijenja otkriva dramatične promjene u ponašanju zračenja. Na 10K, postoje dva područja struje, oko 6 i 10 mA, gdje je intenzitet zračenja jak. U regiji s višim *bias* strujama, opaža se viša frekvencija zračenja oko 1,1THz, što odgovara TM(2,0) modu kaviteta, kako je prethodno diskutovano.

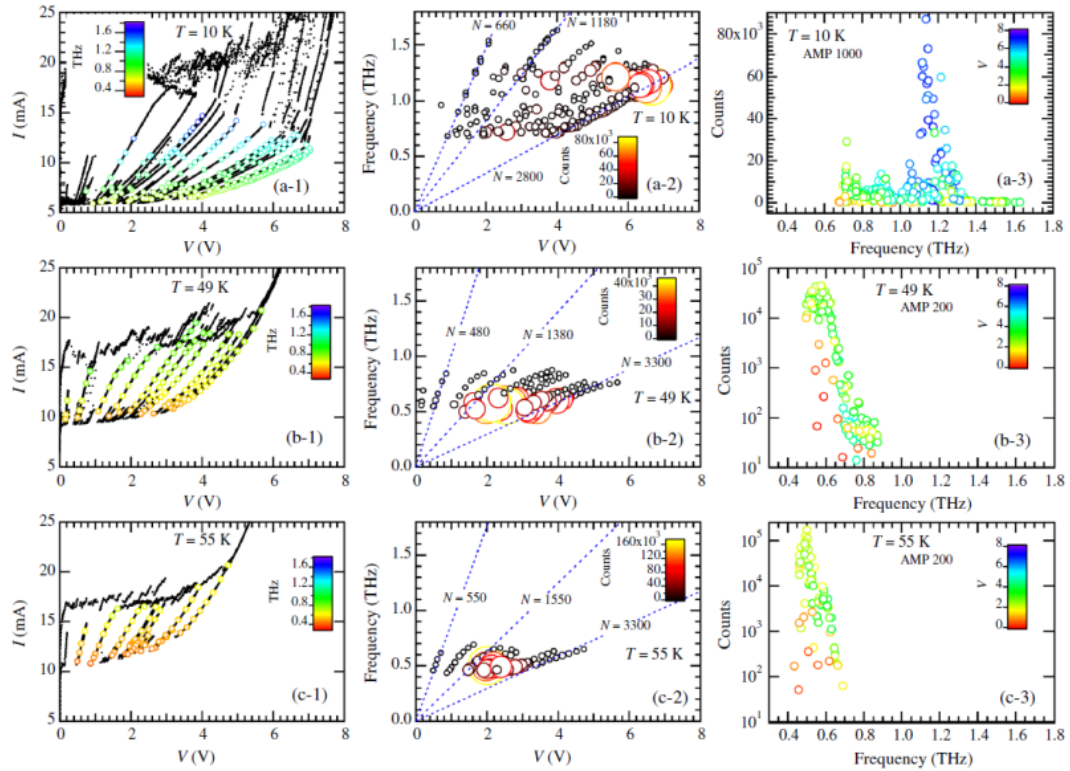
Na 30K, dolazi do značajne promjene u ponašanju zračenja, iako se ukupne I - V karakteristike ne mijenjaju značajno. Ova promjena je prikazana na slici 12(b), gdje intenzitet zračenja opažen pri $I \sim 10$ mA na 10K više nije prisutan, dok zračenje u području nižih struja raste i dominira izlazom, uprkos malim promjenama u I - V strukturi sa višestrukim grananjem. Daljim povećanjem T_b , intenzitet zračenja iz tačaka s nižim *bias* strujama raste, a područje zračenja se širi na širi opseg I pri višim vrijednostima T_b .

Zanimljivo je primijetiti da postoji vrlo malo dokaza o mogućem ponašanju tzv. "vrućih tačaka" u I - V karakteristikama. Kod „konvencionalnih“ mesa struktura s $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ supstratima, ponašanje vrućih tačaka se manifestuje iznenadnim skokovima u I - V karakteristikama i izraženim povijanjem I - V karakteristika. Na slikama 12, jedine karakteristike koje bi se mogle pripisati pregrijavanju su povijanja I - V karakteristika vidljiva na slici 12(a) na 10K i slici 12(b) na 30K, ali podaci I - V karakteristika prikazani na slikama 12(c) i 12 (d), a prikupljeni na 40 i 50K respektivno, ne pokazuju značajne promjene.

Osim smanjenja područja histerezisa I - V karakteristika sa porastom T_b , još jedna značajna karakteristika koja se može primijetiti na četiri prikazane I - V karakteristike na slici 12 je porast povratne struje I sa porastom T_b . Na slici 12(a) na 10K, povratna struja iznosi oko 6mA, a ta vrijednost se monotonim porastom temperature povećava na 9mA na slici 12(d) na 50K. Prema modelu *Josephson*-ovog spoja s otpornim i kapacitivnim skretnicama (RCSJ - Resistively and Capacitively Shunted Junction model), povratna struja $I_R(T)$ je proporcionalna $I_c(T)/\sqrt{\beta c}$, gdje je $\beta c \propto I_c(T)R^2(T)$ *McCumber*-ov parametar. Dakle, $I_R(T) \propto \sqrt{I_c(T)}/R(T)$. Pošto se i $I_c(T)$ i $R_c(T)$

smanjuju s povećanjem temperature, povratna struja raste s porastom temperature. Strogo govoreći, direktna primjena RCSJ modela za IJJs visokog T_c/T_c je teška, jer ovdje nije jasno definisana vrijednost R . Međutim, opaženo ponašanje izgleda da se dobro objašnjava RCSJ modelom.

Kako bismo razumjeli dodatne detalje o karakteristikama zračenja na I - V strukturi sa višestrukim grananjem, izvršena su opsežna mjerenja frekvencija zračenja iz unutrašnjih grana I - V karakteristika na tri različite vrijednosti T_b . Mape kodirane bojama frekvencija zračenja dobijenih pri tipičnim vrijednostima T_b od 10, 49 i 55K prikazane su na slici 13.



Slika 13. Prikazi tri karakteristike zračenja iz unutrašnjih grana I - V karakteristika pri $T_b = 10, 49$, i 55 K. Prikazi (a-1), (b-1) i (c-1) odnose se na I - V strukture sa višestrukim grananjem i odgovarajuće frekvencije zračenja na I - V karakteristikama prikazanim putem šifrovanja bojama. (a-2), (b-2), i (c-2) prikazuju odnos između posmatranih vrijednosti frekvencija zračenja f i primijenjenih napona V . Boje i veličine simbola označavaju intenzitete zračenja. Isprekidane linije prikazuju odnos ac *Josephson*-ovog efekta sa različitim vrijednostima N . Prikazi (a-3), (b-3) i (c-3) prikazuju odnos između posmatranih intenziteta zračenja i frekvencija zračenja. Boje ukazuju na

primijenjene napone na mesa strukturu. Detektorski pojačivački dobici u (a-3), (b-3) i (c-3) su 1000, 200 i 200.

Primarne karakteristike zračenja na 10K, prikazane u tri panela na slici 13(a), mogu se sumirati na sljedeći način:

1. Široka frekventna podesivost je primijećena, u opsegu od oko 0,69 do 1,63THz preko čitave I - V strukture sa višestrukim grananjem. Intenzitet zračenja ima izražen vrh na oko 1,14 THz, kako je prikazano na slici 13(a-3).
2. Frekvencije zračenja zabilježene iz unutrašnjih grana I - V karakteristika su više od onih iz spoljašnjih grana. Najviša frekvencija zračenja od 1,63 THz zabilježena je iz unutrašnje grane pri *bias* naponu od 4 V i 15 mA.
3. Frekvencije zračenja dobijene iz iste grane I - V karakteristika obično rastu sa primijenjenim *bias* naponom. Kao što je prikazano na slici 13(a-2), zabilježene frekvencije zračenja su proporcionalne primijenjenom naponu i ovo ponašanje se održava kod svih unutrašnjih grana I - V karakteristika.
4. Najveće zračenje pri frekvenciji od približno 1,14THz zabilježeno je pri *bias* naponu od oko 6,3V na najudaljenijoj grani I - V karakteristika. Slično ponašanje je primijećeno i kod unutrašnjih grana I - V karakteristika.

Zatim, karakteristike terahercnog zračenja na 49K mogu se sumirati na sljedeći način:

1. Emisije frekvencija u opsegu od oko 0,48 do 0,9THz primijećene su na I - V strukturi sa višestrukim grananjem, kako je prikazano na slici 13(b-1). Ovaj frekventni opseg zabilježen na 49K je uži od onog zabilježenog na 10K. S druge strane, intenzitet zračenja na 49K je mnogo jači na širokom vrhu oko 0,54THz nego što je zabilježeno na 10K, kako je prikazano na slici 13(b-3).
2. Frekvencije zračenja zabilježene iz unutrašnjih grana I - V karakteristika su više od onih iz spoljašnjih grana, slično kao na 10K, i ovo relativno ponašanje može biti zajedničko za zračenje iz unutrašnjih i spoljašnjih grana.
3. Zabilježene frekvencije f su uglavnom proporcionalne primijenjenim naponskim vrijednostima V , kao što je bio slučaj na 10K. Međutim, malo odstupanje od ove linearnosti je primijećeno u području viših frekvencija, kako je prikazano na slici 13(b-2). Ovo

odstupanje može biti uzrokovano efektima složenih struktura grananja na krajevima grana s visokim naponom. Drugi mogući razlog za nelinearnosti mogu biti efekti samozagrijavanja pri višim *bias* strujama I , kako je ranije diskutovano za zračenje iz uzorka br. 2.

4. Najveći intenzitet pri približno 0,54THz javlja se na unutrašnjim granama I - V karakteristika oko 2,1V. Ovo je prilično rijedak slučaj, jer u većini prethodnih slučajeva, spoljašnja grana pokazuje najveću snagu.

Konačne karakteristike zračenja na 55K mogu se sumirati na sljedeći način:

1. Vrijednosti frekvencije zračenja u rasponu od oko 0,42 do 0,69THz zabilježene su na karakterističnim I - V strukturama sa višestrukim grananjem, kao što je prikazano na slici 13(c-2). Intenzitet zračenja ima vrh na približno 0,50THz, kako je prikazano na slici 13(c-3).
2. Zabilježene frekvencije zračenja su uglavnom proporcionalne primijenjenim *bias* vrijednostima V , slično kao kod zračenja zabilježenog na 10 i 49K. Međutim, odstupanja od ove linearnosti su takođe zabilježena u području viših frekvencija, kao što je prikazano na slici 13(c-2). Ovo ponašanje je slično rezultatima dobijenim na 49K.
3. Vrlo snažno zračenje pri frekvenciji od oko 0,50THz zabilježeno je u vrlo uskom području *bias* tačke oko 2,0V i 12mA unutrašnjih grana I - V karakteristika. Ovo snažno zračenje može se pripisati TM(1,0) kavitacijskom modu uzorka br. 1.

Kao što se vidi na slikama 13(a-2), 13(b-2) i 13(c-2), vrijednosti N za prikazane podatke nisu iste. Primjećuje se da su isprekidane linije dodate da bi olakšale posmatranje, odnosno da povežu podatke dobijene iz nekih unutrašnjih I - V grana i vanjskih I - V krivih. N vrijednosti se procjenjuju iz nagiba isprekidane linije i prikazane su na slikama 9, 13(a-2), 13(b-2) i 13(c-2). Nijesu sve N vrijednosti prikazane na graficima, ali u tačkama lociranim na svim krugovima prikazanim na slikama 13(a-2), 13(b-2) i 13(c-2) su izmjerene frekvencije THz zračenja.

Iz nagiba grafika frekvencije prema naponu na slici 13, maksimalni broj operativnih spojeva N_{max} raste sa $N_{max}=2800$ (10K) na $N_{max}=3300$ (50–55 K) s porastom T_b . Ova različita vrijednost emitirajućih *Josephson*-ovih spojeva pri različitim T_b može biti uzrokovana temperaturnom distribucijom duž c-ose $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ mesa strukture, koja se može mijenjati sa T_b , jer pri nižim T_b , IJJs uz safirne supstrate mogu biti u superprovodnom stanju pri svim *bias* strujama s ovim eksperimentalnim uslovom.

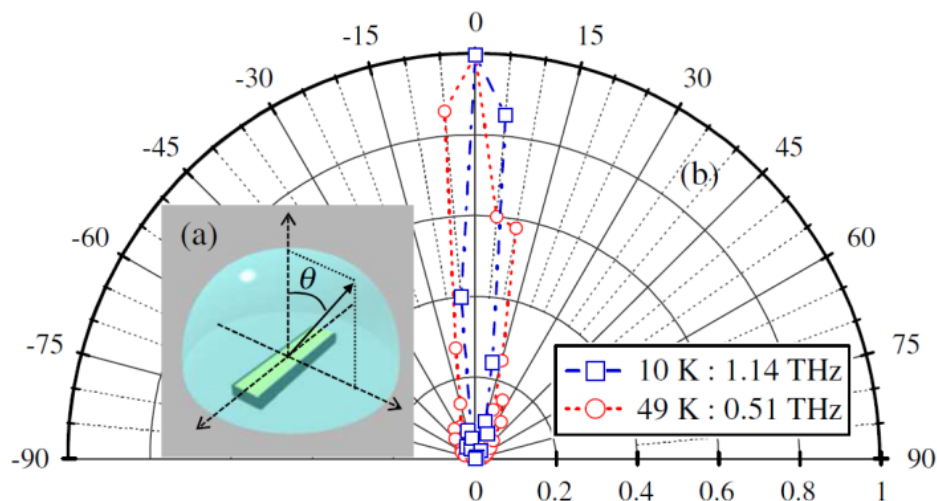
Drugo, frekvencije zračenja generalno se pomjeraju od viših vrijednosti na nižim T_b prema nižim vrijednostima na višim T_b . Međutim, intenzitet zračenja ponekad je znatno pojačan čak i za red veličine. Konkretno, uzorak br. 2 pokazuje dva jaka vrha zračenja na oko 0,54 i 1,14THz. Ovi rezultati su u skladu s dvostrukim vrhom prikazanim na slici 9(d), što jasno pokazuje da mehanizam pojačanja kavitatom za terahercno zračenje funkcioniše ispravno, ali njegova specifična zavisnost o T_b još uvijek nije razjašnjena.

Što se tiče frekvencije zračenja f , ona je osnovno proporcionalna primijenjenom naponu V , kao što se vidi na slikama 13(a-2), 13(b-2) i 13(c-2), podsjećajući na ac Josephson-ov efekt, koji se široko smatra pokretačkom silom terahercnog zračenja iz IJJs. Iako su primijećena značajna odstupanja od linearnog odnosa na višim T_b , neki mogući razlozi za ova odstupanja su diskutovani.

Konačno, jedna zanimljiva karakteristika koja treba biti istaknuta je da je najjače zračenje zabilježeno na određenoj unutrašnjoj grani I - V karakteristika na 55K, kako je prikazano na slikama 13(c-2) i 13(c-3). U većini slučajeva, snažno zračenje se javlja na relativno visokoj temperaturi T_b na vanjskoj grani I - V karakteristika ili na unutrašnjoj grani koja je prilično blizu vanjskoj. Kao što je prikazano na slikama 13(b-2) i 13(c-2), pri bias naponu na unutrašnjim granama I - V karakteristika, neki *Josephson*-ovi spojevi su u funkciji i oni mogu biti dobro sinhronizovani samo na određenim frekvencijama (npr. 0,5 i 1,1 THz, gdje dolazi do rezonanci kavita). Ovi rezultati sugerišu da može postojati optimalan broj *intrinsic Josephson*-ovih spojeva za snažno zračenje iz specifične mesa strukture.

Zabilježeno je i da je najviša frekvencija zračenja $f=1,63$ THz također primijećena iz unutrašnje grane. U prethodnim studijama, stvaranje tople tačke ili pregrijavanje mesa izazvalo je skok *bias* napona V uz male promjene struje I . Stoga, frekvencija zračenja u visoko *bias* području I iznad skoka napona V na I - V karakteristikama je niža zbog smanjenja primijenjenog napona V uslijed *Joule*-ovog zagrijavanja. Osim toga, smanjenjem napona V dalje prema unutrašnjim granama i prema niskim *bias* strujama I , ukupno *Joule*-ovo zagrijavanje se smanjuje. Stoga je skok napona V potisnut na unutrašnjim granama I - V karakteristika i u području niskih *bias* struja I , a kako broj aktivnih spojeva N_{act} opada brže od napona V , frekvencija f raste. Ovi efekti mogu djelimično objasniti porast frekvencije f u unutrašnjim granama I - V karakteristika. Ove tačke su važne za dizajn visoko frekventnih terahercnih emitera na bazi *Josephson*-ovih spojeva.

4.3.5. Oblici zračenja



Slika 14. Umetak (a) Šematska definicija ugla θ . (b) Odgovarajuće zavisnosti intenziteta zračenja od ugla θ (u stepenima) posmatrane pomoću Si bolometra pri 10K (približno 1.14THz) i 49K (približno 0.51THz).

Ugaoni (θ) obrasci zračenja su prikazani na slici 14 i zabilježeni su na 10K i 49K sa Si sočivom. Skica ugla θ je prikazana na slici 14(a). Istovremena mjerenja intenziteta zračenja pomoću Si-bolometra pri fiksnim vrijednostima ugla θ i *bias* napona V na I - V karakteristikama kao na slikama 8(b) i 8(c) su obavljena. Zračenje pod svakim uglom θ dobijeno je iz izlaznih napona bolometra pri fiksnoj *bias* tački na I - V karakteristikama, a objedinjeni rezultati su prikazani na slici 14. Frekvencije zračenja pri fiksnim *bias* tačkama na 10 i 49K su izmjerene pomoću FTIR spektrometra. Ugaoni obrasci raspodjele pri obje temperature $T_b=10\text{K}$ i 49K su oštro usmjereni unutar oko 10° - 15° od $\theta = 0^\circ$ (okomito na uređaj mesa), kako je prikazano na slici 14(b), zbog snažnog fokusiranja koje ostvaruje hemisferično Si sočivo pričvršćeno na safirnu ploču iznad mesa strukture, kako je skicirano na slikama 14(a) i 6(e), a fotografija je prikazana na slici 6(f). Primjećuje se da vrh obrasca zračenja pod uglom $\theta = 0^\circ$ može biti takođe posljedica efekta safirnih supstrata i metalnih struktura oko mese.

5. Praktična primjena realizovanih IJJ-THz emitera

Opseg primjena THz zračenja je izuzetno širok u oblastima nauke i tehnike [94-97].

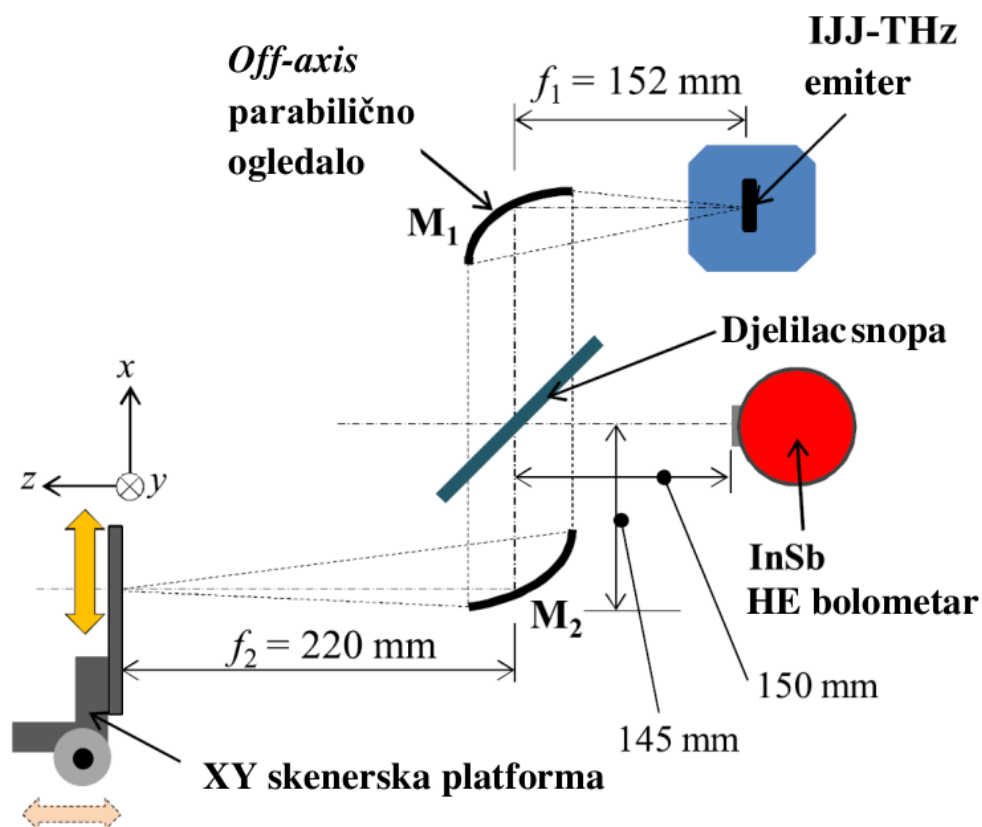
U cilju dokazivanja praktične primjenjivosti realizovanih IJJ-THz emitera, odabrana su za realizaciju dva reprezentativna tipa instrumenata:

- Refleksioni sistem
- Transmisioni Kompjuterizovani tomografski sistem

Realizovani sistemi su primijenjeni u praksi i za iste su dati prikazi praktičnog rada u realnim situacijama.

5.1. Sistem za refleksiono THz snimanje realizovan pomoću IJJ THz emitera

Slijedi prikaz sistema realizovanog sistema za refleksivno terahercno snimanje sa praktičnim primjerima kojim je dokazana funkcionalnost sistema i upotrebljivost primijenjene tehnologije [58].



Slika 15. Šematski prikaz refleksivnog tipa mjernog sistema (pogled odozgo).

Na slici 15 je prikazan mjerni sistem dizajniran za refleksivno mjerenje. IJJ-THz emiter bio je smješten u *He flow* kriostat (CF1104, OXFORD Inc.). THz elektromagnetni talasi, generisani iz IJJ-

THz emitera, transformisani su u paralelni snop pomoću prvog *off-axis* paraboličnog ogledala - M1, a zatim je paralelni snop fokusiran na uzorak pomoću drugog *off-axis* paraboličnog ogledala, M2.

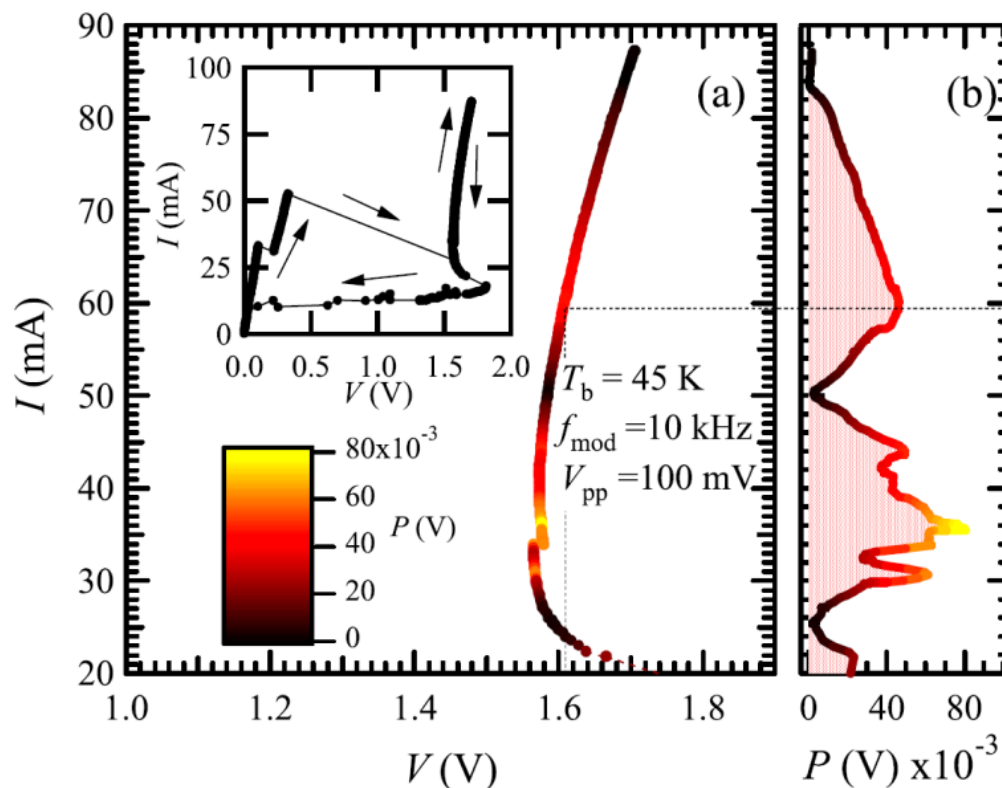
Ova dva *off-axis* parabolična ogledala imaju fokusne dužine od 152 mm i 220 mm. Uzorak je postavljen na 2D (x, y) skenersku platformu (SGAHM26-200, SIGMA KOKI Co.) i skeniran u X (horizontalnom) i Y (vertikalnom) pravcu pri različitim brzinama do 130 mm/s.

Za potrebe snimanja reflektovanog snopa, postavljen je Silicijumski *wafer*-a kao djeliteľ snopa (*beam splitter* - BS) između dva parabolična ogledala, pod uglom od 45° kao što je prikazano na slici 15.

Dio emitovanog THz snopa prolazi kroz *Si-wafer* BS i uvodi se u xy-skenersku platformu pomoću drugog paraboličnog ogledala. Snop reflektovan sa uzorka se prikuplja drugim ogledalom i vraća nazad do *Si-wafer* BS-a. Ovaj reflektovani snop je delimično skrenut za 90° sa *Si-wafer*-om BS i detektovan pomoću visoko-brzinskog InSb HE bolometra (QFI/2BI, QMC Instruments Ltd.), kako je prikazano na slici.

Snaga detektovana na InSb HE bolometru mjerena je korišćenjem *lock-in* pojačivača (7265, EG&G instruments). Za ovo mjerenje, izlazna snaga IJJ-THz emitera bila je modulirana primenom malog napona kvadratnog talasa (oko 100 mV) na frekvenciji od 10 kHz dodatog na konstantni jednosmerni napon pomoću generatora funkcija (33220A, Agilent). Ova frekvencija modulacije određena je minimizacijom nivoa šuma HE bolometra sa vremenskom konstantom od 10 ms. Primijenjena tehnika modulacije snage je superiornija u poređenju sa optičkom tehnikom modulacije uz korišćenje optičkog čopera, jer se pozadinski šum u dalekom infracrvenom spektru, koji dolazi od ambijentalnog zračenja, može potpuno eliminisati.

Za realizaciju prdmetnog sistema, korišćena su dva IJJ-THz emitera sa frekvencijama zračenja od 440 GHz i 510 GHz, jer ovi emiteri pokazuju stabilne i dovoljno visoke intenzitete zračenja za mjerenja sa modulacijom napona.

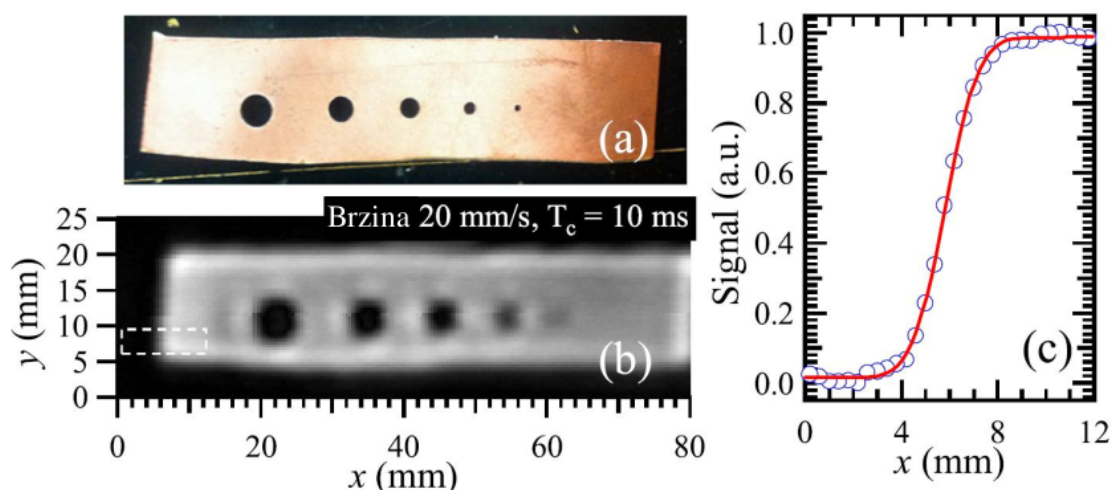


Slika 16. (a) Strujno-naponske (I - V) karakteristike IJJ THz emitera korišćenog za mjerenja snimanja pri temperaturi kupke $T_b=45\text{ K}$. Kriva je prikazana pomoću šifriranja boja u skladu sa izlaznim naponom InSb HE bolometra. U gornjem lijevom uglu prikazani su ukupni I - V karakteristike kada se pristrasna struja pomjera, kako je naznačeno strelicama. (b) Izlazni napon InSb HE bolometra prikazan je kao funkcija *bias* struje, koristeći isti šifrirani prikaz boja.

Strujno-naponska (I - V) karakteristika IJJ-THz emitera korišćenog u ovom eksperimentu pri temperaturi u kriostatu od 45 K je prikazana na Slici 16(a). Dimenzije mesa uređaja su $80 \times 400 \times 2,4 \mu\text{m}^3$, izrađene tehnikom glodanja Ar ionima uz korišćenje metalne maske. Sub-THz zračenje sa monohromatskom frekvencijom od 440 GHz procijenjeno je korišćenjem tehnike interferencijskog uzorka ranije razvijenom, pri *bias* tački gdje je struja $I = 60 \text{ mA}$ i napon $V = 1,61 \text{ V}$, što je prikazano isprekidanom linijom na slici 16.

Prema osetljivosti InSb HE bolometra od $3,3 \text{ mV/nW}$ u uslovima mjerenja, detektovana snaga može se procijeniti na oko 34 nW , što omogućava snimanje sa odnosom signal-šum (S/N) ≈ 100 .

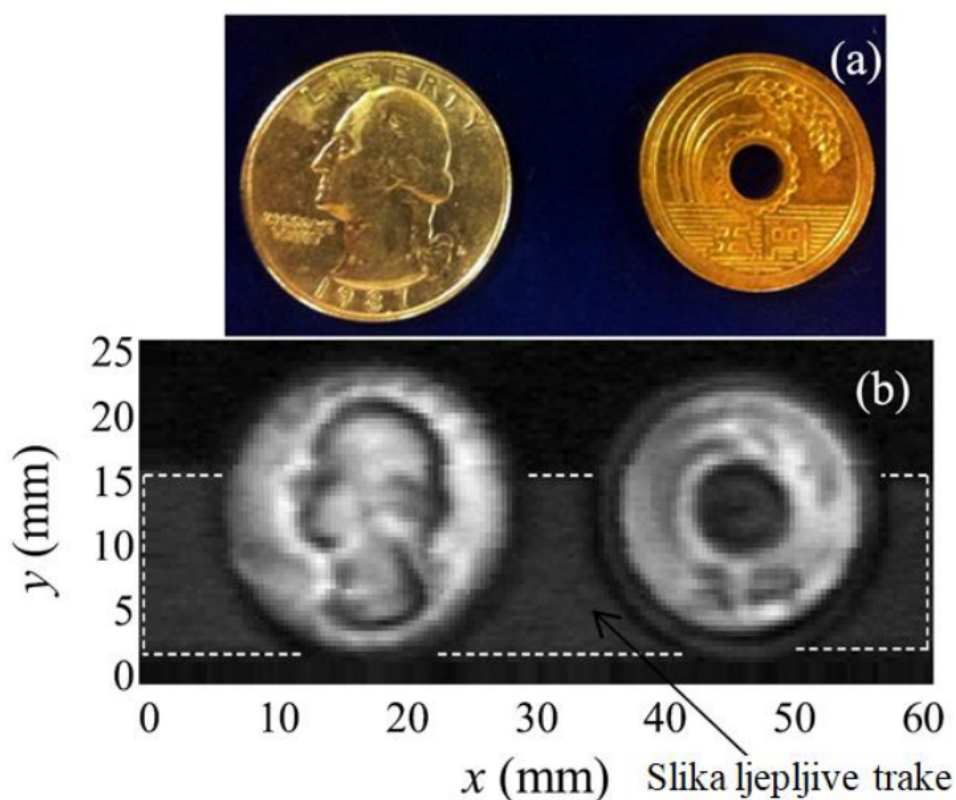
Prikazan je prvi primjer, gdje je metalna ploča sa pet rupa u nizu, različitih prečnika od 1 mm do 5 mm sa korakom od 1 mm, kako je prikazano na slici 17(a), korišćena kao objekat pri frekvenciji od 440 GHz. Rezultat je prikazan na slici 17(b). Iako se rupe u metalnoj ploči mogu vidjeti, slika postaje manje jasna kako se prečnici rupa smanjuju, i rupa prečnika 1 mm više nije primjetna. Pošto se rupa prečnika 2 mm može jasno prepoznati, zaključuje se da je granična rezolucija ovog sistema približno 1 mm ili nešto veća. Slike su snimljene uz vremensku konstantu od 1 ms i brzinu skeniranja od 120 mm/s, nakon provjere uticaja brzine skeniranja na kvalitet slika. U ovim uslovima, potrebno je oko 120 sekundi za dovršavanje slike veličine 120×120 piksela pri svakom koraku od 1 mm.



Slika 17. (a) Optička fotografija metalne ploče (bakar) sa rupama prečnika 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm i 5 mm, s desna na lijevo. (b) Refleksioni tip slike, snimljen brzinom xy-skenerske platforme od 20 mm/s, sa vremenskom konstantom *lock-in* pojačivača od 10 ms i koracima skeniranja od $x=y=0.4$ mm. (c) Profil linijskog skeniranja ivice metalne ploče, označene isprekidanom linijom na slici (b). Signal je prilagođen korišćenjem funkcije greške.

Prečnici rupa prikazani na slici 17 izgledaju nešto veći nego na optičkoj slici, a ova tendencija postaje izraženija kako se prečnici rupa smanjuju. Ovaj efekat može se pripisati veličini tačke THz snopa i efektu ivica rupa. Svakako je jasno da fokusiranje i kolimacija THz snopa zapravo vrlo važni za dobijanje jasnih slika. U konkretnom slučaju, veličinu tačke THz snopa na ravni uzorka je procijenjena korišćenjem metode "ivice noža". Na slici 17(c), prikazam je eksperimentalni rezultat

linijskog profila ivice metalne ploče, označene isprekidanom linijom na slici 17(b). Procijenjeni prečnik distribucije na pola visine iznosi oko 2,5 mm. Prostorana rezolucija mjernog sistema može se pripisati veličini ove tačke snopa. Međutim, ovaj problem se može poboljšati korišćenjem odgovarajuće blende sa prikladnim otvorom i podešavanjem položaja i ugla dva *off-axis* parabolična ogledala sa osovinskim pomakom.

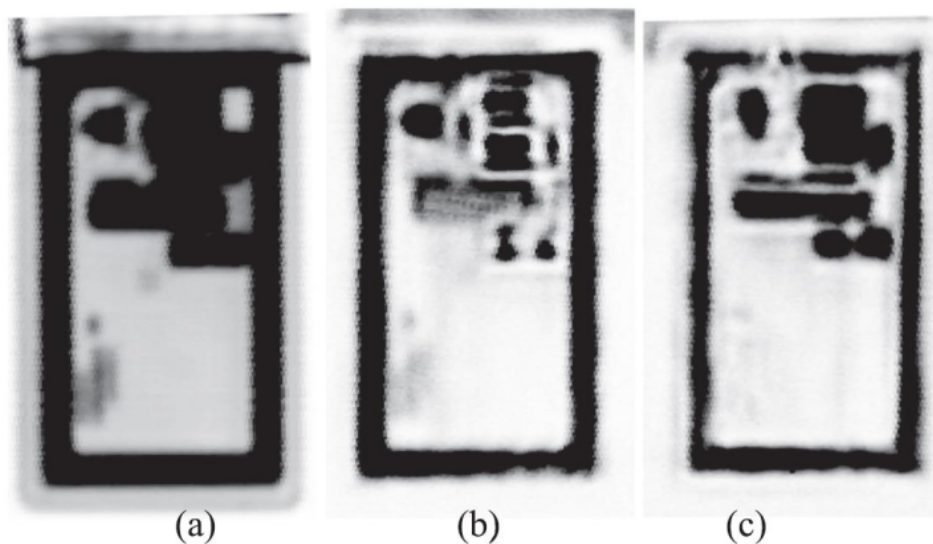


Slika 18. (a) Fotografije američkog *quarter*-dolara i japanskog novčića od 5 jena. (b) Refleksioni tip slike oba novčića prikazanih u (a). Ova slika je snimljena brzinom xy-skenerске platforme od 20 mm/s, sa vremenskom konstantom *lock-in* pojačivača od 10ms i koracima skeniranja od 0,4 mm po x i y osi.

U sljedećem primjeru prikazana je karakteristična osobinu refleksionog tipa snimanja i efekat otvora. Slika 18 prikazuje fotografije američkog *quarter*-dolara i japanskog novčića od 5 jena (sliku 18(a)) i slike refleksionog tipa ovih novčića snimljene na frekvenciji od 440 GHz (slika 18(b)). Novčići su bili pričvršćeni na ploču od kvarcnog stakla dvostrano ljepljivom trakom. Refleksiono

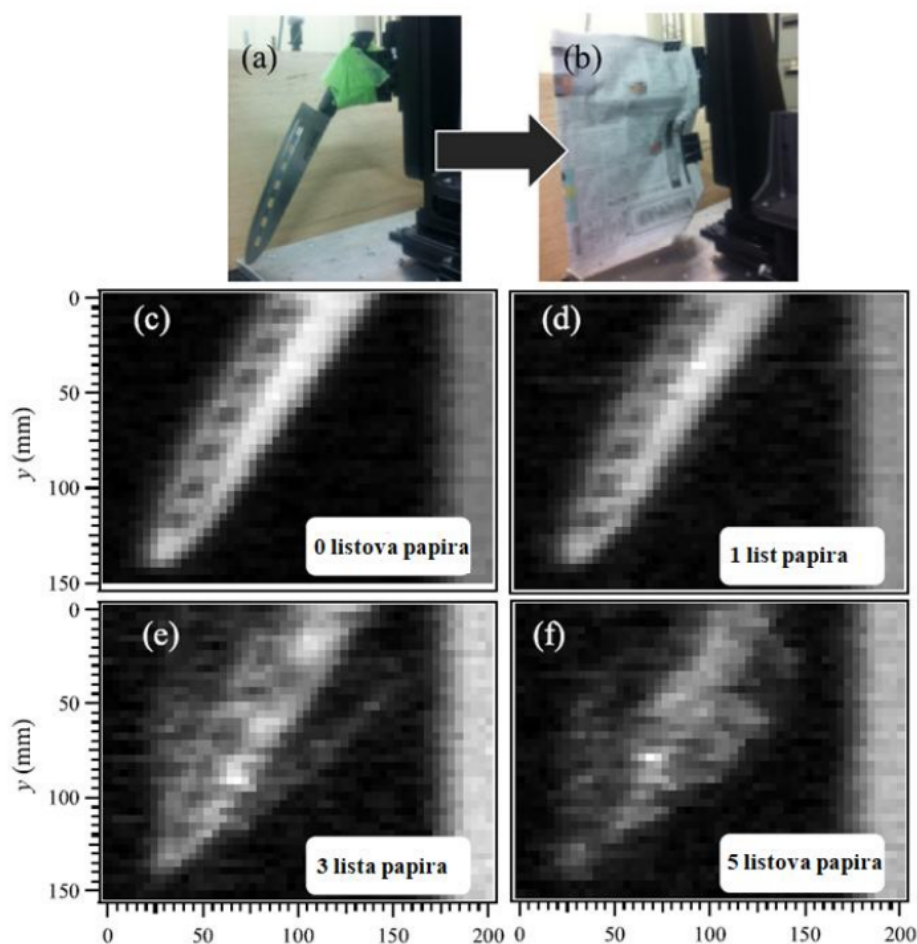
snimanje jasno prikazuje teksturu površine svakog novčića. Osim toga, može se vidjeti i dvostrana traka na kvarcnom staklu iza novčića, označena isprekidanom linijom na slici 18(b).

Ovdje je potrebno napomenuti da je korišćena drvena ploča debljine 2,5 mm kao otvor kako bi se uhvatila samo okomita komponenta refleksije ispred novčića. Ovo čini slike mnogo jasnijima nego bez otvora, kako se vidi na slici 18(b), gdje je zakrivljena bočna strana lica Georgea Washingtona prilično jasno vidljiva. Slova urezana na površini američkog kvart-dolara nisu prepoznatljiva, ali su slova na japanskom novčiću od 5 jena čitljiva. Takođe je važno napomenuti da je ova drvena ploča korisna kao apsorber za smanjenje efekta višestruke refleksije, što može stvoriti interferencione pruge na slici.



Slika 19. (a) Transmisioni tip slike lične karte. (b) i (c) Refleksioni tip slika snimljenih sa prednje i zadnje strane, respektivno. Slika u (c) je horizontalno okrenuta (s lijeva na desno). Ove slike su snimljene brzinom xy-skenerne platforme od 40 mm/s, sa vremenskom konstantom *lock-in* pojačivača od 3 ms i koracima skeniranja od $x=y=0.4$ mm.

Za drugu demonstraciju je korišćena ID kartica pri čemu su upoređivane slike snimljene metodama refleksije i transmisije. Slike su prikazane i upoređene na slici 19, gdje su i transmisione i refleksione slike sa obje strane snimljene na frekvenciji od 440 GHz. Zanimljivo je primijetiti da refleksione slike prikazane na slikama 19(b) i 19(c) pokazuju različite prikaze s prednje i zadnje strane, dok transmisiona slika izgleda kao superpozicija obje refleksione slike. Slika 19(c) je po horizontali okrenuta s lijeva na desno.



Slika 20. (a) slika kuhinjskog noža, (b) slika noža prekrivenog novinskim papirom, (c). refleksiona slika kuhinjskog noža, (d), (e) i (f) – slike noža prekrivenog sa jednim, tri i pet listova novinskog papira, respektivno. Prikazane slike su snimljene brzinom xy-skenerske platforme od 100 mm/s, sa vremenskom konstantom *lock-in* pojačivača od 30ms i koracima skeniranja 4,0mm po x i po y osi.

Treća demonstracija primjene realizovanog IJJ-THz emitera se odnosi na primejnu u sigurnosnim sistemima. Slika 20 prikazuje slike kuhinjskog noža zamotanog u novinski papir do pet slojeva, snimljene na frekvenciji od 510 GHz korišćenjem IJJ-THz emitera dimenzija $60 \times 400 \times 1,6 \mu\text{m}^3$. Jasna slika je dobijena u slučaju nepokrivenog noža, dok slike postaju zamagljene kako se broj slojeva papira povećava. Uočljivo je da pet slojeva papira predstavlja graničnu debljinu papirne prepreke za praktičnu primjenu korišćenog THz sistema za refleksiono snimanje. Glavni uticaj na

refleksione slike je uzrokovan rasipanjem i slabljenjem upadnog THz snopa na svakom sloju papira, što uzrokuje višestruke refleksije i dovodi do zamućenih slika.

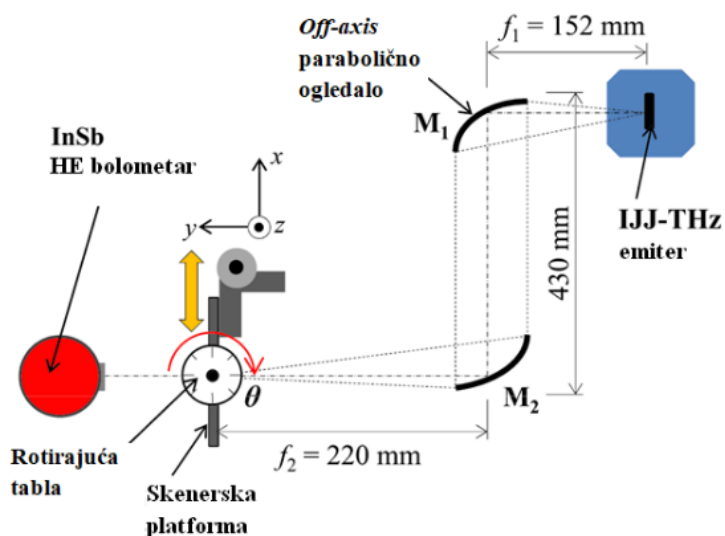
Uz sve prethodno navedeno, vrijeme akvizicije za snimanje cijele slike objekta predstavlja još jedan važan parametar za praktične primjene. U radu sa kontinuiranim talasom (*continous wave* - CW), uz korišćenje *lock-in* pojačivača i xy-skenerske platforme, ono je u suštini određeno brzinom skeniranja uzorka i vremenskom konstantom *lock-in* pojačivača. Realizovani sistem postiže brzina snimanja od 33 piksela/s, odnosno za dobijanje slike u veličini 100x100 piksela refleksionim skeniranjem uzorka ukupno vrijeme snimanja iznosi oko 5 minuta.

5.2. Kompjuterizovana tomografska slika korišćenjem IJJ-THz emitera

Za potrebe dokazivanja praktične primjenjivosti realizovanih IJJ-THz emitera za generisanje transmissionih slika, pristupilo se izradi jedog od najkompleksnijih uređaja koji se koristi u transmissionom domenu, a to je CT (kompjuterska tomografija), koji omogućava snimanje poprečnih presjeka unutrašnje strukture, odnosno trodimenzionalnu sliku unutrašnje strukture uzoraka.

Slijedi opis realizovanog THz-CT sistema za snimanje koji koristi IJJ-THz emiter kao izvor THz zračenja [59], a za snimanje su korišćena sljedeći uzorci:

- tri uspravne metalne šipke postavljene na stiropor,
- osušeni srcoliki grašak (*Cardiospermum helicacabum*) sa tri sjemenke unutra, i
- plastična lutka unutar ljuske jajeta.



Slika 21. Šematski prikaz sistema za kompjuterizovano tomografsko snimanje (pogled odozgo).

Slika 21 predstavlja šematski prikaz THz-CT sistema za snimanje baziran na IJJ-THz emiteru. IJJ-THz emiter je postavljen u Helijumom hlađeni kriostat (CF1104, OXFORD Instruments), i radna temperatura je podešavana između 10 i 70 K. THz elektromagnetni talasi generisani iz IJJ-THz emitera prikupljaju se i konvertuju u paralelni snop pomoću prvog *off-axis* paraboličnog ogledala - M1, a zatim se fokusiraju na uzorak pomoću drugog *off-axis* paraboličnog ogledala - M2. Fokusne dužine M1 i M2 ogledala su 152 mm i 220 mm, respektivno.

Uzorci su postavljeni na rotirajući tablu, montiranu na 2D (x, z) skenersku platformu (SGAHM26-200, SIGMA KOKI Co.). Ovaj skener omogućava snimanje jednodimenzionalnih slika duž x (horizontalne) ose pri različitim brzinama manjim od 130mm/s na različitim fiksnim uglovima rotacije θ stola sa uzorkom, radi mjerenja ugaonih i prostornih zavisnosti transmisijnog intenziteta $I(x,y,\theta)$ THz zračenja. Transmitovani THz snop iz uzorka detektuje se visokobrzinskim InSb HE bolometrom (QFI/2BI, QMC Instruments Ltd.), čija se snaga detekcije prati pomoću *lock-in* pojačivača (Model 7265, EG&G Instruments Co.).

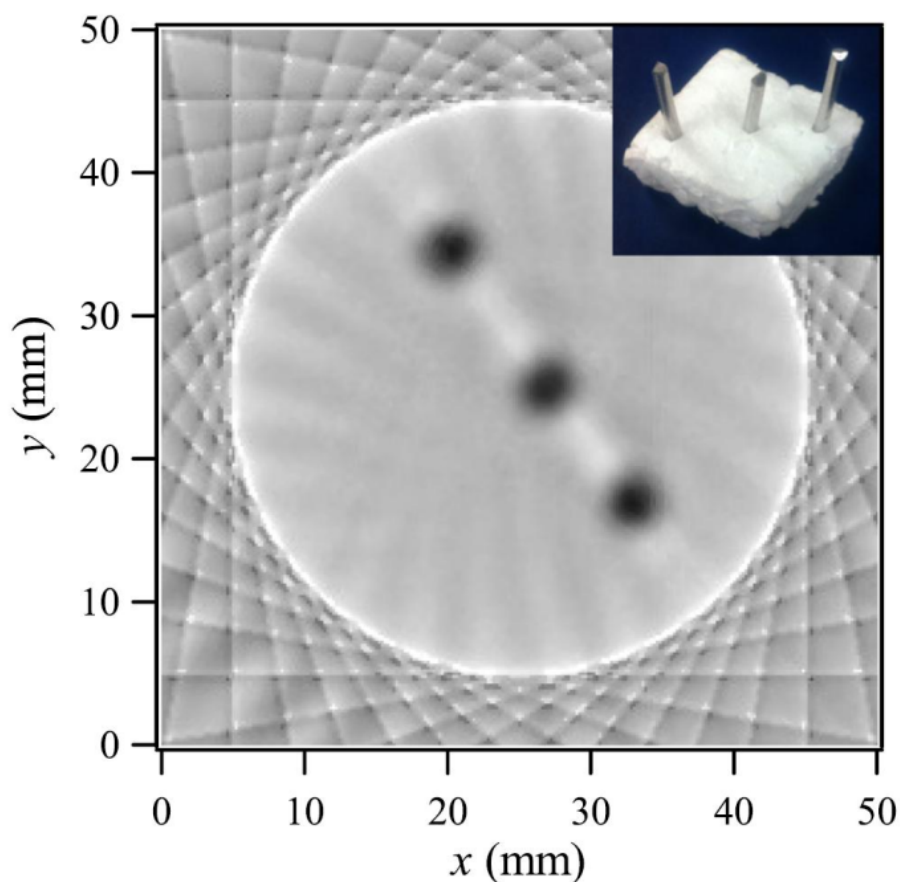
Da bi se olakšala detekcija pomoću *lock-in* pojačivača, izlazna snaga IJJ-THz emitera se efikasno moduliše superponiranjem jednosmernog napona napajanja sa pravougaonim naponom (amplituda 80mV i frekvencija 10 kHz), koristeći generator funkcija (33220A, Agilent). *Lock-in* detekcija koja koristi ovu elektronsku modulaciju je superiorna u odnosu na optičke "chopper-e" po pitanju performansi u suzbijanju šuma, jer se termalni pozadinski šum iz okoline eliminiše iz detektovanog signala.

Za dobijanje pouzdanih CT slika, od krucijalne važnosti je imati stabilan THz izvor zračenja tokom cijelog mjerenja. Za THz-CT mjerenja snimanja odabran je IJJ-THz emiter dimenzija $80 \times 400 \times 2,4 \mu\text{m}^3$, zbog njegove stabilnosti i izlazne snage koja je dovoljna za mjerenja sa gore navedenom elektronskom modulacijom napona napajanja. Odnos promjene snage u vremenu $\Delta P(t)$ i prosječne vrijednosti snage $P(t)$ izlazne snage odabranog IJJ-THz emitera tokom svakog mjerenja uzorka bio je manji od $\pm 1\%$. Korišćeni uređaj je radio na 45 K i emitovao je frekvenciju $f=440$ GHz.

Korišćeni IJJ-THz emiter ima prostornu distribuciju snage THz zračenja tako da ogledalo M1 na slici 21 prikuplja najveći dio ukupne snage zračenja. Jednosmjerni napon napajanja je podešen na vrijednost pri kojoj se generiše stabilno zračenje, pri čemu je napon izmjeren sa bolometra pomoću *lock-in* pojačivača iznosio oko $V_{\text{det}}=40$ mV mjereno bez uzorka. Prema iskustvima sakupljenim

tokom dotadašnjih istraživanja, izmjereni napon odgovara upadnoj THz snazi zračenja od $P=2\sqrt{2}V_{\text{det}}/\alpha \approx 34 \text{ nW}$, gdje je $\alpha=3,3 \text{ mV/nW}$ - optička osjetljivost sistema kalibrisana crnim tijelom.

THz-CT slike koje slijede su konstruisane superponiranjem θ zavisnosti 2D matrice $I(x,y,\theta)$ dobijene linijskim skeniranjem duž x ose, koristeći primitivnu tehniku CT snimanja sa povratnom projekcijom [98].

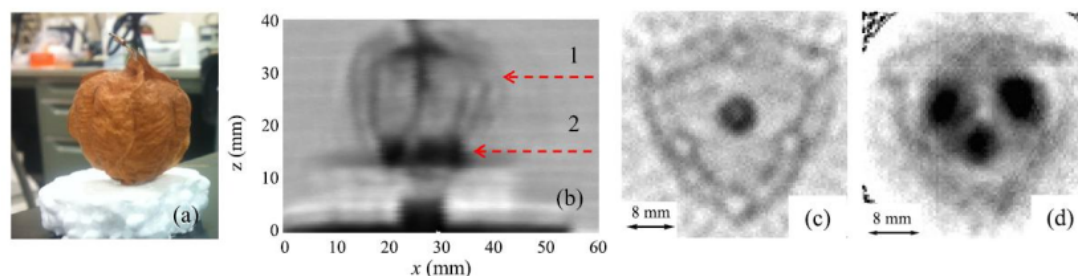


Slika 22. THz-CT slika tri metalne šipke, svaka prečnika 2 mm, koje su podržane bazom od stiropora. U sliku je umetnuta optička fotografija snimanog uzorka.

Za provjeru ispravnosti rada realizovanog THz-CT uređaja, prvo je obavljena jednostavna provjera korišćenjem trivijalnog testnog uzorka. Slika 22 prikazuje THz-CT sliku tri uspravne metalne šipke prečnika 2 mm, usađene u bazu od stiropora. Umetak na slici 22 prikazuje optičku fotografiju korišćenog uzorka. Prikazana THz-CT slika je dobijena superponiranjem slika zavisnih od ugla θ ,

snimljenih od $\theta=0^\circ$ do 360° u koracima od 10° , koje su dobijene horizontalnim (x) linijskim skeniranjem pri brzini od 10 mm/s i skenirnim koracima od 0,2 mm. Prikupljanje svih podataka zavisnih od ugla trajalo je oko 10 minuta.

Konačna složena slika prikazana na slici 22 jasno prikazuje karakteristike uzorka u pogledu položaja, udaljenosti i prečnika tri šipke. Na osnovu ove slike procjenjeno je da je prostorna rezolucija realizovanog sistema za transmisiono snimanje reda veličine ili nešto veća od 1 mm. Primjećuje se da dvije (gornji lijevi dio THz-CT slike) šipke imaju nešto veće prečnike od treće šipke, iako sve imaju isti prečnik. To može biti posljedica činjenice da šipke nisu sve postavljene paralelno sa osi rotacije. Takođe, detektovani prečnici svih tri šipke su znatno veći od 2 mm, što je vjerovatno posljedica ograničenja rezolucije našeg sistema od približno 1 mm, dobijenog korišćenjem monohromatskih THz elektromagnetnih talasa.

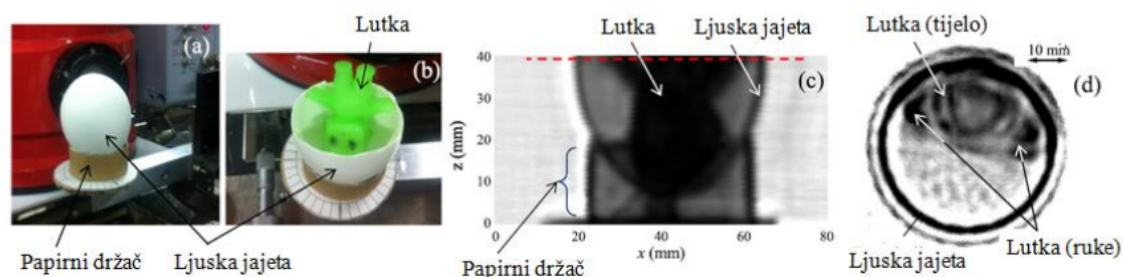


Slika 23. (a) Optička fotografija spoljašnjosti osušenog srcolikog graška, (b) Transmisiona slika osušenog srcolikog graška, (c) i (d) THz-CT horizontalne planarne slike snimljene na fiksnim z -vrijednostima označenim isprekidanim crvenim strelicama 1 i 2 na slici 23(b).

Rezultati THz-CT skeniranja uzorka koji je relevantniji za korisnost sistema za snimanje su postignuti snimanjem slika presjeka osušenog srcolikog graška u kojem su se nalazile tri sjemenke. Optička fotografija srcolikog graška postavljenog na bazu od stiropora prikazana je na slici 23(a). Dvodimenzionalna transmisiona THz slika prikazana je na slici 23(b). Tri tamne tačke na dnu srcolikog graška predstavljaju slike tri sjemenke smještene u tri različite šuplje komore unutar istog, a koje su razdvojene tankozidnim pregradama. Blage vertikalne linije povezane na vrhu i dnu predstavljaju slike tri zida koja razdvajaju komore srcolikog graška.

THz-CT slike srcolikog graška konstruisane su od 36 transmisijonih 2D slika na horizontalnim ravnima označenim isprekidanim crvenim strijelicama 1 i 2 na slici 23(b), i prikazane su na slikama

23(c) i 23(d). Horizontalne slike za CT snimak su snimane pri brzini skeniranja od 10 mm/s uz korake mjerenja od 0,4 mm. Slika 23(c) jasno prikazuje karakteristične osobine srcolikog graška: tri komore, svaka sa tankozidnom, balonolikom trokutastom kapsulom, zbijene zajedno. Na slici 23(d) jasno su vizualizovane tri sjemenke u obliku loptica, smještene u odvojene komore na dnu srcolikog graška. Ovi rezultati pružaju snažne dokaze da je THz-CT tehnika snimanja izuzetno korisna za istraživanje unutrašnjih struktura, raspodjela, tekstura i sl. u objektima koji sadrže različite koeficijente apsorpcije THz talasa.



Slika 24. (a) i (b) Optičke fotografije ljuske jajeta podržane papirnim držačem na rotirajućoj tabli - platformi za uzorke i lutke postavljene naopako unutar ljuske jajeta, (c) Transmisiona slika lutke unutar ljuske jajeta, (d) THz-CT slika lutke unutar ljuske jajeta.

Treći uzorak koji se ispitivao koristeći realizovani THz-CT uređaj, se sastojao od male plastične lutke postavljene u ljusku jajeta. Slika 24(a) prikazuje optičku fotografiju ljuske jajeta postavljene i podržane papirnim držačem na platformi za uzorke. Plastična lutka postavljena je u ljusku jajeta naopačke, kao što je prikazano na slici 24(b). Zatim je ljuska jajeta zatvorena i snimljena je transmisiona slika. Ovaj rezultat je prikazan na slici 24(c), gdje su glava male lutke, ljuska jajeta i papirni držač jasno vidljivi, iako plastika generalno ima veoma nizak koeficijent apsorpcije. Jasno je da THz talasi lako prodiru kroz ljusku jajeta, dok plastična lutka ima nešto veći koeficijent apsorpcije od ljuske jajeta, kao što je prikazano na slici 24(c). THz-CT slika dobijena na presjeku prikazanom isprekidanom crvenom linijom na slici 24(c) i taj presjek je prikazan je na slici 24(d). Ova CT slika je dobijena pri brzini skeniranja od 10 mm/s u koracima od 0,2 mm.

Na slici 24(d) su jasno detektovane karakteristike tijela i ruku lutke, položaj lutke u ljusci jajeta i ivica ljuske jajeta.

6. ZAKLJUČAK

Za potrebe realizovanja zadatka koji je trebalo uraditi u sklopu doktorske disertacije, izvršena je analiza podataka kojima je eksperimentalno dokazalo da magnetno polje nema bilo kakav značajan pozitivan uticaj na pojačanje zračenja IJJ-THz emitera realizovanih na bazi $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ mesa struktura, već upravo suprotno – da dominantno slabi, odnosno gasi zračenje. Istražujući moguće uzroke dominantnog efekta slabljenja zračenja pod uticajem magnetnog polja, došlo se do zaključka da uz složeno vorteksno stanje može narušiti uslove potrebne za koherentno THz zračenje *intrinsic Josephson*-ovih spojeva i dovesti do smanjenja ili potpunog gašenja generisanog THz zračenja.

No, mnogo bitniji uzrok slabljenja zračenja, predstavlja nehomogeni raspored temperature uzrokovano *Joule* samozagrijavanjem u situaciji kada se mesa struktura kvalitetno hladi sa donje strane preko supstrata, dok se ostali dio mese slabo hladi disipacijom elektromagnetnog zračenja (toplotno i THz) u vakumu, a isti je bio prouzrokovan dizajnom prvih realizovanih IJJ-THz emitera.

U cilju smanjivanja *Joule* efekta samozagrijavanja mese, razvijen je jednostavan proces za mehaničku izradu samostalnih mesa struktura i detaljno prezentovan postupak konstruisanja IJJ-THz emitera baziranih na njima.

Korišćenjem IJJ-THz emitera baziranih na samostalnim mesa strukturama s jednostavnom metodom sklapanja, generisano je zračenje elektromagnetnih talasa i predstavljene su njegove karakteristične osobine u vrlo širokom frekventnom opsegu od 0.3 do 1.63 THz. Realizovani uređaj se pokazao kao jednostavan za rukovanje i pogodan za praktičnu primjenu kao terahercni oscilator realizovan na bazi IJJ spojeva.

Za realizovane uređaje dostavljene su karakteristike uzoraka, njihove strujno-naponske i karakteristike frekvencije zračenja, procjene snage zračenja, detaljna analiza karakteristika zračenja na I - V strukturi sa višestrukim grananjem, i prikazi oblika zračenja.

Za potrebe demonstracije svojstva prezentovanog tipa uređaja, prikazane su karakteristike zračenja i slike objekta dobijene iz razvijenih reflektivnih i transmisionih uređaja. Realizovani transmisioni (konkretno CT) i refleksioni tipovi sistema za snimanje mogu, respektivno, pružiti informacije o unutrašnjim i površinskim strukturama uzorka.

Različite karakteristike dobijene iz ta dva sistema omogućavaju identifikaciju materijala sa visokim refleksionim i apsorpcionim svojstvima unutar blago pokrivenih uzorka. Tehnika snimanja pomoću terahercne talasne kompjuterizovane tomografije (THz-CT) može takođe prikazati poprečne presjeke unutrašnje strukture uzorka. Efikasnim kombinovanjem ovih tehnika, moguće je dobiti jedinstvene slike korisne za praktične primjene, zasnovane na karakterističnim osobinama THz talasa.

Prezentovani rezultati pomažu u prevazilaženju terahercnog jaza i omogućavaju iskorišćavanje snažnog potencijala i korisnih karakteristika terahercnog zračenja u spektroskopiji, snimanju (prenos, refleksija, kompjuterska tomografija) i slično.

Literatura

- [1] B. Ferguson and X. C. Zhang, "Materials for terahertz science and technology", *Nat. Mater.* 1, 26 (2002).
- [2] M. Tonouchi, "Cutting-edge terahertz technology", *Nat. Photonics* 1, 97 (2007).
- [3] Y. Koyama, R. Sekiguchi and T. Ouchi, "Oscillations up to 1.40 THz from resonant-tunneling-diode-based oscillators with integrated patch antennas", *Appl. Phys. Express* 6, 064102 (2013).
- [4] H. Kanaya, R. Sogabe, T. Maekawa, S. Suzuki and M. Asada, "Fundamental oscillation up to 1.42 THz in resonant tunneling diodes by optimized collector spacer thickness", *J. Infrared Milli. Terahz. Waves* 35, 425 (2014).
- [5] C. Walther, M. Fischer, G. Scalari, R. Terazzi, N. Hoyler and J. Faist, "Quantum cascade lasers operating from 1.2 to 1.6 THz", *Appl. Phys. Lett.* 91, 131122 (2007).
- [6] S. Fatholouloumi, E. Dupont, C.W. I. Chan, Z. R. Wasilewski, S. R. Laframboise, D. Ban, A. Mátyás, C. Jirauschek, Q. Hu and H. C. Liu, "Terahertz quantum cascade lasers operating up to 200 K with optimized oscillator strength and improved injection tunneling", *Opt. Express* 20, 3866 (2012).
- [7] J. Kiessling, I. Breunig, P. G. Schunemann, K. Buse and K. Vodopyanov, "High power and spectral purity continuouswave photonic THz source tunable from 1 to 4.5 THz for nonlinear molecular spectroscopy", *New J. Phys.* 15, 105014 (2013).
- [8] L. Ozyuzer, A. E. Koshelev, C. Kurter, N. Gopalsami, Q. Li, M. Tachiki, K. Kadowaki, T. Yamamoto, H. Minami, H. Yamaguchi, T. Tachiki, K. E. Gray, W.-K. Kwok and U. Welp, "Emission of coherent THz radiation from superconductors", *Science* 318, 1291 (2007).
- [9] R. Kleiner, F. Steinmeyer, G. Kunkel and P. Müller, "Intrinsic Josephson Effects in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ Single Crystals", *Phys. Rev. Lett.* 68, 2394 (1992).
- [10] R. Kleiner and P. Müller, "Intrinsic Josephson effects in high-Tc superconductors", *Phys. Rev. B* 49, 1327 (1994).
- [11] A. A. Yurgens, "Intrinsic Josephson junctions: Recent developments", *Supercond. Sci. Technol.* 13, R85 (2000).

-
- [12] B. D. Josephson, "Possible new effects in superconductive tunnelling", *Phys. Lett.* 1, 251 (1962).
- [13] P. Barbara, A. B. Cawthorne, S. V. Shitov and C. J. Lobb, "Stimulated Emission and Amplification in Josephson Junction Arrays", *Phys. Rev. Lett.* 82, 1963 (1999).
- [14] B. Vasilić, S. V. Shitov, C. J. Lobb and P. Barbara, "Josephson junction arrays as high-efficiency sources of coherent millimeter-wave radiation", *Appl. Phys. Lett.* 78, 1137 (2001).
- [15] D. N. Langenberg, D. J. Scalapino, B. N. Taylor and R. E. Eck, "Investigation of Microwave Radiation Emitted by Josephson Junctions", *Phys. Rev. Lett.* 15, 294 (1965).
- [16] T. F. Finnegan and S. Wahisten, "Observation of coherent microwave radiation emitted by coupled Josephson junctions", *Appl. Phys. Lett.* 21, 541 (1972).
- [17] C. Varmazis, R. D. Sandell, A. K. Jain and J. E. Lukens, "Generation of coherent tunable Josephson radiation at microwave frequencies with narrowed linewidth", *Appl. Phys. Lett.* 33, 357 (1978).
- [18] R. A. Klemm, "Pristine and intercalated transition metal dichalcogenide superconductors", *Physica (Amsterdam)* 514C, 86 (2015).
- [19] I. Guillamón, H. Suderow, F. Guinea and S. Vieira, "Intrinsic atomic-scale modulations of the superconducting gap of 2H-NbSe₂", *Phys. Rev. B* 77, 134505 (2008).
- [20] V. Ambegaokar and A. Baratoff, "Tunneling between Superconductors", *Phys. Rev. Lett.* 10, 486 (1963).
- [21] V. Ambegaokar and A. Baratoff, "Tunneling between Superconductors", *Phys. Rev. Lett.* 11, 104 (1963).
- [22] O. Naaman, R. C. Dynes and E. Bucher, "Josephson effect in Pb/I=NbSe₂ scanning tunneling microscope junctions", *Int. J. Mod. Phys. B* 17, 3569 (2003).
- [23] T. Kashiwagi, T. Yamamoto, T. Kitamura, K. Asanuma, C. Watanabe, K. Nakade, T. Yasui, Y. Saiwai, Y. Shibano, H. Kubo, K. Sakamoto, T. Katsuragawa, M. Tsujimoto, K. Delfanazari, R. Yoshizaki, H. Minami, R. A. Klemm and K. Kadowaki, "Generation of electromagnetic waves from 0.3 to 1.6 terahertz with a high-T_c superconducting Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+δ} intrinsic Josephson junction emitter", *Appl. Phys. Lett.* 106, 092601 (2015).
-

- [24] T. Kashiwagi, K. Sakamoto, H. Kubo, Y. Shibano, T. Enomoto, T. Kitamura, K. Asanuma, T. Yasui, C. Watanabe, K. Nakade, Y. Saiwai, T. Katsuragawa, M. Tsujimoto, R. Yoshizaki, T. Yamamoto, H. Minami, R. A. Klemm and K. Kadowaki, "A high-Tc intrinsic Josephson junction emitter tunable from 0.5 to 2.4 terahertz", *Appl. Phys. Lett.* 107, 082601 (2015).
- [25] Q. Li, Y. N. Tsay, M. Suenaga, R. A. Klemm, G. D. Gu and N. Koshizuka, " $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ Bicrystal c-Axis Twist Josephson Junctions: A New Phase-Sensitive Test of Order Parameter Symmetry", *Phys. Rev. Lett.* 83, 4160 (1999).
- [26] R. A. Klemm, "The phase-sensitive c-axis twist experiments on $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ and their implications", *Phil. Mag.* 85, 801 (2005).
- [27] D. Winkler and T. Claeson, "High-frequency limits of superconducting tunnel junction mixers", *J. Appl. Phys.* 62, 4482 (1987).
- [28] P. Febvre, M. Salez, W. R. McGrath, B. Bumble and H. G. LeDuc, "Performance limitations of niobium-based submillimeter-wave quasiparticle mixers operating near the gap frequency", *Appl. Phys. Lett.* 67, 424 (1995).
- [29] K. Kadowaki, H. Yamaguchi, K. Kawamata, T. Yamamoto, H. Minami, I. Kakeya, U. Welp, L. Ozyuzer, A. E. Koshelev, C. Kurter, K. E. Gray and W.-K. Kwok, "Direct observation of terahertz electromagnetic waves emitted from intrinsic Josephson junctions in single crystalline $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ ", *Physica (Amsterdam)* 468C, 634 (2008).
- [30] K. Kadowaki, M. Tsujimoto, K. Yamaki, T. Yamamoto, T. Kashiwagi, H. Minami, M. Tachiki and R. A. Klemm, "Evidence for a dual-source mechanism of terahertz radiation from rectangular mesas of single crystalline $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ intrinsic Josephson junctions", *J. Phys. Soc. Jpn.* 79, 023703 (2010).
- [31] T. M. Benseman, A. E. Koshelev, W.-K. Kwok, U. Welp, V. K. Vlasko-Vlasov, K. Kadowaki, H. Minami and C. Watanabe, "Direct imaging of hot spots in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ mesa terahertz sources", *J. Appl. Phys.* 113, 133902 (2013).
- [32] C. Watanabe, H. Minami, T. Kitamura, K. Asanuma, K. Nakade, T. Yasui, Y. Saiwai, Y. Shibano, T. Yamamoto, T. Kashiwagi, Richard A. Klemm and K. Kadowaki, "Influence of the local heating position on the terahertz emission power from high-Tc superconducting $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ mesas", *Appl. Phys. Lett.* 106, 042603 (2015).

-
- [33] H. Minami, M. Tsujimoto, T. Kashiwagi, T. Yamamoto and K. Kadowaki, "Terahertz radiation emitted from intrinsic Josephson junctions in high-Tc superconductor $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ ", *IEICE Trans. E95-C*, 347 (2012).
- [34] T. Kashiwagi, K. Yamaki, M. Tsujimoto, K. Deguchi, N. Orita, T. Koike, R. Nakayama, H. Minami, T. Yamamoto, R. A. Klemm, M. Tachiki and K. Kadowaki, "Geometrical full-wavelength resonance mode generating terahertz waves from a single-crystalline $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ rectangular mesa", *J. Phys. Soc. Jpn.* 80, 094709 (2011).
- [35] K. Delfanazari, H. Asai, M. Tsujimoto, T. Kashiwagi, T. Kitamura, T. Yamamoto, M. Sawamura, K. Ishida, C. Watanabe, S. Sekimoto, H. Minami, M. Tachiki, R. A. Klemm, T. Hattori and K. Kadowaki, "Tunable terahertz emission from the intrinsic Josephson junctions in acute isosceles triangular $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ mesas", *Opt. Express* 21, 2171 (2013).
- [36] H. Minami, I. Kakeya, H. Yamaguchi, T. Yamamoto and K. Kadowaki, "Characteristics of terahertz radiation emitted from the intrinsic Josephson junctions in high-Tc superconductor $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ ", *Appl. Phys. Lett.* 95, 232511 (2009).
- [37] M. Tsujimoto, K. Yamaki, K. Deguchi, T. Yamamoto, T. Kashiwagi, H. Minami, M. Tachiki, K. Kadowaki and R. A. Klemm, "Geometrical Resonance Conditions for THz Radiation from the Intrinsic Josephson Junctions in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ ", *Phys. Rev. Lett.* 105, 037005 (2010).
- [38] K. Yamaki, M. Tsujimoto, T. Yamamoto, A. Furukawa, T. Kashiwagi, H. Minami and K. Kadowaki, "High-power terahertz electromagnetic wave emission from high-Tc superconducting $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ mesa structures", *Opt. Express* 19, 3193 (2011).
- [39] H. B. Wang, S. Guénon, J. Yuan, A. Iishi, S. Arisawa, T. Hatano, T. Yamashita, D. Koelle and R. Kleiner, "Hot Spots and Waves in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ Intrinsic Josephson Junction Stacks: A Study by Low Temperature Scanning Laser Microscopy", *Phys. Rev. Lett.* 102, 017006 (2009).
- [40] H. B. Wang, S. Guénon, B. Gross, J. Yuan, Z. G. Jiang, Y. Y. Zhong, M. Grünzweig, A. Iishi, P. H. Wu, T. Hatano, D. Koelle and R. Kleiner, "Coherent Terahertz Emission of Intrinsic Josephson Junction Stacks in the Hot Spot Regime", *Phys. Rev. Lett.* 105, 057002 (2010).
-

- [41] S. Guénon, M. Grünzweig, B. Gross, J. Yuan, Z. G. Jiang, Y. Y. Zhong, M. Y. Li, A. Iishi, P. H. Wu, T. Hatano, R. G. Mints, E. Goldobin, D. Koelle, H. B. Wang and R. Kleiner, "Interaction of hot spots and terahertz waves in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ intrinsic Josephson junction stacks of various geometry", *Phys. Rev. B* 82, 214506 (2010).
- [42] T. M. Benseman, A. E. Koshelev, K. E. Gray, W.-K. Kwok, U. Welp, K. Kadowaki, M. Tachiki and T. Yamamoto, "Tunable terahertz emission from $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ mesa devices", *Phys. Rev. B* 84, 064523 (2011).
- [43] M. Tsujimoto, T. Yamamoto, K. Delfanazari, R. Nakayama, T. Kitamura, M. Sawamura, T. Kashiwagi, H. Minami, M. Tachiki, K. Kadowaki and R. A. Klemm, "Broadly Tunable Subterahertz Emission from Internal Branches of the Current-Voltage Characteristics of Superconducting $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ Single Crystals", *Phys. Rev. Lett.* 108, 107006 (2012).
- [44] T. Kashiwagi, M. Tsujimoto, T. Yamamoto, H. Minami, K. Yamaki, K. Delfanazari, K. Deguchi, N. Orita, T. Koike, R. Nakayama, T. Kitamura, M. Sawamura, S. Hagino, K. Ishida, K. Ivanovic, H. Asai, M. Tachiki, R. A. Klemm and K. Kadowaki, "High temperature superconductor terahertz emitters: Fundamental physics and its applications", *Jpn. J. Appl. Phys.* 51, 010113 (2012).
- [45] M. Li, J. Yuan, N. Kinev, J. Li, B. Gross, S. Guenon, A. Ishii, K. Hirata, T. Hatano, D. Koelle, R. Kleiner, V. P. Koshelets, H. Wang and P. Wu, "Linewidth dependence of coherent terahertz emission from $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ intrinsic Josephson junction stacks in the hot-spot regime", *Phys. Rev. B* 86, 060505 (2012).
- [46] I. Takeya, Y. Omukai, T. Yamamoto, K. Kadowaki and M. Suzuki, "Effect of thermal inhomogeneity for terahertz radiation from intrinsic Josephson junction stacks of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ ", *Appl. Phys. Lett.* 100, 242603 (2012).
- [47] F. Turkoglu, H. Koseoglu, Y. Demirhan, L. Ozyuzer, S. Preu, S. Malzer, Y. Simsek, P. Müller, T. Yamamoto and K. Kadowaki, "Interferometer measurements of terahertz waves from $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ mesas", *Supercond. Sci. Technol.* 25, 125004 (2012).
- [48] T. M. Benseman, K. E. Gray, A. E. Koshelev, W.-K. Kwok, U. Welp, H. Minami, K. Kadowaki and T. Yamamoto, "Powerful terahertz emission from $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ mesa arrays", *Appl. Phys. Lett.* 103, 022602 (2013).

- [49] S. Sekimoto, C. Watanabe, H. Minami, T. Yamamoto, T. Kashiwagi, R. A. Klemm and K. Kadowaki, "Continuous 30 μ W terahertz source by a high-Tc superconductor mesa structure", *Appl. Phys. Lett.* 103, 182601 (2013).
- [50] K. Kadowaki, M. Tsujimoto, K. Delfanazari, T. Kitamura, M. Sawamura, H. Asai, T. Yamamoto, K. Ishida, C. Watanabe, S. Sekimoto, K. Nakade, T. Yasui, K. Asanuma, T. Kashiwagi, H. Minami, M. Tachiki, T. Hattori and R. A. Klemm, "Quantum terahertz electronics (QTE) using coherent radiation from high temperature superconducting $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ intrinsic Josephson junctions", *Physica (Amsterdam)* 491C, 2 (2013).
- [51] T. Kitamura, T. Kashiwagi, T. Yamamoto, M. Tsujimoto, C. Watanabe, K. Ishida, S. Sekimoto, K. Asanuma, T. Yasui, K. Nakade, Y. Shibano, Y. Saiwai, H. Minami, R. A. Klemm and K. Kadowaki, "Broadly tunable, high-power terahertz radiation up to 73 K from a stand-alone $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ mesa", *Appl. Phys. Lett.* 105, 202603 (2014).
- [52] M. Ji et al., " $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ intrinsic Josephson junction stacks with improved cooling: Coherent emission above 1 THz", *Appl. Phys. Lett.* 105, 122602 (2014).
- [53] H. Minami, C. Watanabe, K. Sato, S. Sekimoto, T. Yamamoto, T. Kashiwagi, R. A. Klemm and K. Kadowaki, "Local sic photoluminescence evidence of hot spot formation and sub-THz coherent emission from a rectangular $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ mesa", *Phys. Rev. B* 89, 054503 (2014).
- [54] C. Watanabe, H. Minami, S. Sekimoto, T. Yamamoto, T. Kashiwagi, R. A. Klemm and K. Kadowaki, "Spectral investigation of hot spot and cavity resonance effects on the terahertz radiation from high-Tc superconducting $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ mesas", *J. Phys. Condens. Matter* 26, 172201 (2014).
- [55] M. Tsujimoto, H. Kambara, Y. Maeda, Y. Yoshioka, Y. Nakagawa and I. Kakeya, "Dynamic Control of Temperature Distributions in Stacks of Intrinsic Josephson Junctions in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ for Intense Terahertz Radiation", *Phys. Rev. Applied* 2, 044016 (2014).
- [56] S. Niratisairak, Ø. Haugen, T. H. Johansen and T. Ishibashi, "Observation of hotspot in BSCCO thin film structure by fluorescent thermal imaging", *Physica (Amsterdam)* 468C, 442 (2008).

- [57] M. Tsujimoto, H. Minami, K. Delfanazari, M. Sawamura, R. Nakayama, T. Kitamura, T. Yamamoto, T. Kashiwagi, T. Hattori and K. Kadowaki, "Terahertz imaging system using high-Tc superconducting oscillation devices", *J. Appl. Phys.* 111, 123111 (2012).
- [58] T. Kashiwagi, K. Nakade, B. Markovic, Y. Saiwai, H. Minami, T. Kitamura, C. Watanabe, K. Ishida, S. Sekimoto, K. Asanuma, T. Yasui, Y. Shibano, M. Tsujimoto, T. Yamamoto, J. Mirković and K. Kadowaki, "Reflection type of terahertz imaging system using a high-Tc superconducting oscillator", *Appl. Phys. Lett.* 104, 022601 (2014).
- [59] T. Kashiwagi, K. Nakade, Y. Saiwai, H. Minami, T. Kitamura, C. Watanabe, K. Ishida, S. Sekimoto, K. Asanuma, T. Yasui, Y. Shibano, M. Tsujimoto, T. Yamamoto, B. Marković, J. Mirković, R. A. Klemm and K. Kadowaki, "Computed tomography image using sub-terahertz waves generated from a high-Tc superconducting intrinsic Josephson junction oscillator", *Appl. Phys. Lett.* 104, 082603 (2014).
- [60] H. Koseoglu, F. Turkoglu, Y. Simsek and L. Ozyuzer, "The fabrication of THz emitting mesas by reactive ion-beam etching of superconducting Bi2212 with multilayer masks", *J. Supercond. Novel Magn.* 24, 1083 (2011).
- [61] D. Y. An et al., "Terahertz emission and detection both based on high-Tc superconductors: Towards an integrated receiver", *Appl. Phys. Lett.* 102, 092601 (2013). [62] J. Yuan, M. Y. Li, J. Li, B. Gross, A. Ishii, K. Yamaura, T. Hatano, K. Hirata, E. Takayama-Muromachi, P. H. Wu, D. Koelle, R. Kleiner and H. B. Wang, "Terahertz emission from Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+δ} intrinsic Josephson junction stacks with all-superconducting electrodes", *Supercond. Sci. Technol.* 25, 075015 (2012).
- [63] K. Delfanazari, H. Asai, M. Tsujimoto, T. Kashiwagi, T. Kitamura, T. Yamamoto, W. Wilson, R. A. Klemm, T. Hattori and K. Kadowaki, "Effect of bias electrode position on terahertz radiation from pentagonal mesas of superconducting Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+δ}", *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 5, 505 (2015).
- [64] T. M. Benseman, A. E. Koshelev, W.-K. Kwok, U. Welp, K. Kadowaki, J. R. Cooper and G. Balakrishnan, "The ac Josephson relation and inhomogeneous temperature distributions in large Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+δ} mesas for THz emission", *Supercond. Sci. Technol.* 26, 085016 (2013).

-
- [65] S. Sakai, P. Bodin and N. F. Pedersen, "Fluxons in thin-film superconductor/insulator superlattices", *J. Appl. Phys.* 73, 2411 (1993).
- [66] M. Tachiki, T. Koyama and S. Takahashi, "Electromagnetic phenomena related to a low-frequency plasma in cuprate superconductors", *Phys. Rev. B* 50, 7065 (1994).
- [67] T. Koyama and M. Tachiki, "Plasma excitation by vortex flow", *Solid State Commun.* 96, 367 (1995).
- [68] A. V. Ustinov and S. Sakai, "Submillimeter-band high-power generation using multilayered Josephson junctions", *Appl. Phys. Lett.* 73, 686 (1998).
- [69] M. Machida, T. Koyama, A. Tanaka and M. Tachiki, "Collective dynamics of Josephson vortices in intrinsic Josephson junctions: Exploration of in-phase locked superradiant vortex flow states", *Physica (Amsterdam)* 330C, 85 (2000).
- [70] M. Tachiki, M. Iizuka, K. Minami, S. Tejima and H. Nakamura, "Emission of continuous coherent terahertz waves with tunable frequency by intrinsic Josephson junctions", *Phys. Rev. B* 71, 134515 (2005).
- [71] H. Matsumoto, "Electromagnetic properties in the multi-Josephson junction model with a Josephson vortex lattice", *Physica (Amsterdam)* 437C–438C, 199 (2006).
- [72] M. Tachiki, K. Ivanovic, K. Kadowaki and T. Koyama, "Emission of terahertz electromagnetic waves from intrinsic Josephson junction arrays embedded in resonance LCR circuits", *Phys. Rev. B* 83, 014508 (2011). [73] L. N. Bulaevskii and A. E. Koshelev, "Radiation Due to Josephson Oscillations in Layered Superconductors", *Phys. Rev. Lett.* 99, 057002 (2007).
- [74] S. Lin and X. Hu, "Possible Dynamic States in Inductively Coupled Intrinsic Josephson Junctions of Layered High-Tc Superconductors", *Phys. Rev. Lett.* 100, 247006 (2008).
- [75] X. Hu and S. Lin, "Three-dimensional phase-kink state in a thick stack of Josephson junctions and terahertz radiation", *Phys. Rev. B* 78, 134510 (2008).
- [76] A. E. Koshelev and L. N. Bulaevskii, "Resonant electromagnetic emission from intrinsic Josephson-junction stacks with laterally modulated Josephson critical current", *Phys. Rev. B* 77, 014530 (2008).
-

-
- [77] A. E. Koshelev, "Alternating dynamic state self-generated by internal resonance in stacks of intrinsic Josephson junctions", *Phys. Rev. B* 78, 174509 (2008).
- [78] M. Tachiki, S. Fukuya and T. Koyama, "Mechanism of Terahertz Electromagnetic Wave Emission from Intrinsic Josephson Junctions", *Phys. Rev. Lett.* 102, 127002 (2009).
- [79] M. Machida, Y. Ota, N. Sasa, T. Koyama and H. Matsumoto, "Theory and simulation of electromagnetic wave emission from intrinsic Josephson junctions", *J. Phys. Conf. Ser.* 248, 012037 (2010).
- [80] A. E. Koshelev, "Stability of dynamic coherent states in intrinsic Josephson-junction stacks near internal cavity resonance", *Phys. Rev. B* 82, 174512 (2010).
- [81] R. A. Klemm and K. Kadowaki, "Angular dependence of the radiation power of a Josephson STAR-emitter", *J. Supercond. Novel Magn.* 23, 613 (2010).
- [82] R. A. Klemm and K. Kadowaki, "Output from a Josephson stimulated terahertz amplified radiation emitter", *J. Phys. Condens. Matter* 22, 375701 (2010).
- [83] V. M. Krasnov, "Terahertz electromagnetic radiation from intrinsic Josephson junctions at zero magnetic field via breather-type self-oscillations", *Phys. Rev. B* 83, 174517 (2011).
- [84] A. A. Yurgens, "Temperature distribution in a large $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ mesa", *Phys. Rev. B* 83, 184501 (2011).
- [85] B. Gross, S. Guénon, J. Yuan, M. Y. Li, J. Li, A. Ishii, R. G. Mints, T. Hatano, P. H. Wu, D. Koelle, H. B. Wang and R. Kleiner, "Hot-spot formation in stacks of intrinsic Josephson junctions in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ ", *Phys. Rev. B* 86, 094524 (2012).
- [86] H. Asai, M. Tachiki and K. Kadowaki, "Three-dimensional numerical analysis of terahertz radiation emitted from intrinsic Josephson junctions with hot spots", *Phys. Rev. B* 85, 064521 (2012).
- [87] S. Z. Lin and X. Hu, "In-plane dissipation as a possible synchronization mechanism for terahertz radiation from intrinsic Josephson junctions of layered superconductors", *Phys. Rev. B* 86, 054506 (2012).
- [88] H. Asai and S. Kawabata, "Intense terahertz emission from intrinsic Josephson junctions by external heat control", *Appl. Phys. Lett.* 104, 112601 (2014).

- [89] R. A. Klemm, E. R. LaBerge, D. R. Morley, T. Kashiwagi, M. Tsujimoto and K. Kadowaki, "Cavity mode waves during terahertz radiation from rectangular $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ mesas", *J. Phys. Condens. Matter* 23, 025701 (2011).
- [90] U. Welp, K. Kadowaki and R. Kleiner, "Superconducting emitters of THz radiation", *Nat. Photonics* 7, 702 (2013).
- [91] T. Mochiku and K. Kadowaki, "Growth and properties of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2(\text{Ca},\text{Y})\text{Cu}_2\text{O}_{8+\delta}$ single crystals", *Physica (Amsterdam)* 235–240C, 523 (1994).
- [92] T. Mochiku, K. Hirata and K. Kadowaki, "Crystallinity improvement of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ single crystal by TSFZ method", *Physica (Amsterdam)* 282–287C, 475 (1997).
- [93] T. Kashiwagi, T. Yamamoto, H. Minami, M. Tsujimoto, R. Yoshizaki, K. Delfanazari, T. Kitamura, C. Watanabe, K. Nakade, T. Yasui, K. Asanuma, Y. Saiwai, Y. Shibano, T. Enomoto, H. Kubo, K. Sakamoto, T. Katsuragawa, B. Marković, J. Mirković, R. A. Klemm and K. Kadowaki, "Efficient Fabrication of Intrinsic-Josephson-Junction Terahertz Oscillators with Greatly Reduced Self-Heating Effects", *Physical Review Applied* 4, 054018 (2015)
- [94] B. B. Hu and M. C. Nuss, "Imaging with terahertz waves," *Optics Letters* 20, 1716 (1995).
- [95] W. L. Chan, J. Deibel and D. M. Mittleman, "Imaging with terahertz radiation," *Reports on Progress in Physics* 70, 1325 (2007).
- [96] K. Kawase, Y. Ogawa and Y. Watanabe, "Non-destructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints," *Optics Express* 11, 2549 (2003).
- [97] T. Löffler, T. May, C. A. Weg, A. Alcin, B. Hils and G. Roskos, "All-optoelectronic continuous-wave terahertz imaging for biomedical applications," *Applied Physics Letters* 90, 091111 (2007).
- [98] A. C. Kak and M. Slaney, "Principles of Computerized Tomographic Imaging", *IEEE Press*, (1988)
- [99] K. Yamaki, M. Tsujimoto, T. Yamamoto, H. Minami and K. Kadowaki, "Magnetic field effects on THz radiation from rectangular shape $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ IJJ's", *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 470(S1), S804-S805 (2010)

-
- [100] J. Mirkovic, I. Kakeya, S. Savel'ev, T. Kashiwagi, B. Markovic and K. Kadowaki, "Tilted vortex lattice in irradiate $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ single crystals", *Journal of Physics: Conference Series*, 667, 012007 (2016)
- [101] A. Buzdin and D. Feinberg, "Critical Behavior of the Superconducting Transition Temperature of Superconductor-Ferromagnet Multilayers" *J. Phys. (Paris)* 51, 1971 (1990)
- [102] L. Bulaevskii i J. R. Clem, "Magnetic Susceptibility of Thin Superconducting Wires: A Model for Granular High-Tc Superconductors", *Physical Review B*, 44, 10234. (1991)
- [103] A. E. Koshelev, "Crossing Lattice of Vortices in Layered Superconductors", *Physical Review Letters*, 83, 187 (1999)
- [104] S. E. Savel'ev, J. Mirkovic and K. Kadowaki, "Dynamic Phases of Josephson Vortices in Layered Superconductors with Varying Interlayer Coupling", *Physical Review B*, 64, 094521 (2001)
- [105] S. E. Savel'ev, J. Mirkovic and K. Kadowaki, "Dynamic Phases of Josephson Vortices in Layered Superconductors with Modulated Interlayer Coupling", *Physica C*, 357–360, 597 (2001)
- [106] S. E. Savel'ev, J. Mirkovic and K. Kadowaki, "Dynamic Phase Diagram of Josephson Vortices in Layered Superconductors with Modulated Interlayer Coupling", *Physica C*, 378–381, 580 (2002)
- [107] S. Savel'ev, J. Mirkovic and F. Nori, "Flux-flow properties of Josephson vortices in layered superconductors with modulated interlayer coupling", *Physica C*, 388, 653 (2003)
- [108] Tonomura A et al, "Direct Observation of Dynamic Vortex Phenomena in Superconductors Using a Four-Dimensional Electron Microscope", *Phys. Rev. Lett.* 88 237001 (2002)
- [109] T. Matsuda et al, "Direct Observation of Vortex Dynamics in Superconductors with a Scanning Tunneling Microscope", *Science*, 294, 2136 (2001)
- [110] A. Grigorenko, S. Bending, T. Tamegai, S. Ooi, M. Henini, "Direct Imaging of Symmetry and Fluctuation Effects in the Vortex Lattice of Superconductors", *Nature* 414, 728 (2001)
- [111] K. Vlasko-Vlasov, A. Koshelev, U. Welp, G. W. Crabtree, K. Kadowaki, "Intrinsic Pinning and Lock-in Transition for Vortices in Layered Superconductors", *Phys. Rev. B* 66, 014523 (2002)
-

-
- [112] D. Cole, S. Bending, S. Savel'ev, A. Grigorenko, T. Tamegai and F. Nori, "Ratchet Without Spatial Asymmetry: Controlling the Motion of Magnetic Flux Quanta", *Nature Materials* 5, 305 (2006)
- [113] S. Savel'ev and F. Nori, "Experimentally Realizable Devices for Controlling the Motion of Magnetic Flux Quanta", *Nature Materials* 1, 179 (2002)
- [114] S. Savel'ev, F. Marchesoni and F. Nori, "Stochastic Transport of Magnetic Flux Quanta in Superconductors", *Phys. Rev. Lett.* 92, 160602 (2004)
- [115] S. Savel'ev, F. Marchesoni and F. Nori, "Controlling Transport of Magnetic Flux Quanta in Josephson Junction Arrays", *Phys. Rev. Lett.* 91, 010601 (2003)
- [116] S. Savel'ev, F. Marchesoni and F. Nori, "Brownian Ratchets: Versatile Tools for Theoretical and Experimental Studies of Nonequilibrium Phenomena", *Phys. Rev. E* 70, 061107 (2004)
- [117] S. Savel'ev, F. Marchesoni and F. Nori, "Resonant Activation and Noise-Induced Effects in Brownian Ratchets", *Phys. Rev. E* 71, 011107 (2005)
- [118] S. Savel'ev, F. Marchesoni, P. Hänggi and F. Nori, "Transport via Nonlinear Dynamic Systems: Anomalous Diffusion and Ratchets", *Eur. Phys. J. B* 40, 403 (2004)
- [119] J. Mirkovic, S. E. Savel'ev, E. Sugahara and K. Kadowaki, "Crossover Between Josephson-Coupled and Magnetic-Field-Coupled Vortex Phases in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ ", *Phys. Rev. Lett.* 86, 886 (2001)
- [120] J. Mirkovic, S. E. Savel'ev, E. Sugahara and K. Kadowaki, "Observation of Vortex Matching Effects in Layered High-Tc Superconductors", *Phys. Rev. B* 66, 132505 (2002)
- [121] T. Mochiku and K. Kadowaki, "Growth and Properties of Single Crystals of High-Tc Superconductors", *Trans. Mat. Res. Soc. Jpn.* 19A, 349 (1994)
- [122] J. Mirkovic, S. E. Savel'ev, E. Sugahara and K. Kadowaki, "Vortex Phase Diagram in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ Crystals", *Physica C* 341, 1181 (2000)
- [123] J. Mirkovic, S. E. Savel'ev, E. Sugahara and K. Kadowaki, "Vortex State Phase Transitions in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ Crystals", *Physica C* 357, 450 (2001)
- [124] J. Mirkovic, S. E. Savel'ev, E. Sugahara and K. Kadowaki, "Vortex Dynamics and Phase Transitions in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ Crystals", *Physica C* 364, 515 (2001)
-

-
- [125] K. Kadowaki, J. Mirkovic, S. E. Savel'ev, E. Sugahara, "Phase Diagram of the Vortex State in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ Crystals", *Physica C* 341, 1301 (2000)
- [126] M. Tokunaga, M. Kishi, N. Kameda, K. Itaka and T. Tamegai, "Magnetic Phase Diagram of Layered High-Tc Superconductor in Parallel Fields", *Phys. Rev. B* 66, 220501(R) (2002)
- [127] M. Tachiki, M. Iizuka, K. Minami, S. Tejima and H. Nakamura, "Electromagnetic Phenomena Related to a Dynamics of Vortices in Layered Superconductors", *Phys. Rev. B* 71, 134515 (2005)
- [128] S. Savel'ev, V. Yampol'skii, A. Rakhmanov and F. Nori, "Terahertz Josephson Plasma Waves in Layered Superconductors", *Phys. Rev. B* 72, 144515 (2005)
- [129] S. Savel'ev, V. Yampol'skii, A. Rakhmanov and F. Nori, "Terahertz Plasmons and Plasma Oscillations in Layered Superconductors", *Nature Phys.* 2, 521 (2006)
- [130] S. Savel'ev, A. Rakhmanov and F. Nori, "Josephson Vortex Lattices as Tunable Terahertz Oscillators", *Phys. Rev. Lett.* 94, 157004 (2005)
- [131] S. Savel'ev, V. Yampol'skii and F. Nori, "Terahertz Wave Generation and Nonlinear Josephson Plasma Waves in Layered Superconductors", *Phys. Rev. Lett.* 95, 187002 (2006)
- [132] S. Savel'ev, V. Yampol'skii and F. Nori, "Josephson Plasma Waves and Terahertz Wave Emission in Layered Superconductors", *Physica C* 445–448, 183 (2006)
- [133] S. Savel'ev, V. Yampol'skii, A. Rakhmanov and F. Nori, "Hybrid Electromagnetic Phenomena in Superconductors and Metamaterials", *Rep. Prog. Phys.* 73, 026501 (2010)
- [134] X. Hu and S. Z. Lin, "Dynamic Phases of Vortices in Superconductors with Strong Pinning", *Supercond. Sci. Technol.* 23, 053001 (2010)
- [135] F. Marchesoni, S. Savel'ev, M. Tachiki and F. Nori, "Vortex Dynamics and Ratchet Effects in Layered Superconductors", *Phys. Rev. B* 81, 174531 (2010)
- [136] L. Ozyuzer, A. E. Koshelev, C. Kurter, N. Gopalsami, Q. Li, M. Tachiki, K. Kadowaki, T. Yamamoto, H. Minami, H. Yamaguchi, T. Tachiki, K. E. Gray, W. K. Kwok and U. Welp, "Emission of Coherent THz Radiation from Superconductors", *Science* 318, 1291 (2007)
- [137] H. Minami, I. Kakeya, H. Yamaguchi, T. Yamamoto and K. Kadowaki, "Terahertz Emission from Intrinsic Josephson Junctions in High-Tc Superconductors", *Appl. Phys. Lett.* 95, 232511 (2009)
-

- [138] M. Tsujimoto, K. Yamaki, K. Deguchi, T. Yamamoto, T. Kashiwagi, H. Minami, M. Tachiki, K. Kadowaki and R. A. Klemm, "Broadly Tunable Terahertz Emission from Intrinsic Josephson Junctions in Single Crystalline $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ ", *Phys. Rev. Lett.* 105, 037005 (2010)

Marković-ETF

ORIGINALITY REPORT

2%

SIMILARITY INDEX

MATCHED SOURCE

2 fedora.ucg.ac.me Internet	91 words — 1%
★fedora.ucg.ac.me Internet	1%

EXCLUDE QUOTES ON
EXCLUDE BIBLIOGRAPHY ON

EXCLUDE SOURCES OFF
EXCLUDE MATCHES < 10 WORDS