

Superprovodni metamaterijali

Studentski rad

Ivana Ivković

Student drugog ciklusa studija
Filozofski fakultet Univerziteta u Istočnom Sarajevu
Pale, Bosna i Hercegovina
ivanaivkovic15@gmail.com

Sažetak - U ovom radu je dat pregled osobina superprovodnih metamaterijala – vještačkih supstanci građenih od periodično raspoređenih vještačkih „atoma“: superprovodnih kubit. Glavna prednost ovih supstanci se ogleda u ultra niskim gubicima što je više nego poželjna odlika. Kubit (qubit) ili kvantni bit je bilo koji kvantno-mehanički sistem sa dva stanja i predstavlja osnovnu jedinicu kvantne informacije. Ovi materijali se odlikuju nizom potpuno novih optičkih osobina koje omogućavaju kontrolu prostiranja svjetlosti. Posebno je značajna mogućnost usporavanja svjetlosti, što je jedan od preduslova za konstrukciju uređaja za kvantne memorije.

Ključne riječi - metamaterijali; kubit, rf SQUID; Džozefsonov spoj; rezonantna frekvencija

I. UVOD

Istorijski gledano, koncept metamaterijala datira iz 1967. godine kada je V. Veselago [1]: teorijski predvidio postojanje materijala koji istovremeno imaju negativnu *permitivnost* i *permeabilnost*, što rezultira negativnim indeksom prelamanja medijuma koji bi skretao svjetlost na “pogrešan” način. Realizacija ovakvih materijala morala je da sačeka do kraja vijeka kada su D. Smit i njegovi saradnici [2] po prvi put predstavili strukturu koja pokazuje negativnu refrakciju u mikrotalasima. Prvi metamaterijal je napravljen od dva međusobno prožimajuća podsistema od kojih jedan obezbjeđuje negativnu permitivnost a drugi negativnu permeabilnost unutar istog uskofrekventnog opsega. Zapravo, pomenuti podsistemi su nizovi tankih metalnih žica i metalnih prstenova sa prorezom (*split-ring resonators*-SRR) koji su konstruisani na osnovu radova J. B. Pendri-a [3]. Žice i podijeljeni prstenovi djeluju kao električno male rezonantne “čestice” preuzimajući ulogu atoma u prirodnim materijalima; međutim oni su napravljeni od konvencionalnih materijala (metali visoke provodljivosti). Možemo reći da je upravo SRR bio ključni element za konstrukciju metamaterijala. SRR kao i njegove kasnije verzije mogu se smatrati rezonantnim česticama koje se efektivno ponašaju kao vještački “magnetni atomi”. Takođe SRR-i se mogu opisati kao induktivno-otporno-kapacitivni oscilatori (RLC) sa samoinduktivnošću L , kapacitivnošću C i otporom R , u elektromagnetnom polju čija je talasna dužina mnogo veća od njihove karakteristične dimenzije. Sve dok je metamaterijal koji sadrži SRR u pitanju, talasna dužina elektromagnetnog polja mora biti mnogo veća

od veličine njegove jedinične ćelije jer u tom slučaju polje zaista “vidi” strukturu kao homogeni medijum na makroskopskoj skali i makroskopski koncepti permitivnosti i permeabilnosti postaju smisleni. U relativno gustim metamaterijalima baziranim na SRR, efekti povezivanja su od najveće važnosti za temeljno razumijevanje pojedinih aspekata njihovog ponašanja budući da dovode do rezonantnog cijepanja i pomjeranja rezonantne frekvencije. SRR-i su povezani jedan sa drugim preko nelokalnih magnetnih ili električnih dipol-dipol interakcija relativne snage u zavisnosti od relativne orijentacije SRR-a u nizu. Međutim, zbog prirode interakcije, energija spajanja između susjednih SRR-a je mnogo manja od karakterističnih energija metamaterijala pa se u većini slučajeva energija između najbližih susjeda može zanemariti. SRR bazirani metamaterijali podržavaju novu vrstu propagirajućih talasa, tzv. magnetoinduktivne talase, koji su karakteristični za metamaterijale gdje je magnetna interakcija između njihovih jedinica dominantna. Oni pokazuju krive disperzije slične fononima i mogu da prenose energiju a eksperimentalno su izraženi i u linearnom i u nelinearnom metamaterijalu baziranom na SRR-u. Nažalost, SRR bazirani metamaterijali imaju velike gubitke, posebno na frekvencijama u blizini njihove rezonancije, što ometa svaki značajan napredak u praktičnoj upotrebi ovih metamaterijala u novijim uređajima.

II. NELINEARNI, SUPERPROVODNI I AKTIVNI METAMATERIJALI

Svojstvo neophodno za praktične primjene je dinamička podesivost; u principu treba postojati mogućnost varijacije efektivnih (makroskopskih) parametara metamaterijala u realnom vremenu, jednostavno, varijacijama primjenjenog polja. Podesivost obezbjeđuje fabrikaciju meta-uređaja sa mogućnošću prebacivanja, između ostalog, a to se može postići uvođenjem nelinearnosti.

Nelinearnost dodaje nove stepene slobode dizajnu metamaterijala koji dozvoljava i podesivost i multistabilnost-drugu željenu osobinu koja može ponuditi potpuno nove funkcionalnosti i elektromagnetne karakteristike kao i širokozonsku negativnu permeabilnost. Već nakon prve demonstracije metamaterijala postalo je jasno da SRR struktura ima značajan potencijal da pojača nelinearne efekte zbog intenzivnih električnih polja koja se mogu generisati u

njihovim prorezima. Prateći ove ideje, grupe naučnika kreirale su nelinearne jedinice metamaterijala, popunjavanjem SRR proreza jako nelinearnim dielektrikom ili fotoosjetljivim poluprovodnikom. Drugi pristupi su koristili poluprovodničke materijale kao podloge na kojima je proizveden pravi metamaterijal. Kasnije je utvrđeno da je najpogodniji metod za uvođenje nelinearnosti u metamaterijale bazirane na SRR-u ubacivanje nelinearnih elektronskih komponenti u SRR proreze (na primjer diode promjenjive kapacitivnosti). Međutim, nelinearnost ne doprinosi smanjenju gubitaka. Smanjenje gubitaka se odvija u dva različita pravca:

- „pasivni“, gdje su metalni elementi zamijenjeni superprovodnim;
- „aktivni“, gdje se metalnim metamaterijalima dodavaju odgovarajući sastojci koji obezbjeđuju pojačanje preko spoljnih izvora energije.

Da bi se proizveli i nelinearni i aktivni metamaterijali moraju se koristiti elektronske komponente koje obezbjeđuju pojačanje kao što su tunelske (Esakijeve) diode ili posebne kombinacije drugih pojačivača. Esakijeva dioda ima negativnu otpornost kao dio svoje strujno-naponske karakteristike i stoga može obezbijediti i pojačanje i nelinearnost u konvencionalnom (metalnom) metamaterijalu. Tunelske diode koje su usmjerene tako da rade u oblasti negativnog otpora svojih karakteristika, takođe se mogu koristiti za konstrukciju *PT*-simetričnih metamaterijala koji se oslanjaju na ravnotežu pojačanja i gubitaka. Umjesto odvojene paritetne i vremenske simetrije, ovi materijali pokazuju kombinovanu *PT* simetriju.

„Pasivni“ pristup redukciji gubitaka dovodi nas do pojma superprovodnih materijala tj. materijala koji pokazuju odsustvo otpora jednosmjernje struje ispod određene temperature koja je poznata kao „kritična temperatura“, T_c . Napravljena je gruba klasifikacija superprovodnih materijala na osnovu njihove kritične temperature, na superprovodne materijale sa visokom i niskom kritičnom temperaturom. Prvi uključuju prvenstveno elementarna i binarna jedinjenja kao što su niobijum (Nb), niobijum-di-selenid ($NbSe_2$) i u posljednje vrijeme niobijum-nitrid (NbN), dok su najpoznatiji predstavnici druge grupe superprovodni minerali kalcijum titanijum oksida kao što je itrijum-barijum-bakar-oksidi (YBCO). Najčešće se koristi superprovodni mineral čija je kritična temperatura oko 90 K, znatno iznad tačke ključanja tečnog azota. Posljednjih nekoliko godina raste interesovanje za *superprovodne metamaterijale* [4] koji koriste nultu otpornost superprovodnika ciljajući na ozbiljno smanjenje gubitaka i pojavu unutrašnjih nelinearnosti zbog ekstremne osjetljivosti superprovodnog stanja na spoljašnje nadražaje. Sofisticiranija realizacija superprovodnih metamaterijala nastala je kao rezultat zamjene metalnih SRR-a radio-frekventnim superprovodnim kvantnim interferencijskim uređajima (u nastavku teksta rf SQUID – radio-frequency Superconducting Quantum Interference Devices). Superprovodni metamaterijali, međutim, nisu ograničeni samo na gore pomenute realizacije, oni uključuju i druge vrste vještačkih metamaterijala, na primjer tanke superprovodne ploče se u određenom rasporedu mogu koristiti za dobijanje metamaterijala nulte frekvencije. Oni takođe mogu egzistirati u formi heterostruktura gdje se superprovodni slojevi smjenjuju sa feromagnetnim ili ne-magnetnim što dovodi do pojave

elektromagnetno indukovane transparentnosti, sposobnosti prebacivanja i još nekih osobina. Postoji nekoliko demonstracija elemenata superprovodnih metamaterijala koji pokazuju mogućnost podešavanja svojih osobina promjenom temperature ili primjenjenim magnetnim poljem. Superprovodni podijeljeni prstenovi kombinovani u 2D planarne nizove odgovorni su za formiranje superprovodnih metamaterijala koji pokazuju mogućnost podešavanja i prebacivanja na mikrotalasnim i THz frekvencijama. Metamaterijali novijeg doba generalno su proizvedeni u planarnoj geometriji, koristeći ili konvencionalne superprovodnike sa niskom kritičnom temperaturom kao što su niobijum, filmovi niobijum-nitrida ili najčešće korišten član porodice superprovodnika sa visokom kritičnom temperaturom – itrijum-barijum-bakar-oksidi (YBCO). Svi ovi superprovodni metamaterijali dijele zajedničku karakteristiku – svi se sastoje od rezonantnih subtalasnih elemenata koji pokazuju jak odziv na jednoj određenoj frekvenciji tzv. *rezonantnoj frekvenciji*. Ta rezonantna frekvencija pokazuje mogućnost podešavanja spoljašnjim uticajima kao što su temperatura, konstantno i vremenski zavisno magnetno polje, primjenjena struja, zbog izuzetne osjetljivosti superprovodnog stanja na spoljašnje stimulise. U budućim primjenama od interesa je ne samo rezonantna frekvencija već i njen kvalitet koji se karakteriše odgovarajućim faktorom kvaliteta Q i koji se značajno povećava kako temperatura pada ispod kritične.

Razmotrimo sada malo detaljnije same superprovodne metamaterijale. Superprovodnost možemo definisati kao makroskopsko stanje materije koje nastaje interakcijom elektrona i vibracija rešetke; kao rezultat elektroni formiraju Kuperove parove koji se kondenzuju u jedno makroskopsko osnovno stanje. Osnovno stanje je odvojeno temperaturno zavisnim energetske procjepom Δ od pobuđenih jedoelektronskih stanja u kojima se nalaze kvazi čestice (kvazi-elektroni). U određenim okolnostima Kuperovi parovi se mogu opisati jednom makroskopskom kvantnom talasnom funkcijom

$$\psi = \sqrt{n_s} e^{i\theta_s} \quad (1)$$

gdje je n_s lokalna gustina superprovodnih elektrona a θ_s je faza koherentna u odnosu na makroskopske dimenzije. Ako se dovoljno približe dva superprovodnika, između kojih se nalazi tanka izolaciona barijera, može doći do tuneliranja Kuperovih parova od jednog superprovodnika ka drugom. Ovo tuneliranje proizvodi superstruju (Džozefsonovu struju) između S_L i S_R

$$I_J = I_C \sin \phi_J \quad (2)$$

gdje je I_C kritična struja Džozefsonovog spoja a

$$\phi_J = \phi_L(t) - \phi_R(t) - \frac{2\pi}{\phi_0} \int_{S_L}^{S_R} A(r, t) dl \quad (3)$$

je mjerno invarijantna Džozefsonova faza, ϕ_L i ϕ_R su faze makroskopskih kvantnih talasnih funkcija S_L i S_R , respektivno, $A(r, t)$ je elektromagnetni vektorski potencijal u oblasti između S_L i S_R a ϕ_0 je kvant fluksa. U zavisnosti od toga da li ϕ_J zavisi od vremena ili ne, pojava superstruje se naziva nestacionarni ili stacionarni Džozefsonov efekat. Superprovodnici daju tri jedinstvene prednosti razvoju

metamaterijala na mikrotalasnim i subterahercnim frekvencijama:

- mali gubici, jedno od ključnih ograničenja konvencionalnih metamaterijala;
- mogućnost minijaturizacije dok se svojstvo malih gubitaka i dalje održava;
- jake nelinearnosti, svojstvene superprovodnom stanju.

Superprovodni metamaterijali pokazuju unutrašnju nelinearnost jer se obično sastoje od veoma kompaktnih elementarnih jedinica što rezultira jakim poljima i strujanjima unutar njih. Nelinearnost omogućava podesivost kroz varijaciju spoljašnjih polja. Termička podesivost je postignuta na terahercnim frekvencijama varijacijom temperature u metamaterijalu sa visokom kritičnom temperaturom (YBCO) i u NbN rezonatorima. Superprovodni radio-frekventni metamaterijali koji se sastoje od 2D niobijumovih spirala razvijenih na kvarcnim podlogama pokazuju jaku podesivost kako se približavaju kritičnoj temperaturi. Radio-frekventni metamaterijali imaju veliki potencijal za primjenu u neinvazivnom medicinskom snimanju visoke rezolucije (magnetna rezonanca). U odnosu na svoje metalne kolege, radio-frekventni metamaterijali omogućavaju manje gubitke, više radne temperature i veću podesivost.

Kvantni metamaterijal treba da bude vještački optički medijum koji ispunjava uslove:

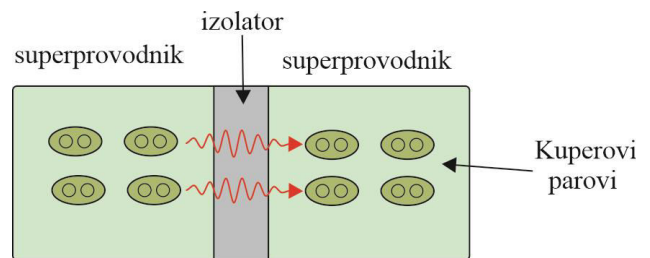
- sadrži kvantne koherentne jedinične elemente čiji se parametri mogu podesiti;
- kvantna stanja (barem nekih) elemenata se mogu direktno kontrolisati;
- održava ukupnu koherentnost dovoljno dugo.

Ova svojstva čine kvantni metamaterijal kvalitativno drugačijim sistemom. Superprovodni kvantni metamaterijali danas igraju veliku ulogu u kvantnom računarstvu i kvantnoj memoriji. Posljednjih nekoliko godina, superprovodni uređaji koji mogu biti snažno povezani sa spoljašnjim elektromagnetnim poljem takođe mogu poslužiti kao kvantno koherentni jedinični elementi superprovodnih kvantnih metamaterijala (SCQMMs – Superconducting Quantum Metamaterials). Na primjer, na ultra niskim temperaturama, superprovodne petlje koje sadrže Džozefsonove spojeve pokazuju diskretan energetski spektar i u mnogim aspektima se ponašaju kao kvantni meta-atomi. To je vrlo uobičajeno za uređaje kao što su kvantni sistemi na dva nivoa koji se nazivaju superprovodni kjubiti (superconducting qubits), čija energija razdvajanja nivoa odgovara frekvenciji reda nekoliko GHz. Takođe, interakcija svjetlosti i SCQMM-a je opisana spajanjem fotona vještačkim sistemima na dva nivoa tj. superprovodnim kjubitima.

III. SQUID METAMATERIJALI

Rf SQUID uređaji su visoko nelinearni superprovodni uređaji kojima se može upravljati sa više spoljnih stimulsa. Najjednostavniju verziju SQUID-a predstavlja superprovodni prsten presječen Džozefsonovim spojem (JJ-Josephson

junction) koji se sastoji od dva superprovodnika odvojena tankim izolacionim slojem. Sistem od dva superprovodnika između kojih se nalazi izolator poznat je kao SIS spoj. Struja kroz izolacioni sloj i napon na spoju se tada određuju poznatim Džozefsonovim relacijama i presudno utiču na elektromagnetno ponašanje rf-SQUID-a. SQUID se najčešće koristi kao magnetni senzor polja jer može detektovati čak i mala magnetna polja sa nevjerovatnom preciznošću. Slično kao kod konvencionalnih (metalnih) magnetnih metamaterijala na bazi SRR-a, SQUID-i su magnetno povezani jedan sa drugim magnetnim dipol-dipol interakcijama. Teorijska istraživanja su predviđala da 1D i 2D nizovi rf SQUID-a mogu raditi kao magnetni metamaterijali i u klasičnom i u kvantnom režimu i mogu ispoljavati negativnu magnetnu permeabilnost u određenom frekventnom opsegu koji obuhvata rezonantnu frekvenciju pojedinačnih SQUID-a. Nedavni eksperimenti su pokazali da ovi uređaji posjeduju niz izvanrednih svojstava kao što su negativna dijamagnetna permeabilnost, samoindukovana širokozonska transparentnost, dinamička multistabilnost, koherentno oscilovanje, kao i sposobnost podešavanja i prebacivanja. Možemo reći da metamaterijali bazirani na SQUID-u predstavljaju oblast superprovodnih metamaterijala koja je dostigla vrlo uspješne praktične primjene.



Slika 1. Šematski prikaz SIS spoja

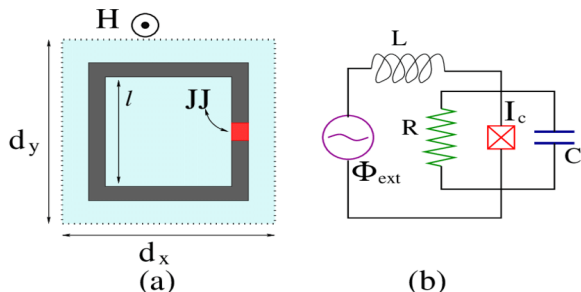
U idealnom Džozefsonovom spoju (spoj u kome su nosioci struje isključivo Kuperovi parovi) superstruja (Džozefsonova struja) I_J i napon V_J kroz Džozefsonov spoj izraženi su poznatim Džozefsonovim relacijama

$$V_J(t) = \frac{\phi_0}{2\pi} \frac{\partial \phi_J(t)}{\partial t}, \quad I_J(t) = I_c \sin[\phi_J(t)] \quad (4)$$

Sa kritičnom strujom, Džozefsonovom fazom, kao i mjerno-invarijantnom Džozefsonovom fazom upoznali smo se ranije. U idealnom Džozefsonovom spoju nema pada napona preko barijere za struje niže od kritične. U praksi to može biti tačno na nultoj temperaturi dok će na konačnim temperaturama uvijek postojati struja kvazi čestica koje nastaju kidanjem Kuperovih parova. U superprovodnim kolima realnim Džozefsonovim spojem se smatra paralelna kombinacija idealnog Džozefsonovog spoja, kapaciteta C zbog tankog izolacionog sloja i otpora R zbog kvazi-elektronskog tuneliranja kroz izolacionu barijeru. Ovo ekvivalentno električno kolo za realni Džozefsonov spoj poznato je kao model otpornog i kapacitivnog paralelnog spoja (RCSJ – Resistively and Capacitively Shunted Junction). Idealni Džozefsonov spoj se takođe može opisati kao promjenjivi induktor u superprovodnom kolu. Lako se može zaključiti da je Džozefsonova induktivnost

$$L \equiv L_J \equiv L_J(\phi_J) = \frac{L_J(0)}{\cos(\phi_J)}, \quad L_J(0) = \frac{\phi_0}{2\pi I_C} \quad (5)$$

Primijetimo da ova jednačina opisuje nelinearnu induktivnost dok L_J zavisi od struje i napona kroz Džozefsonovu fazu. Zbog Džozefsonovog spoja, rf SQUID je visoko nelinearni oscilator koji reaguje na sličan način kao magnetni „atom“ pokazujući snažnu rezonanciju u vremenski promjenjivom magnetnom polju sa odgovarajućom polarizacijom.



Slika 2. a) Rf SQUID u vremenski zavisnom magnetnom polju $H(t)$. b) ekvivalentno električno kolo za rf SQUID

Ekvivalentno električno kolo za rf SQUID u vremenski zavisnom magnetnom polju $H(t)$ sadrži izvor fluksa $\phi_{ext}(t)$ u seriji sa induktivnošću L i pravim Džozefsonovim spojem opisanim modelom RCSJ. Dinamička jednačina za fluks ϕ koji prolazi kroz petlju rf SQUID-a dobija se direktnom primjenom Kirhofovih zakona kao:

$$C \frac{d^2 \phi}{dt^2} + \frac{1}{R} \frac{d\phi}{dt} + I_C \sin\left(2\pi \frac{\phi}{\phi_0}\right) + \frac{\phi - \phi_{ext}}{L} = 0 \quad (6)$$

gdje je ϕ_0 kvant magnetnog fluksa a t vremenska varijabla. Ova jednačina se izvodi kombinacijom sljedeće dvije jednačine

$$\phi = \phi_{ext} + LI \quad (7)$$

$$-I = +C \frac{d^2 \phi}{dt^2} + \frac{1}{R} \frac{d\phi}{dt} + I_C \sin\left(2\pi \frac{\phi}{\phi_0}\right) \quad (8)$$

i proučavana je više od tri decenije uzimajući u obzir da je fluks spoljašnjeg polja $\phi_{ext} = \phi_{dc} + \phi_{ac} \cos(\omega t)$ tj. u prisustvu vremenski nezavisnog (konstanta dc) i vremenski zavisnog magnetnog polja amplitude ϕ_{ac} i frekvencije ω . Orijentacija oba polja je takva da njihov fluks prolazi kroz SQUID petlju. U odsustvu jednosmjernog fluksa i veoma niske amplitude naizmjeničnog polja SQUID pokazuje rezonantni magnetni odgovor

$$\omega_{SQ} = \omega_{LC} \sqrt{1 + \beta_L} \quad (9)$$

gdje su

$$\omega_{LC} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \beta_L = 2\pi \frac{LI_C}{\phi_0} \quad (10)$$

induktivno-kapacitivna (LC) frekvencija SQUID-a i parametar SQUID-a, respektivno. Ako uzmemo u obzir faktor normalizacije dobijamo

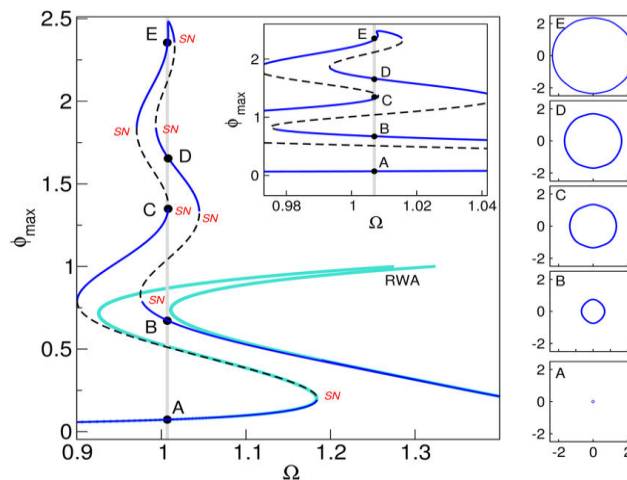
$$\beta = \frac{\beta_L}{2\pi} \quad \gamma = \frac{1}{R} \sqrt{L/C} \quad (11)$$

reskalirani parametar SQUID-a i bezdimenzioni koeficijent gubitaka, respektivno. Kao što je ranije pomenuto, rf SQUID je nelinearni oscilator koji pokazuje jak rezonantni odgovor na određenim frekvencijama na polje sinusoidnog (naizmjeničnog) fluksa. U jedinicama induktivno-kapacitivne (LC) frekvencije SQUID-a, rezonantna frekvencija pojedinačnog SQUID-a je

$$\Omega_{SQ} = \frac{\omega_{SQ}}{\omega_{LC}} = \sqrt{1 + \beta_L} \quad (12)$$

Teorijski je pokazano da se rezonancija SQUID-a može podesiti unutar širokfrekventnog opsega ili pomoću fluksa jednosmjerne struje ϕ_{dc} ili amplitudom polja naizmjeničnog fluksa ϕ_{ac} . Ovo je uskoro eksperimentalno utvrđeno [5].

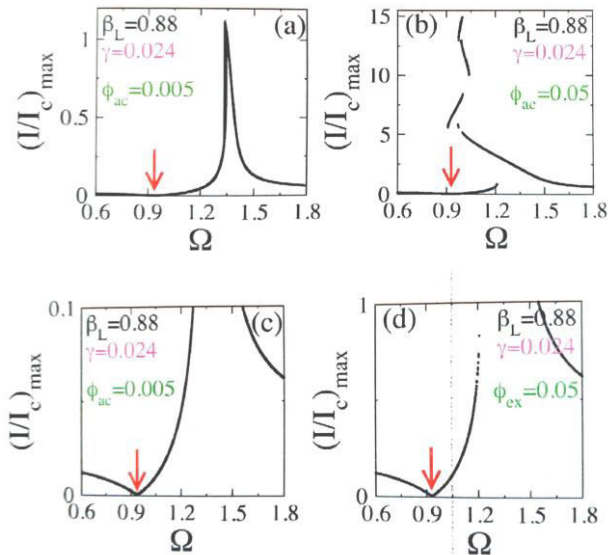
Dalja istraživanja su pokazala da je rezonantna frekvencija pojedinačnog SQUID-a takođe podesiva snagom polja naizmjeničnog fluksa kao i temperaturom. Konkretno, sa povećanjem amplitude polja naizmjeničnog fluksa od niske do visoke vrijednosti rezonantna frekvencija pojedinačnog SQUID-a se pomjera od $\Omega = \Omega_{SQ}$ do $\Omega = 1$ (tj. ka nižim frekvencijama). Za vrijednost $\beta_L = 0.86$, tipičnu vrijednost za β_L i vrlo blisku vrijednosti dobijenoj u eksperimentima, rezonantna frekvencija pojedinačnog SQUID-a može varirati od $\Omega = \Omega_{SQ} = 1.364$ do $\Omega = 1$ što predstavlja više od 25 % varijacije. Štaviše, rezonantna kriva pojedinačnog SQUID-a tj. amplituda oscilovanja fluksa kroz SQUID petlju drastično mijenja oblik.



Slika 3. a) Rezonantna kriva rf SQUID-a b) Fazni portret periodičnih orbita u tačkama A-E [6]

Takva rezonantna kriva za $\phi_{ac} = 0.06$ prikazana je na Sl.3. Kao što možemo vidjeti, kriva vijuga unutar uskog frekventnog opsega oko rezonantne frekvencije $\Omega \sim 1$. Pone plave linije ukazuju na stabilna rješenja dok isprekidane crne označavaju nestabilna (stabilne i nestabilne grane). Stabilne i nestabilne grane se spajaju u određenim tačkama označenim sa SN. Gledajući Sl.3 može se identifikovati da postoje određeni frekventni opsezi u kojima istovremeno postoji više stabilnih

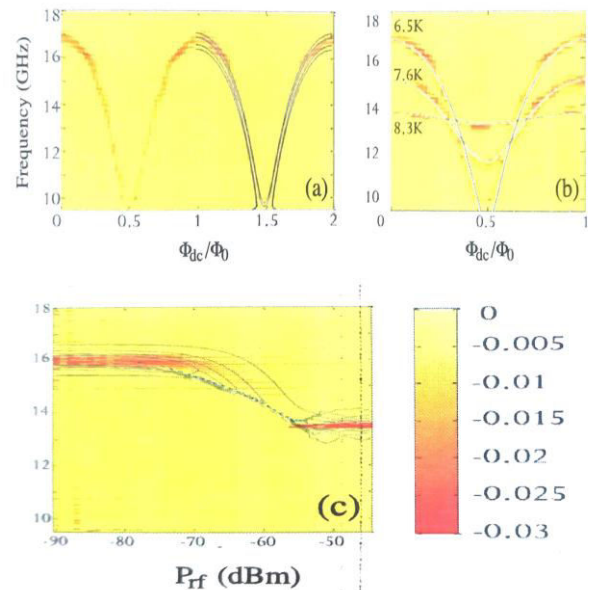
rješenja. Ilustracije radi, povučena je vertikalna linija na $\Omega = 1.007$. Za tu frekvenciju postoji pet istovremeno stabilnih rješenja koja su označena slovima A,B,C,D,E i četiri nestabilna. Zapravo, na frekvenciji $\Omega = 1.007$ broj mogućih rješenja za izabrani skup parametara simulacije je maksimalan. Dakle, za taj skup $\Omega = 1.007$ je *multistabilna frekvencija*.



Slika 4. Strujno-frekventne karakteristike za rf SQUID. Na slikama c) i d) predstavljena su uvećanja slika a) i b) oko rezonantne frekvencije, respektivno [7]

Druga ilustracija multistabilnosti u rf SQUID-u je prikazana na Sl.4 koja takođe otkriva antirezonantni efekat. Na Sl.4 a) i b) krive zavisnosti amplitude struje i frekvencije prikazane su u dva slučaja; jedan blizak slabo nelinearnom režimu a drugi u izrazito nelinearnom režimu, respektivno. Na Sl.4 a) rezonantna frekvencija je $\Omega_R = 1.25$, znatno niža od rezonantne frekvencije SQUID-a u linearnom režimu, $\Omega_{SQ} = 1.37$ ($\beta_L = 0.88$). Na Sl.4 b) amplituda naizmjeničnog polja ϕ_{ac} je povećana za red veličine u odnosu na onu na Sl.4 a) i tako snažni nelinearni efekti postaju lako uočljivi. Može se identifikovati pet stabilnih grana u uskom frekventnom području oko $\Omega = 1$, nestabilne grane nisu prikazane. Gornje grane, koje su izuzetno osjetljive na perturbacije, odgovaraju visokim vrijednostima amplitude struje $i_{max} = I_{max}/I_c$ što dovodi Džozefsonov spoj u njegovo normalno stanje. Crvene strelice na Sl.4 pokazuju mjesto antirezonancije. Na Sl.4 c) i d) respektivno su prikazana uvećanja Sl.4 a) i b) oko rezonantne frekvencije. Iako je oblast rezonancije u izrazito nelinearnom slučaju značajno pomjerena na lijevu stranu u poređenju sa slabo nelinearnim slučajem, lokalizacija antirezonancije je ostala nepromijenjena (čak i ako se ϕ_{ac} na Sl.4 a) i b) razlikuju po redu veličine). Poznavanje lokacije antirezonancije kao i rezonancije oscilatora ili sistema oscilatora od izuzetnog je značaja za primjenu u uređajima. Kada su SQUID-i u antirezonantnom stanju, u kojem je indukovana struja jednaka nuli, oni ne apsorbuju energiju iz primjenjenog polja koje na taj način skoro da i nema uticaja na SQUID. Dakle, u takvom stanju, SQUID metamaterijal izgleda proziran na primjenjeni

magnetni fluks kao što je već primijećeno u eksperimentima u dvodimenzionalnim SQUID metamaterijalima; uočeni efekat se naziva *širokozonska samoindukovana transparentnost*. Štaviše, pošto antirezonantna frekvencija nije pod uticajem ϕ_{ac} , transparentnost se može posmatrati čak i u jako nelinearnom režimu, za koji antirezonantna frekvencija leži u multistabilnoj oblasti. U tom slučaju transparentnost metamaterijala se može uključiti i isključiti. Dakle, koncept antirezonancije služi za uspostavljanje veze između važnih svojstava SQUID metamaterijala i fundamentalnih dinamičkih svojstava nelinearnih oscilatora. U novijim eksperimentima istraživana je podesivost rezonancije SQUID-a sa magnetnim poljem i temperaturom [8]. Ta istraživanja se oslanjaju na mjerenje veličine kompleksne transmisije $|S_{21}|$ dok jedan od spoljašnjih parametara varira. Veoma niska vrijednost $|S_{21}|$ ukazuje na to da je SQUID u rezonanciji.



Slika 5. Prikazana su eksperimentalna mjerenja kompleksne transmisije kao funkcije :a) Ω , ϕ_{dc} i $T=6.5$ K b) Ω , ϕ_{dc} i tri različite temperature $T=6.5$ K, 7.6K i 8.3K c) Ω i rf snage pri $\phi_{dc} = 1/6$ i $T=6.5$ K [9]

Na Sl.5 prikazana su eksperimentalna mjerenja veličine kompleksne transmisije. Rezonantni odgovor obilježen je crvenom bojom. Na Sl.5 a) primjećuje se da rezonancija varira sa primjenjenim jednosmjernim fluksom, sa periodom ϕ_0 . Na Sl.5 b) prikazan je efekat temperature T . Kao što je očekivano, propusni opseg rezonancije se smanjuje sa povećanjem temperature. Na Sl.5 c) prikazana je varijacija rezonantne frekvencije sa promjenom rf snage. Jasno se uočavaju tri različita režima; za interval značajno niske i visoke rf snage, rezonantna frekvencija je približno konstantna pri $\Omega \approx \Omega_{SQ}$ i $\Omega = 1$ respektivno, dok za srednje rf snage rezonancija očigledno nestaje. Posljednji efekat je povezan sa širokozonskom samoindukovanom transparentnošću.

Tokom 1980-ih rodila se ideja o mogućnosti postizanja kvantne koherentnosti u makroskopskim kolima koja se sastoji od Džozefsonovih spojeva [10]; od tada, realizovano je nekoliko vrsta superprovodnih, efektivno dvostepenih kvantnih sistema, sposobnih da čuvaju informaciju u binarnom obliku tj. superprovodnih bitova ili kubitova. Uređaji bazirani na kubitima su trenutno u centru kvantne šeme za obradu informacija, s obzirom na to da se čine idealnim kandidatima za gradivne elemente održivih kvantnih računara. Nekoliko varijanti superprovodnih kubitova koje se oslanjaju na Džozefsonov efekat i primjenjuju ili naelektrisanje ili fluks ili fazne stepene slobode, predloženi su za implementaciju radnog kvantnog računara. Nedavno najavljen, danas komercijalno dostupan kvantni računar sa više od 1000 superprovodnih kubit procesora, poznat kao D-Wave $2X^{TM}$ (nadogradnja D-Wave Two^{TM} sa 512 kubit procesora) ogroman je napredak u ovom pravcu. Jedan superprovodni naelektrisani kubit (SCQ) na temperaturama reda milikelvina može se smatrati, pod određenim uslovima kao vještački "atom" na dva nivoa u kome su dva stanja, osnovno i prvo pobuđeno koherentno superponirana Džozefsonovom spregom. Kada je povezan sa elektromagnetnim vektorskim potencijalom, SCQ se ponaša kao atom u svemiru. Superprovodni kvantni metamaterijali (SCQMM) koji sadrže veliki broj kubitova imaju potencijal da održe kvantnu koherentnost dovoljno dugo da otkriju nova egzotična svojstva.

V. ZAKLJUČAK

Ideja o gradivnim materijalima sa projektovanim svojstvima tj. o metamaterijalima a posebno superprovodnim trenutno je u aktivnom razvoju. Najveću zrelost do sada, kada su metamaterijali u pitanju, dostigli su oni na bazi SQUID-a. Oni koriste geometriju, superprovodnost i Džozefsonov efekat da bi pokazali izvanredna svojstva metamaterijala i veoma bogato dinamičko ponašanje. Mnogi aspekti njihovog ponašanja su istraženi i teorijski i eksperimentalno. Trenutno su u toku eksperimenti na polju kako SQUID metamaterijala tako i superprovodnih kvantnih metamaterijala, koji imaju potencijal da dovedu do novih iznenađujućih rezultata.

Autor se zahvaljuje prof. dr. Željku Pržulju pod čijim je nadzorom rad napisan. Rad je urađen u okviru predmeta Naučnoistraživački projekat 1.

LITERATURA

- [1] V.G.Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ", Usp. Fiz. Nauk. 92 (1967).
- [2] D.R.Smith, W.J.Padilla, D.C.Vier, S.C.Nemat-Nasser, S.Schultz "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity", Phys. Rev. Lett. 84 (18) (2000).
- [3] J.B.Pendry, A.J.Holden, D.J.Robbins, W.J.Stewart, "Magnetism from conductors and endchanced nonlinear phenomena", IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 47 (1999).
- [4] N. Lazarides and G. P. Tsironis, "Superconducting metamaterials", Phys. Rep. 752, 1-67 (2018)
- [5] M.Trepanier, D.Zhang, O.Mukhanov, S.M.Anlage "Realization and modeling of rf superconducting quantum interference device metamaterials", Phys. Rev. X 3 (2013).
- [6] J.Hizanidis, N.Lazarides, G.P.Tsironis, "Robust chimera states in squid metamaterials with local interactions", Phys.Rev. E 94 (2016).
- [7] J.Hizanidis, N.Lazarides, G.Neofotistos, G.Tsironis, "Chimera states and synchronization in magnetically driven squid metamaterials", Eur. Phys. J.-Spec. Top. 225 (2016).
- [8] P.Jung, S.Butz, S.V.Shitov, A.V.Ustinov, "Low-loss tunable metamaterials using superconducting circuits with Josephson junctions", Appl. Phys. Lett. 102 (2013).
- [9] M.Trepanier, D.Zhang, O.Mukhanov, S.M.Anlage "Realization and modeling of rf superconducting quantum interference device metamaterials", Phys. Rev. X 3 (2013).
- [10] B.Josephson, "Possible new effects in superconductive tunneling", Phys. Lett. A 1 (1962).

ABSTRACT

This paper provides an overview of the properties of superconducting metamaterials - artificial substances built of periodically arranged artificial "atoms": superconducting qubits. The main advantage of these substances is reflected in ultra-low losses. A qubit or quantum bit is the basic unit of quantum information and may be any two-state quantum-mechanical system. These materials are characterized by a series of substantially new optical properties that enable the control of light propagation. For the practical purposes their most important feature is the ability to slow down light which enables the construction of the quantum memory devices.

SUPERCONDUCTING METAMATERIALS

Ivana Ivković