



Srednja šola za kemijo,
elektrotehniko in
računalništvo

IZDELAVA SUPERPREVODNIKA V ŠOLSKEM LABORATORIJU

Raziskovalna naloga

Kemija

Avtorja: Nejc Grilc in Mark Kladnik, K-4.a

Mentor: Sebastian Klovar, dipl. inž. kem. teh.

Mestna občina Celje, Mladi za Celje

Celje, marec 2022



Srednja šola za kemijo,
elektrotehniko in
računalništvo

IZDELAVA SUPERPREVODNIKA V ŠOLSKEM LABORATORIJU

Raziskovalna naloga

Kemija

Avtorja: Nejc Grilc in Mark Kladnik, K-4.a

Mentor: Sebastian Klovar, dipl. inž. kem. teh.

KAZALO VSEBINE

ZAHVALA	6
POVZETEK	6
ABSTRACT	6
CILJI	7
1. UVOD	7
1.1. Kaj sploh so superprevodniki?	7
1.2. Hipoteze	8
1.3. Viri in črpanje podatkov	8
2. DELITEV	9
2.1. Konvencionalni in nekonvencionalni superprevodniki	9
3. KLASIFIKACIJA SUPERPREVODNIKOV	11
3.1. Organski superprevodniki	11
3.2. A-15 spojine	12
3.3. Magnetni superprevodniki (Chevrel Phases)	13
3.4. Težki fermionski superprevodniki	14
3.5. Oksidni superprevodniki brez bakra	15
3.6. Piklorni oksidni superprevodniki	16
3.7. Ruteno-kuprati	17
3.8. Visoko temperaturni superprevodniki	18
3.9. Borokarbidi redkih zemeljskih elementov	19
3.10. Superprevodniki na osnovi silicija	19
3.11. Halkogeni superprevodniki	20
3.12. Ogljikovi superprevodniki	20
3.13. MgB ₂ in sorodni superprevodniki	20
4. LASTNOSTI SUPERPREVODNIKOV	21
4.1. Vpliv magnetnega polja	21
4.2. Kritični tok	21
4.3. Kritično magnetno polje	22
4.4. Pripenjanje toka v magnetnem polju (angl. Flux pinning)	23
4.5. Vpliv izotopa	23
4.6. Diamagnetizem in njegova uporaba	24
4.7. Superprevodniki pri sobni temperaturi	26
5. UPORABA	27
6. EKSPERIMENTALNI DEL	28
6.1. SINTEZA 1	28

6.1.1.	Inventar	28
6.1.2.	Postopek	28
6.1.3.	Tabletiranje vzorca	28
6.1.4.	Oksidacija v peči	29
6.1.5.	Meissnerjev efekt, preizkus superprevodnosti	29
6.1.6.	Račun	29
6.2.	Sinteza 2.....	30
6.2.1.	Inventar	30
6.2.2.	Postopek	30
6.2.3.	Tabletiranje vzorca	31
6.2.4.	Meissnerjev efekt, preizkus superprevodnosti	31
7.	MERITVE.....	32
7.1.	Superprevodnost	32
7.2.	Talilna temperatura kristalov $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$	32
7.3.	Masa kemikalij	32
7.3.1.	Sinteza s pirolizo	32
7.3.2.	Sinteza 2	32
7.4.	Meritve časa.....	33
7.4.1.	Sinteza s pirolizo	33
7.4.2.	Sinteza z oksidoma in s karbonatom.....	33
8.	REZULTATI	34
8.1.	Talilna temperatura kristalov $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$.....	34
8.2.	Superprevodnost vzorcev.....	34
8.3.	Čas potreben za izvedbo sinteze.....	34
9.	DISKUSIJA	35
9.1.	Hipoteze	35
9.2.	Povzetek ob koncu raziskovalne naloge	36
9.3.	Nadaljevanje raziskovalne naloge	36
10.	VIRI IN LITERATURA	37

Kazalo slik

Slika 1: Sestave celice spojine A-15 [9]	12
Slika 2: Diagram za feromagnetne superprevodnike (izrazi na sliki so prevedeni v slovenščino) [11]	13
Slika 3: Diagram za antiferomagnetne superprevodnike (izrazi na sliki so prevedeni v slovenščino) [11]	13
Slika 4: Prikazuje strukturo natrijevega volframovega brona. Predstavljena je ena osnovna plast, ki jo tvorijo oktaedri MO_6 z velikimi ioni v votlinah.[6]	15
Slika 5: Perovskitna struktura $\text{BaPb}_{0.75}\text{Bi}_{0.25}\text{O}_3$. [6]	15
Slika 6: Piroklorna mreža [17]	16
Slika 7: Sr_2RuO_4 [18]	17
Slika 8: Grafični prikaz zgradbe celice YBCO [6]	18
Slika 9: Kristalna struktura $\text{Ba}_8\text{Si}_{46}$ [6]	19
Slika 10: Kritično magnetno polje pri tipu II (izrazi na sliki so prevedeni v slovenščino) [4]	22
Slika 11: Pritrditev toka [25]	23
Slika 12: Še živa žaba lebdi v mikrogravitaciji [30]	24
Slika 13: Kaplja vode lebdi v mikrogravitaciji [30]	25
Slika 14: Superprevodnik pri sobni temperaturi [32]	26
Slika 15: Superprevodnik YBCO lebdi nad magnetom, lasten arhiv	29
Slika 16: Podstavek na katerem damo tablete v peč, lasten arhiv.	30
Slika 17: Superprevodnik YBCO lebdi nad magnetom, lasten arhiv	31
Slika 18: Superprevodnik YBCO lebdi nad magnetom, lasten arhiv	34
Slika 19: Superprevodnik YBCO lebdi nad magnetom, lasten arhiv	34

ZAHVALA

Najprej se zahvaljujema mentorju Sebastianu Klovarju za njegovo pomoč in spodbudo pri raziskovalni nalogi, tudi takrat, ko stvari niso šle po načrtih.

Zahvaljujema se tudi vsem ostalim profesorjem in laborantkama kemijskega kabineta Srednje šole za kemijo, elektrotehniko in računalništvo, ki so z nasveti in vzpodbudo pomagali uresničiti najine cilje za to raziskovalno nalogo.

Zahvala gre tudi zaposlenim na Oddelku za anorgansko kemijo na FKKT Ljubljana, ki so nama omogočili sintezo superprevodnika.

Za konec pa bi se rada zahvalila gospe dr. Aniti Laznik za lektoriranje raziskovalne naloge.

POVZETEK

Superprevodniki so pomembni materiali prihodnosti, že zdaj pa se uporabljajo v mnogih tehnoloških področjih od kvantnih računalnikov, vlakov MAGLEV, fuzijski reaktorjih, detektorjih magnetnega polja in pa v medicini v prihodnosti pa jih bodo uporabljali na mnogih drugih področjih.

Pri raziskovalni nalogi sva raziskala področje superprevodnosti in nato še izdelala superprevodnik YBCO z dvema različnima sintezama, s pirolizo in s sintezo s karbonatom in oksidoma, nato pa sva preizkusila Meissnerjev efekt, s katerim sva dokazala superprevodnost produktov obeh sintez ter ju primerjala med sabo. Primerjala sva čas potreben za sintezo in enostavnost izvedbe same sinteze.

Ključne besede: superprevodnik, materiali, Meissnerjev efekt, sinteza, YBCO

ABSTRACT

Superconductors are important materials of the future, they are already being used in many technological fields, from quantum computers, MAGLEV trains, fusion reactors, magnetic field detectors and in medicine but in the future they will be used in many other scientific fields.

In this research assignment we explored the field of superconductors and also made the superconductor YBCO with two different synthesis, the pyrolysis and the synthesis with carbonate and oxides, then we tested the meissner effect with witch we proved the superconductivity of the sinthesis products and compared the synthesis with one another. We compared the time required for each synthesis and its dificulty.

Key words: superconductors, materials, Meissner effect, synthesis, YBCO

CILJI

Odločila sva se, da bova pri raziskovalni nalogi preučila področje superprevodnosti. Za to tematiko sva se odločila, ker naju je področje superprevodnosti že dolgo zanimalo in ker meniva, da so superprevodniki zaradi svojega širokega spektra uporabe materiali prihodnosti. Že danes jih uporabljajo za izdelavo močnih elektro magnetov, elektronskih vezij, v zdravstvu za magnetno resonanco, detektorjih magnetnega polja, vlakih MAGLEV, kvantnih računalnikih, v prihodnosti pa se bo, kot kažejo trendi, njihovo področje uporabe še razširilo. Odločila sva se, da bova pri raziskovalni nalogi na dva različna načina sintetizirala superprevodnik YBCO, sintezi bova nato primerjala med seboj glede na enostavnost izvedbe in potreben čas zanj in kvaliteto produkta. Za sintezo ravno tega superprevodnika sva se odločila, saj meniva, da je njegovo sintezo možno izvesti v šolskem laboratoriju, kar želiva tudi dokazati.

1. UVOD

1.1. Kaj sploh so superprevodniki?

Superprevodniki so materiali, ki imajo posebne lastnost, zanje je značilna superprevodnost. Superprevodnost je sklop fizikalnih lastnosti, ki jih opazimo pri nekaterih materialih, kjer električni upor izgine in povsem izrinejo magnetno polje iz svoje notranjosti, kar je znano kot Meissnerjev efekt. Da dosežemo te lastnosti, morajo materiali doseči kritično temperaturo, pritisk ali pa njuno kombinacijo. Pojav superprevodnosti je leta 1911 odkril nizozemski fizik Heike Kamerlingh Onnes. Tega pojava ne moremo razložiti s klasično fiziko, ampak si moramo pri tem pomagati tudi s kvantno mehaniko. Pojav Meissnerjevega učinka kaže, da superprevodnosti ni mogoče razumeti zgolj kot idealizacijo za odlično prevodnost v klasični fiziki. Zanj je značilen, popoln izmet linij magnetnega polja iz notranjosti superprevodnika med njegovimi prehodi v superprevodno stanje. Superprevodniki tudi nimajo upora, tako da če bi v krog/prstan iz superprevodnika spustili električni tok, bi ta večno tekkel (ni izgub pri toku el. energije). V teoriji bi se tok moral ohraniti vsaj 100.000 let ali celo več brez merljive spremembe. V praksi se tokovi, vbrizgani v superprevodne tuljave, ohranjajo že več kot 25 let. Pri tem merjenju si pomagajo z opazovanjem spreminjanja levitacije superprevodne niobijeve krogle z maso 4 gramov. Superprevodnik se šteje za visoko temperaturnega, če doseže superprevodnost nad 30 K. Določene je mogoče opisati z BCS teorijo (Bardeen–Cooper–Schrieffer theory). Vendar ta velja le za konvencionalne superprevodnike. Večinoma so to nizko temperaturni superprevodniki. Do sedaj je najvišja dosežena kritična temperatura v konvencionalnem superprevodniku le 39 K, in sicer v magnezijevem diboridu. Najbolj uporabljana pa je zlitina niobij-titana. Za večino na novo odkritih visoko temperaturnih superprevodnikov pa teorija BCS ne drži, saj ti spadajo med nekonvencionalne. Uporaba superprevodnikov je zelo široka, od električne napeljave, elektronskih delov, motorjev pa vse do eksperimentalnih fuzijskih reaktorjev in kvantnih računalnikov.

1.2. Hipoteze

V raziskovalni nalogi sva si za ovrednotenje postavila tri hipoteze.

1. HIPOTEZA : V šolskem laboratoriju je mogoče sintetizirati superprevodnik YBCO.
2. HIPOTEZA: Pri sintezi s pirolizo dobimo boljši produkt, saj se delci bolj homogeno porazdelijo med seboj in zato je tvorba samih kristalov boljša, kar pomeni, da je produkt boljši.
3. HIPOTEZA: Sinteza z oksidoma in karbonatom je enostavnejša in hitrejša od sinteze s pirolizo.
4. HIPOTEZA: Pri žarjenju v peči ni potrebno prepričevanje s čistim kisikom, saj za oksidacijo produkta zadostuje prepričevanje peči z zrakom iz okolice. Če zrak ne bi zadostoval, produkt ne bi bil superprevoden, saj se ne bi oksidiral. Superprevodnost dokažemo z meissnerjevim efektom.

1.3. Viri in črpanje podatkov

Pri raziskovalnem delu sva uporabila večinoma spletne vire in le en pisni vir. Za boljšo zaupljivost podatkov, sva enake podatke preverila na več različnih straneh in se prepričala, da se ne izključujejo med seboj in si ne nasprotujejo. Glede pisnih virov, pa lahko glede superprevodnikov najdemo zelo malo. Večina virov, ki jih lahko najdemo v knjižnici NUK v Ljubljani je doktorskih disertacij. Te so zelo specializirane za točno določeno področje o superprevodnosti in napisane na višjem nivoju. Uporabila sva eno doktorsko disertacijo, katera je imela o superprevodnikih napisano bolj na splošno in na nivoju, ki je lažje razumljiv za srednjo šolo. Prav tako sva se za prevod angleških izrazov obračala na to doktorsko disertacijo in jih prevajala glede na to, kako so bili izrazi prevedeni v njej.

2. DELITEV

2.1. Konvencionalni in nekonvencionalni superprevodniki

Superprevodnike ločimo v več skupin glede na njihove lastnosti. Že v uvodu omenjena delitev je na konvencionalne in nekonvencionalne.

Konvencionalni superprevodniki so materiali, ki kažejo superprevodnost, kot jo opisuje teorija BCS ali njene razširitve. To je v nasprotju z nekonvencionalnimi superprevodniki, katerih delovanja z njo ne moremo opisati. Konvencionalni superprevodniki so lahko tipa I ali tipa II. Delitev na tip I in tip II bo razložena v nadaljevanju.

Večina elementarnih superprevodnikov je konvencionalnih in spadajo v skupino tipa I, niobij in vanadij, ki pa sta tudi konvencionalna, pa spadata v skupino tipa II.

Večina spojin in zlitin superprevodnikov je materialov tipa II. Najpogosteje uporabljen konvencionalen superprevodnik je niobij-titanova zlitina. To je superprevodnik tipa II, ki doseže superprevodnost pri kritični temperaturi 11 K. Najvišja kritična temperatura doslej, dosežena pri konvencionalnih superprevodniku, je 39 K (- 234 °C) v magnezijevem diboridu.

Seveda pa so lahko tudi spojine, ki spadajo med konvencionalne. Primer teh je $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{BiO}_3$, saj zanj velja teorija BCS. [1]

2.2. Delitev na tip I in tip II

Tip I	Tip II
Nizko temperaturni (kritična temperatura običajno v območju od skoraj 0 K do 10 K)	Visoko temperaturni (visoka kritična temperatura, običajno večja od 10 K)
Nizko kritično magnetno polje (običajno v območju od 0.0000049 T do 1 T)	Visoko kritično magnetno polje (običajno večje od 1 T)
Popoln Meissnerjev efekt: magnetno polje ne more prodreti v material.	Delno upoštevajo Meissnerjev efekt, vendar ne v celoti: magnetno polje lahko prodre v notranjost materiala.
Hitro izgubijo superprevodnost pri že zelo majhnem magnetnem polju. Zato se tipu ena reče tudi »soft superconductors«.	Superprevodno stanje se ne izgubi zlahka zaradi zunanjega magnetnega polja. Zato so superprevodniki tipa II znani tudi kot »hard superconductors«.
Samo eno kritično magnetno polje. Ni mešanega stanja. So v celoti superprevodni ali pa v celoti niso.	Dve kritični magnetni polji. Imajo tudi mešano stanje. Pojav kvantnih vrtincev (quantum vortices)

Prehod iz superprevodnega stanja v normalno stanje zaradi zunanjega magnetnega polja je pri superprevodnikih tipa I oster in nenaden.	Prehod iz superprevodnega stanja v normalno stanje, zaradi zunanjega magnetnega polja, je postopen in ni oster. Pri nižjem kritičnem magnetnem polju (H_{C1}) začne superprevodnik tipa II izgubljati svojo superprevodnost. Pri zgornjem kritičnem magnetnem polju (H_{C2}) pa jo popolnoma izgubi. Stanje med spodnjim kritičnim magnetnim poljem in zgornjim kritičnim magnetnim poljem je znano kot vmesno stanje ali mešano stanje.
Zaradi nizkega kritičnega magnetnega polja superprevodnikov tipa I ni mogoče uporabiti za izdelavo elektromagnetov, ki se uporabljajo za ustvarjanje močnega magnetnega polja.	Zaradi visokega kritičnega magnetnega polja se lahko superprevodniki tipa II uporabljajo za izdelavo elektromagnetov, ki se uporabljajo za ustvarjanje močnega magnetnega polja.
Superprevodniki tipa I so običajno čiste kovine.	Superprevodniki tipa II so običajno zlitine in kompleksni oksidi keramike.
Teorijo BCS je mogoče uporabiti za razlago večine superprevodnosti superprevodnikov tipa I, saj so ti večinoma konvencionalni.	Teorije BCS ni mogoče uporabiti za razlago večine superprevodnosti superprevodnikov tipa II, saj so ti večinoma nekonvencionalni z nekaj izjemami, kot na primer že prej omenjena niobij in vanadij.
Popolnoma diamagnetni.	Niso popolnoma diamagnetni.
Rahla nečistoča ne vpliva na superprevodnost superprevodnikov tipa I.	Rahla nečistoča močno vpliva na superprevodnost superprevodnikov tipa II, že 1% nečistoč ima pri nekaterih opazen učinek.
Večino je potrebno hladiti s tekočim helijem	Potrebno hladiti s tekočim helijem, za nekatere pa je dovolj tekoči dušik.
Primeri: Hg, Pb, Zn	Primeri: NbTi, $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

Tabela 1: Predstavitev superprevodnikov tip I in tip II

[2] [3] [4] [33]

Poznamo pa še superprevodnike tipa 1,5. Ti so večkomponentni superprevodniki, ki imajo lastnosti superprevodnikov tipa I in tipa II. [5]

3. KLASIFIKACIJA SUPERPREVODNIKOV

Glede na lastnosti lahko superprevodnike delimo v 13 glavnih skupin.

3.1. Organski superprevodniki

Odkriti so bili leta 1979 in so za raziskave posebej zanimivi, saj so sestavljeni večinoma iz ogljika in vodika, česar pa je v izobilju. Superprevodnost kažejo pod nizkimi temperaturami, večina pod 10 K. Njihove lastnosti so zelo odvisne tudi od tlaka in načina žarjenja. Leta 2007 je za najvišjo doseženo T_c pod normalnim tlakom veljala meja 33 K, opažena v $\text{RbCs}_2\text{C}_{60}$. Najvišja na splošno dosežena T_c pa je bila izmerjena leta 1995 v Cs_3C_{60} pod tlakom 15 kbar, in sicer je znašala 40 K.

Organske superprevodnike lahko delimo dalje na tri glavne skupine, in sicer enodimenzionalne, dvodimenzionalne in dopirane fullerene (osnova je fuleren in nanj vezani atomi in spojine, na primer $(\text{NH}_3)_4\text{Na}_2\text{CsC}_{60}$, K_3C_{60} ...).

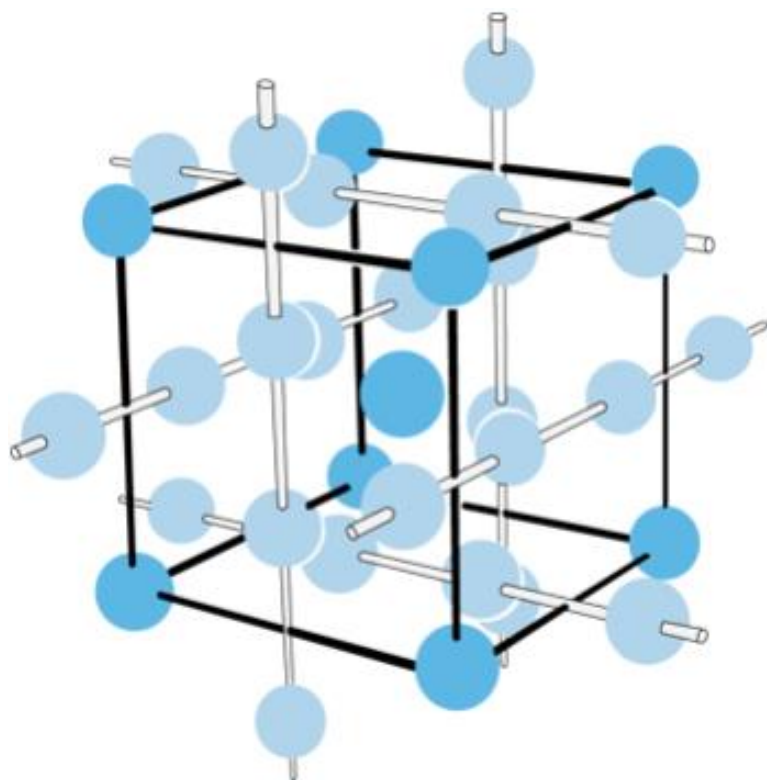
Pri dvodimenzionalnih je posebej pomembno, kako je izpostavljen napetosti. Napetost, vzporedna s prevodnimi ravninami organskega, povzroči povečanje T_c in H_{c2} , vendar pravokotna napetost vodi do njunega zmanjšanja. Pri dvodimenzionalnem lahko opazimo, da kršijo Pauli paramagnetno omejitev, to je meja specifična za vsak superprevodnik posebej glede na njegove lastnosti, ki nam pove, kakšno magnetno polje potrebujemo, da razbijemo Cooperjeve pare.

To vrednost lahko izračunamo po poenostavljeni enačbi $1.86 \left[\frac{T}{K} \right] * T_c$

Nad to mejo nastane Fulde-Ferrell-Larkin–Ovchinnikov (FFLO) stanje, kjer je material še vedno superprevoden, a se na določenih mestih že obnaša kot navaden prevodnik. Seveda pa organski superprevodniki niso edini, kjer lahko opazimo FFLO stanje. [6] [7] [8]

3.2. A-15 spojine

So spojine s kristalno strukturo in s kemično formulo A_3B . A v tej spojini predstavlja prehodni element, B pa je lahko prehodni element, ni pa nujno. Veliko A-15 spojin kaže lastnosti superprevodnosti že okoli 20 K, vendar niso vse A-15 spojine superprevodne. Spojine kristalizirajo v celice v obliki kocke, pri čemer imata vpliv tako tlak, kot tudi temperatura in hitrost ohlajanja ter segrevanja. V celici lahko najdemo atome B na robovih celice in enega v njeni sredini, atome A pa lahko najdemo v parih po dva na ploskvah celice in ti z drugimi A atomi tvorijo medsebojno pravokotne, linearne verige, kot kaže spodnja slika. [9]



Temnejši atomi predstavljajo atome B, svetlejši pa atome A.

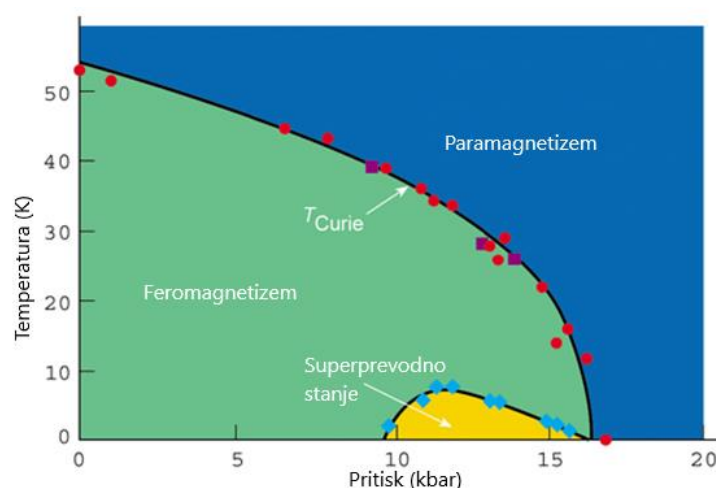
Slika 1: Sestave celice spojine A-15 [9]

Prvo spojino A-15 so opazovali leta 1931, leta 1953 pa so prvič odkrili superprevodnost v A-15 spojini, in sicer v V_3Si , z T_c 17K, kar je povečalo zanimanje v to vrsto spojin. Kar je pri teh spojinah posebej zanimivo, je visoko kritično polje glede na kritično temperaturo, na primer Nb_3Al-Ge z $T_c = 19,4$ K, ima $H_{c2} = 39,5$ T. [6] [9] [10]

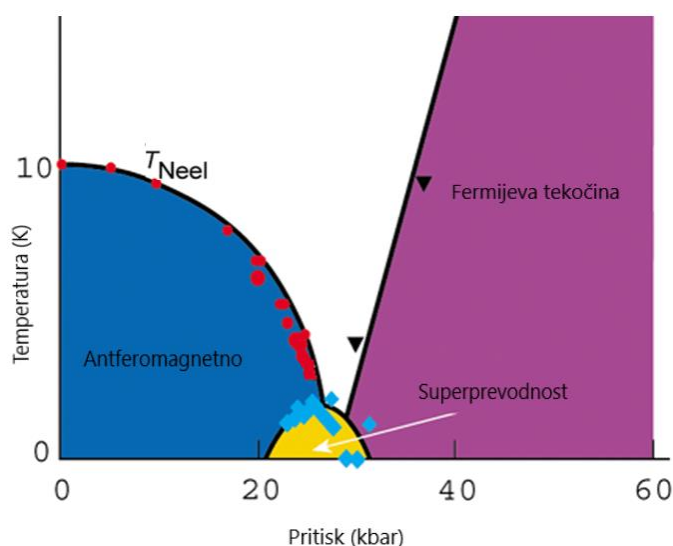
3.3. Magnetni superprevodniki (Chevrel Phases)

Leta 1971 so Chevrel in sodelavci odkrili superprevodnost v (ternary – iz treh elementov) ternary molibdenovih sulfidih $M_xMo_6S_8$, kjer lahko M predstavlja veliko število kovin in redkih zemeljskih elementov. Delimo jih na feromagnetne in antiferomagnetne.

Največja posebnost teh je, da ko jih ohladimo pod T_c (tlak je tudi zelo pomemben), postanejo superprevodni, če pa jih še nadalje ohlajamo pod T_{Curie} , feromagnetni postanejo nesuperprevodni in kažejo feromagnetne lastnosti, antiferomagnetni pa pod T_N (Neel-ova temperatura) kažejo antiferomagnetne lastnosti, vendar lahko še vedno imajo tudi superprevodne lastnosti. Če jih še bolj ohladimo, pa obdržijo samo še antiferomagnetne lastnosti. [6] [11] [12]



Slika 2: Diagram za feromagnetne superprevodnike [11]



Slika 3: Diagram za antiferomagnetne superprevodnike[11]

3.4. Težki fermionski superprevodniki

Težke fermione sta odkrila Andres Graebner in Ott leta 1975 v CeAl_3 , superprevodnost v njih pa je prvi zaznal Bucher leta 1975 v UBe_{13} , a je to odkritje zavrgel, saj se ni skladalo z BCS teorijo, ki se je zdela edina prava teorija superprevodnosti v tem času. Že naslednje leto pa jo je Steglich potrdil v CeCu_2Si_2 .

Težki fermionski superprevodniki spadajo med nekonvencionalne superprevodnike in so sestavljeni iz redkih zemeljskih kovin in aktinoidov, na spletu je mogoče najti podatke o približno deset različnih težkih fermionski superprevodniki. Poleg teh desetih pa poznamo tudi še kar nekaj takih, ki jih dobimo tako, da določene elemente zamenjamo ali dodamo nove in na ta način dobimo nove superprevodnike. Na primer U in UBe_{13} lahko zamenjamo z Th in dobimo $\text{U}_{(1-x)}\text{Th}_x\text{Be}_{13}$. Ena najbolj zanimivih lastnosti pri njih je, da so lahko v normalnem stanju efektivne mase prevodnih elektronov stokrat večje od elektronske mase. Zato pravimo, da imajo "težke" fermione. [6] [13] [14] [15]

Spodaj je predstavljena tabela z najbolj znanimi težkimi fermionskimi superprevodniki, njihovimi T_c in po eno lastnostjo. [13]

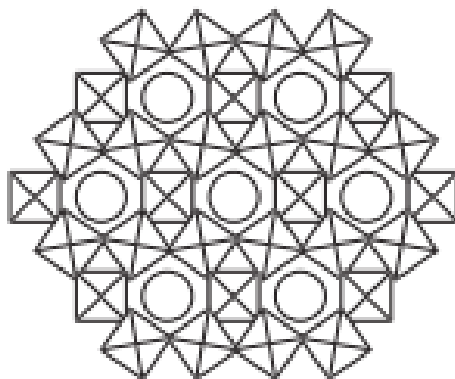
Material	TC (K)	Značilnost
CeCu_2Si_2	0,7	Prvi nekonvencionalni superprevodnik
CeCoIn_5	2,3	Najvišja T_c med vsemi težkimi fermioni na osnovi Ce
CePt_3Si	0,75	Prvi težki fermionski superprevodnik z necentrosimetrično kristalno strukturo
CeIn_3	0,2	Superprevoden le pri visokih tlakih
UBe_{13}	0,85	p-wave superprevodnik
UPt_3	0,48	Več različnih superprevodnih faz
URu_2Si_2	1,3	Skrivnostna 'faza skritega reda' pod 17 K
UPd_2Al_3	2,0	Antiferomagnetni pod 14 K
UNi_2Al_3	1,1	Antiferomagnetni pod 5 K

Tabela 2: Predstavitev najbolj razširjenih fermionskih superprevodnikov

3.5. Oksidni superprevodniki brez bakra

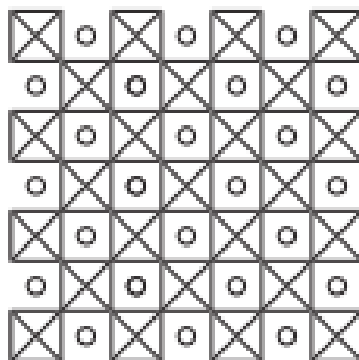
Superprevodniki tipa $A_x\text{WO}_3$ imajo heksagonalno strukturo iz volframovega brona, kjer se kot A uporabljajo veliki alkalni ioni, največkrat K, Rb in Cs. Večina jih ima T_c med 2 in 7 K. Monokristali perovskitnega WO_3 , dopirani z Na, v površinskem sloju $\text{Na}_{0,05}\text{WO}_3$ pa imajo T_c , ki znaša 91 K. $\text{Ba}_{(1-x)}\text{K}_x\text{BiO}_3$ (BKBO) pa ima $T_c = 31$ K. [6] [16]

Spodaj je predstavljena ena izmed pogostih zgradb te družine superprevodnikov.



Slika 4: Prikazuje strukturo natrijevega volframovega brona. Predstavljena je ena osnovna plast, ki jo tvorijo oktaedri MO_6 z velikimi ioni v votlinah.[6]

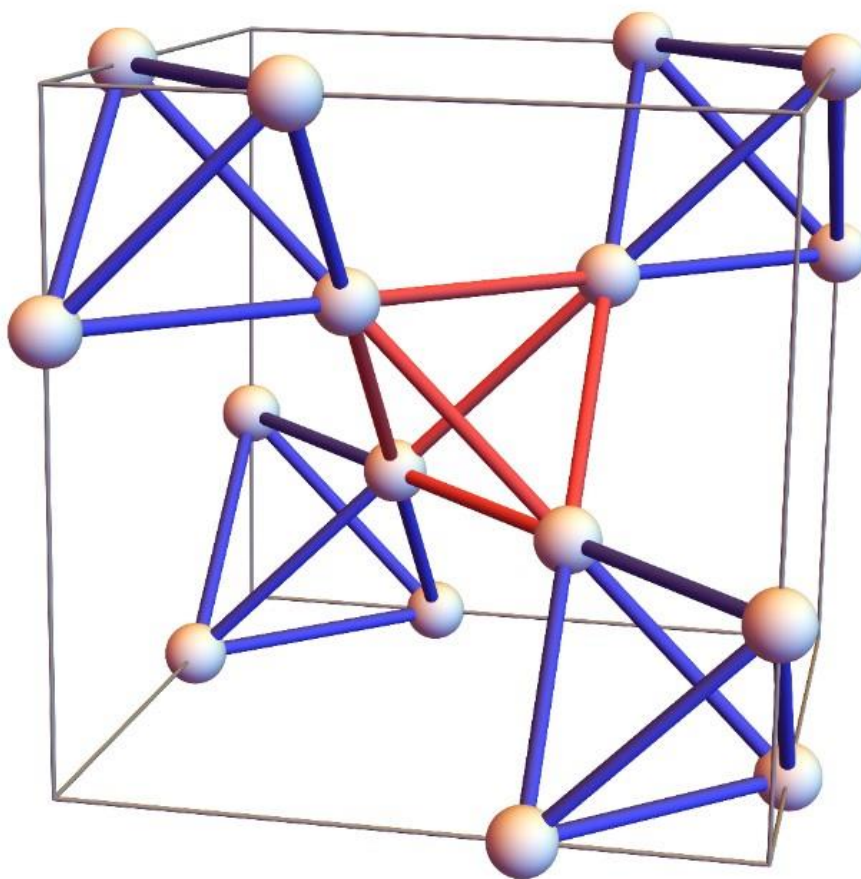
Lahko pa imajo tudi perovskitno strukturo, ki je prikazana na spodnji sliki, primer katere je $\text{BaPb}_{0,75}\text{Bi}_{0,25}\text{O}_3$.



Slika 5: Perovskitna struktura $\text{BaPb}_{0,75}\text{Bi}_{0,25}\text{O}_3$. [6]

3.6. Piklorni oksidni superprevodniki

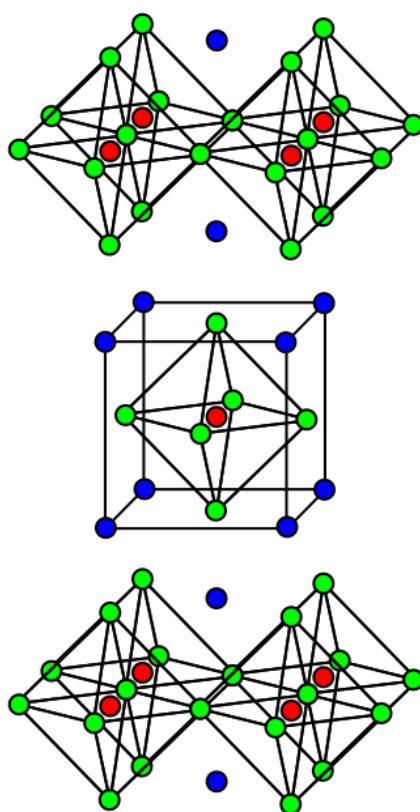
Lastnost piklornih oksidnih superprevodnikov je, da imajo piklorno kristalno mrežo (tetraedri, ki se stikajo v ogliščih). Eni izmed teh imajo kemijsko formulo $A_2B_2O_7$ ali $A_2B_2O_7O'$, kjer je A večji kation, B pa manjši kation (običajno 5d-prehodna kovina, kot na primer Re, Os ali Ir), primer teh sta $Cd_2Re_2O_7$ ($T_c = 1$ K) in KOs_2O_6 ($T_c = 9,60$ K). Lahko pa imajo tudi kemijsko formulo AOs_2O_6 , kjer je A enovalentna alkalna kovina, kot so Cs, Rb, in K. Pri tem moramo vedeti, da ima Os ion frakcijsko stopnjo oksidacija, +5,5, ki se nahaja v vmesnem stanju med $5d^2$ in $5d^3$, kar vpliva na lastnost materiala. Poleg teh pa v to skupino spadajo tudi drugi materiali s piklorno mrežo. [6] [17]



Slika 6: Piroklorna mreža [17]

3.7. Ruteno-kuprati

Spojina Sr_2RuO_4 ($T_c \sim 1 \text{ K}$) je edini primer slojevitga perovskita brez bakra, ki je superprevodna. Ta spojina se nanaša na razred samodopiranih prevodnikov. Vloga elektronske korelacije (Elektronska korelacija je interakcija med elektroni v elektronski strukturi kvantnega sistema.) v primerjavi s kuprati ni pomembna. S pomočjo dopiranja pa poznamo tudi hibrid trojni perovskit (hibridni ruteno-kupratni superprevodnik) $\text{RuSr}_2\text{GdCu}_2\text{O}_8$, ki je sestavljen iz superprevodnih plasti CuO_2 in feromagnetnih plasti RuO_2 . Pri tem superprevodnost obstaja sočasno z elektronskim feromagnetizmom v mikroskopskem merilu. Sr_2RuO_4 pa lahko dopiramo tudi z drugimi spojinami in elementi. [6] [18]



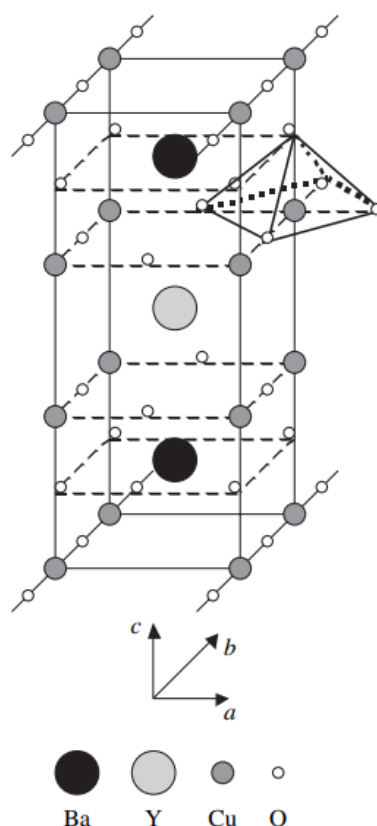
Slika 7: Sr_2RuO_4 [18]

Rutenijevi ioni so rdeči, stroncijevi ioni so modri, kisikovi ioni pa zeleni.

3.8. Visoko temperaturni superprevodniki

Pri visoko temperaturnih superprevodnikih moramo biti pazljivi, ali govorimo glede na zgradbo ali pa na temperaturo, pri kateri postanejo superprevodni. Če govorimo glede na T_c , potem so to tisti, ki postanejo superprevodni pri 77 K ali višje.

Če pa govorimo glede na zgradbo, so to večinoma keramični materiali, ki imajo perovskitno, močno anizotropno kristalno strukturo, ki določa večino njihovih fizikalnih in mehanskih lastnosti. Vsi vsebujejo ravnine CuO_2 , ki so med seboj ločene z ravninami drugih atomov (na primer: Ba, Y, La ...). Imajo relativno visoka T_c in velik del jih ima T_c nad 77 K, kar omogoča hlajenje s tekočim dušikom namesto z veliko dražjim helijem, ki se uporablja za večino drugih superprevodnikov. Imajo pa veliko slabost, tako kot preostala keramika so občutljivi na udarce in se ob zadostni sili zlomijo hitreje, kot na primer kovinski superprevodniki. Prav tako je njihovo oblikovanje v žice skoraj nemogoče oziroma zelo zakomplicirano. Eni izmed najbolj znanih visoko temperaturnih superprevodnikov so: $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (BSCCO), $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO). Postopek priprave YBCO pa bo predstavljen tudi v praktičnem delu seminarske naloge. [6] [19] [20]



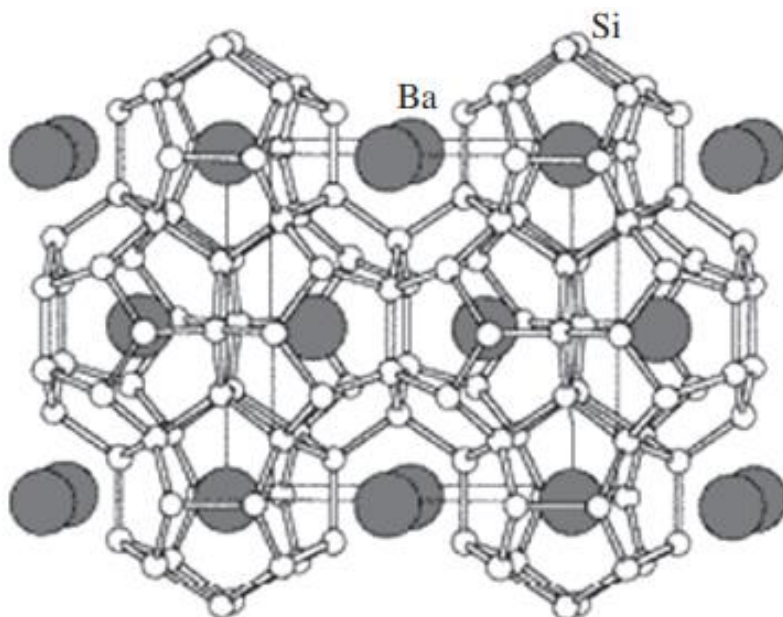
Slika 8: Grafični prikaz zgradbe celice YBCO [6]

3.9. Borokarbidi redkih zemeljskih elementov

Borokarbidi redkih zemeljskih elementov imajo molekulsko formulo $\text{ReNi}_2\text{B}_2\text{C}$ (kjer je $\text{Re} = \text{Y, Lu, Tm, Er, Ho}$ ali Dy) in imajo $T_c \approx 16 \text{ K}$. Lahko pa imajo namesto Ni tudi kateri drug element, kot je na primer Pd . Če imajo Ni , govorimo o redkih zemeljskih nikljevih borokarbidih. [6]

3.10. Superprevodniki na osnovi silicija

So superprevodne spojine, ki vsebujejo silicij. Najprej so odkrili ThSi_2 z $T_c = 1.56 \text{ K}$. Kar nekaj časa je bil edini, nato so odkrili, da lahko CaSi_2 z $T_c = 14 \text{ K}$ pri $P > 12 \text{ GPa}$. Lahko pa imamo tudi strukture M_xSi_{46} in $\text{M}_x\text{Si}_{136}$ (kjer je $\text{M} = \text{Na, K, Rb, Cs}$). Če v strukture z Na ali K dopiramo Ba , lahko dobimo superprevodnike $\text{Na}_2\text{Ba}_6\text{Si}_{46}$ in $\text{Ba}_8\text{Si}_{46}$ z T_c 4 in 8 K . [6]



Slika 9: Kristalna struktura $\text{Ba}_8\text{Si}_{46}$ [6]

3.11. Halkogeni superprevodniki

So elementi VI skupine. Ko govorimo o superprevodnikih halkogenih elementov, imamo v mislih S, Se in Te ter njihove spojine. Superprevodnost žvepla s $T_c = 10$ K nastane pri tlaku 93 GPa, pri tlaku 200 GPa pa doseže vrednost T_c doseže pri 17,3 K, pri nadaljnjem povečanju tlaka se T_c ponovno zniža na 15 K. Podobne odvisnosti T_c od tlaka opazimo pri Se in Te. Na primer superprevodnost Se pri 15–25 GPa ima T_c v območju med 4 – 6 K, če pa tlak povečamo na > 150 GPa, T_c naraste na 8 K. Superprevodni kompoziti C/S, izdelani iz stisnjenih praškov grafita in žvepla (23 ut. %), sintetizirani v argonu, kažejo superprevodnost pri $T_c = 35$ K. Leta 2020 pa je bil objavljen članek o superprevodniku, ki deluje pri 14,7 °C pod visokim tlakom in vsebuje žveplo. Več podatkov o tem superprevodniku je opisano v nadaljevanju raziskovalne naloge pod naslovom Superprevodniki pri sobni temperaturi. [6]

3.12. Ogljikovi superprevodniki

Ogljikovi superprevodniki so tisti, ki vsebujejo ogljik, najpogosteje v obliki C_{60} . Ti superprevodniki imajo kemijsko formulo A_3C_{60} . Primeri teh so Rb_2CsC_{60} s T_c 31,3K, Rb_3C_{60} 29,4 K in Rb_2KC_{60} 26,4 K. Z zamenjavo atomov in dodajanjem elektronov pa so dosegli T_c 117 K. [6]

3.13. MgB_2 in sorodni superprevodniki

Naslednja skupina so superprevodniki, ki vsebujejo MgB_2 in spojine, ki imajo podobne lastnosti, kot na primer BeB_2 . Superprevodni sistem MgB_2 je bil odkrit leta 2001 in je superprevoden pod T_c 39K. [6]

4. LASTNOSTI SUPERPREVODNIKOV

4.1. Vpliv magnetnega polja

Pri vplivu magnetnega polja je zelo pomembna delitev na tip I in tip II. Pri tipu I je magnetno polje popolnoma izrinjeno iz notranjosti superprevodnika, če pa prodre v notranjost materiala, ta v trenutku izgubi svoje superprevodne lastnosti in preide v normalno stanje. Prav tako ima tip I v primerjavi s tipom II nizko »toleranco« na magnetno polje in je to tudi ena njegovih največjih slabosti, saj predstavlja veliko oviro pri uporabnosti materialov za namene tehnologije. Že majhno magnetno polje, ustvarjeno od toka električne energije, lahko v določenih superprevodnikih tega tipa ustvari dovolj veliko magnetno polje, da ta prodre v notranjost in material preide v normalno stanje. Tip II pa ima dve kritični magnetni polji. Zgornje kritično magnetno polje (H_{c2}) in spodnje kritično magnetno polje (H_{c1}), ki bo razloženo v nadaljevanju.

Če pri temperaturi, ki je višja od kritične temperature, to pomeni, da material ni v superprevodnem stanju, čez obroč spustimo magnetno polje in zmanjšamo temperaturo pod T_c , ter odstranimo zunanje magnetno polje, bo to magnetno polje ujeto v superprevodniku, dokler se ta ne segreje toliko, da ni več v superprevodnem stanju. [21] [22] [33]

4.2. Kritični tok

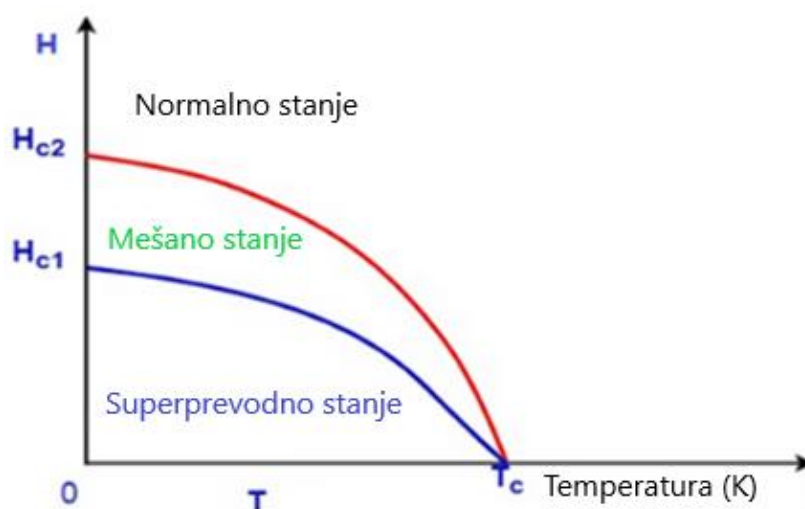
V skladu z Amperovim zakonom vsak električni tok inducira magnetno polje, vendar superprevodniki to polje izključujejo. V mikroskopskem merilu magnetno polje ni popolnoma enako nič na robovih katerega koli vzorca – velja Londonova globina prodiranja (London penetration depth ali globina prodiranja). Za superprevodnik tipa I mora tok ostati v superprevodnem materialu nič (da je združljiv z ničelnim magnetnim poljem), vendar lahko nato na robovih materiala pride do prodora in dosežemo vrednosti, ki niso nič, ko magnetno polje naraste. Dokler je inducirano magnetno polje na robovih manjše od kritičnega polja, material ostane superprevoden, toda pri višjih tokovih postane polje premočno in superprevodno stanje se izgubi. Ta omejitev gostote toka ima pomembne praktične posledice pri uporabi superprevodnih materialov, kljub temu da je upor enak nič, ne morejo prenašati neomejenih količin električne energije. [23] [33]

4.3. Kritično magnetno polje

Za določeno temperaturo se kritično magnetno polje nanaša na največjo jakost magnetnega polja, pod katero material ostane superprevoden. Za superprevodnost je značilna popolna prevodnost (ničelna upornost) in popolno izločanje magnetnih polj (Meissnerjev učinek). Spremembe temperature ali gostote magnetnega pretoka lahko povzročijo fazni prehod med normalnim in superprevodnim stanjem. Pri kritični temperaturi pa bo tudi najšibkejše zunanje magnetno polje uničilo superprevodno stanje. Ko se temperatura znižuje, se kritično polje zvišuje na največ pri absolutni ničli. Zato se ponekod v industriji superprevodnike hladi na polovico kritične temperature. Če je magnetno polje premočno, ga superprevodnik ne more izločiti in ga to prede.

Superprevodniki tipa I imajo samo eno kritično polje. To pomeni, da ko je pri določeni temperaturi doseženo določeno magnetno polje, v trenutku pride do prehoda v nesuperprevodno stanje. Dokler je ta vrednost pod kritično mejo, material popolnoma izloča vso magnetno polje in to ne more prehajati skozenj, razen če je debelina superprevodnika manjša od Londonove globine prodiranja. Če želimo povečati maksimalno moč magnetnega polja, ki še ne poruši ravnovesja, moramo zelo zmanjšati temperaturo, a tudi pri tem pri večini superprevodnikov tega tipa ta količina ni primerljiva s tipom II.

Pri tipu II pa je lahko magnetno polje izrinjeno iz notranjost superprevodnika v celoti ali le delno in bo material še vedno obdržal svoje lastnosti. Tip II ima namreč 2 kritični magnetni polji. Pod prvim kritičnim magnetnim poljem (H_{c1}) se material obnaša kot tip I in popolnoma izvrže magnetno polje iz svoje notranjosti, zaznamo lahko popoln Meissnerjev efekt, med prvim in drugim kritičnim poljem (H_{c2}), pa magnetno polje lahko delno prehaja skozi superprevodnik v tako imenovanih pretočnih ceveh (ang. flux tube). Pri tem material preide v mešano stanje. Kjer magnetno polje prehaja skozi, je material v navadnem, nesuperprevodnem stanju, drugje pa je v superprevodnem stanju. Bližje smo H_{c2} , večji del materiala je v navadnem stanju. Ko pa dosežemo H_{c2} , pa material v celoti izgubi svoje superprevodne lastnosti.



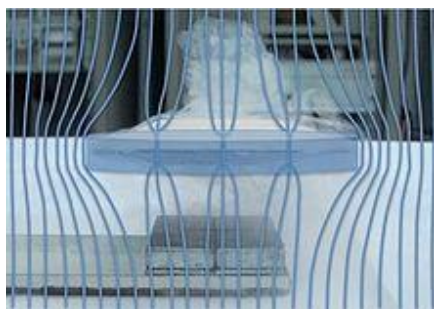
Slika 10: Kritično magnetno polje pri tipu II [4]

Kritično polje je določeno za valjasti vzorec s poljem, vzporednim z osjo radialne simetrije. Prvo, nižje kritično polje, se pojavi, ko vrtinci magnetnega pretoka prodrejo v material, vendar material ostane superprevoden zunaj teh mikroskopskih vrtincev. Ko gostota vrtincev postane

prevelika, postane celoten material neprevoden, to ustreza drugemu, višjemu kritičnemu polju. Gostota vrtinca se povečuje z višanjem poljske jakosti. Pri višjem kritičnem polju H_{c2} se superprevodnost popolnoma izniči. Superprevodniki tipa II prav zaradi te lastnosti v mešanem stanju ne kažejo popolnega Meissnerjevega učinka. [4] [24] [33]

4.4. Pripenjanje toka v magnetnem polju (angl. Flux pinning)

V mešanem stanju tipa II postane mogoč pojav, znan kot pripenjanje toka (angl. Flux pinning). To pri superprevodnikih tipa I ni mogoče, saj v njih ne more prodrati magnetno polje, razen če so dovolj tanki, tako da je Londonova globina prodiranja (angl. London penetration depth), ki nam pove, kako globoko magnetno polje prodre v superprevodnik (ta je običajno med 50 in 500 nm), enaka debelini superprevodnika tipa I. To pomeni, da magnetno polje prodre skozi superprevodnik in ustvari tako imenovane pretočne cevi (angl. flux tubes), to so cilindrične cevke, skozi katere teče magnetno polje. Vsaka nosi kvant magnetnega pretoka (angl. Magnetic flux quantum). Kvant magnetnega pretoka je v superprevodnosti konstanta, in sicer ima vrednost $\approx 2,067\,833\,848 \dots \times 10^{-15}$ Wb. Pretočne cevi se ne premikajo po superprevodniku in so konstantno na istem mestu, lahko se le pojavijo nove (če se magnetno polje poveča) ali pa izginejo (če se magnetno polje, ki mu je superprevodnik izpostavljen, zmanjša). To lahko omogoči, da se superprevodnik "obesi" na magnet. Število pretočnih cevi na enoto površine je sorazmerno z magnetnim poljem s konstanto sorazmernosti, ki je enaka kvantu magnetnega pretoka. Možnosti uporabe "pritrditve toka" je zelo velika, uporabljali bi jo lahko za namene, kot so dvigala, spoji brez trenja in prevoz. Tanjša je superprevodna plast, močnejši je učinek. Pripenjanje toka je velikokrat zaželen pojav, saj preprečuje učinek, znan kot drsenje toka (angl. flux creep) (superprevodnik drsi nad magnetom), kar omejuje uporabnost visoko temperaturnih superprevodnikov (vendar če je uporabljena dovolj velika sila, lahko še vedno dosežemo drsenje superprevodnika). Da se temu izognemo, želimo magnetno polje ohraniti med spodnjo (prvo) kritično mejo (H_{c1}) in zgornjo (drugo) kitično mejo (H_{c2}). Na preprostem disku debeline 1 mikrometra s premerom 76 milimetrov, zraven magnetnega polja 28 kA /m, je približno 100 milijard cevk, ki lahko držijo 70 000-krat večjo težo od superprevodnikove. [25] [26] [33]



Slika prikazuje diagram pritrditev toka. Magnetno polje ne more prehajati skozi superprevodnik po celotni površini, ampak le na območjih, znanih kot pretočne cevi (angl. flux tubes), kar superprevodnik pritrdi nad magnet.

Slika 11: Pritrditev toka [25]

4.5. Vpliv izotopa

Na superprevodnost vpliva tudi vrsta izotopa v materialu. Do tega pride, saj je superprevodnost povezana z nihanjem mreže materiala in pari elektronov, na kar vpliva število nevtronov. Znan vpliv imajo na spremembo kritične temperature, spreminjanje le-te je odvisno od vrste superprevodnika. Ta sprememba sicer običajno ni zelo velika, a pri določenih superprevodnikih lahko doseže znižanje T_c za tudi 1K. Primer tega sta $Mg^{11}B_2$ in $Mg^{10}B_2$ ($T_c(11B)=37.5$ K, $T_c(10B)=38.5$ K). [27] [28]

4.6. Diamagnetizem in njegova uporaba

Diamagnetizem je zelo šibka oblika magnetizma, ki jo povzroči sprememba orbitalnega gibanja elektronov zaradi zunanjega magnetnega polja. Ta vrsta magnetizma ni trajna in vztraja le v prisotnosti zunanjega magnetnega polja.

Diamagnetizem je prisoten v vseh materialih, vendar je pri večini prešibek za enostavno opazovanje. Diamagnetizem se najlažje opazuje pri diamagnetnih snoveh, ki ne kažejo drugih oblik magnetizma in vsebujejo atome, ki nimajo neto magnetnih momentov, to pomeni, da imajo vse orbitale polne in nimajo neparnih elektronov. Ko so izpostavljene magnetnemu polju ustvarijo negativno magnetizacijo in je občutljivost negativna.

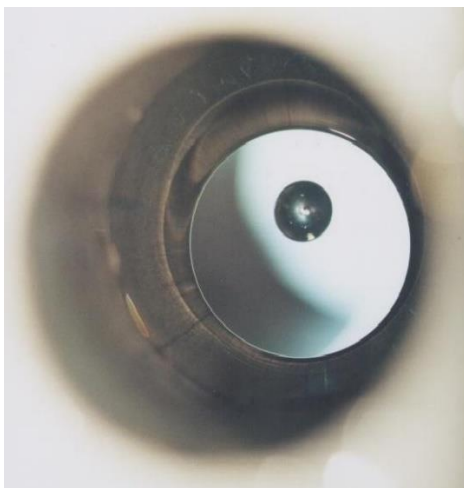
Glede šibkosti diamagnetizma pa so superprevodniki izjema. Superprevodniki tipa I so popolnoma diamagnetni, prav tako so popolnoma diamagnetni superprevodniki tipa II pod spodnjim kritičnim poljem med spodnjim in zgornjim kritičnim poljem pa so zelo dobri diamagneti, a ne popolni, saj lahko magnetno polje prodre čez njih. Prav zaradi teh lastnosti so zelo uporabni, saj so eni najboljših diamagnetnih materialov.

Običajno velja, da večje, kot je zunanje magnetno polje, večji je učinek diamagnetizma. Vendar se moramo zavedati, da če delamo s superprevodniki, lahko preveliko magnetno polje uniči učinek superprevodnosti in je materiale treba ohladiti še na nižjo temperaturo kot sicer. [29]

Ob dovolj velikem zunanjem magnetnem polju pa lahko zaradi učinka diamagnetizma lebdijo tudi snovi, za katere levitacija ni značilna. Znanstveniki so s pomočjo diamagnetizma uspeli doseči levitacijo vode, jagode, paradižnika in celo še žive žabe, ki pa v poskusu ni bila poškodovana. Ker diamagnetizem nastaja zaradi obnašanja elektronov in ti vplivajo na atome, je vsak atom posebej učinkovan s strani diamagnetizma. Diamagnetizem na nivoju atomov in molekul nasprotuje učinku gravitacije in zato sam proces ni boleč. Znanstveniki celo raziskujejo učinke mikrogravitacije na žive organizme, saj je diamagnetizem še najbližje znanstvenofantastični antigravitaciji in ne zahteva dragih izstrelitev raket in vesoljskih postaj za raziskovanje njenih učinkov v vesolju. [30]



Slika 12: Še živa žaba lebdi v mikrogravitaciji [30]



Slika 13: Kaplja vode lebdi v mikrogravitaciji [30]

Velikokrat slišimo, kako škodljiva je mikrogravitacija, največkrat v kontekstu negativnih vplivov na zdravstveno stanje astronautov, ki so ji dolgo izpostavljeni in tudi bistveno otežuje potovanje po vesolju.

Vendar pa ima tudi določene dobre učinke.

Študije so pokazale, da se v mikrogravitaciji določeni encimi, proteini in beljakovine obnašajo drugače. Določenih se proizvede več in določenih manj, spet drugi zavirajo ali pa pospešujejo delovanje drugih proteinov. Prav to ima velike učinke na rakave celice.

Določene študije so pokazale, da se v mikrogravitaciji proizvede drugačna količina proteinov kot v normalnem okolju in to lahko upočasni razmnoževanje določenih rakavih obolenj. Razmnoževanje teh celic se lahko upočasni ali pa celo ustavi na določeni stopnji celičnega cikla. Prav tako rakave celice slabše komunicirajo med seboj in so bolj občutljive na določena zdravila, kar jih naredi lažje tarče. V medicini že nekaj časa preučujejo delovanje mikrogravitacije na področju zdravljenja in preučujejo različne načine doseganja le-te v človeškem telesu. Opozarjajo pa, da je na tem področju premalo znanega in se vse vrste rakavih celic ne odzivajo enako na mikrogravitacijo. Nekatere so zelo prizadete in lažje podležejo učinkom zdravljenja, vendar se nekatere vrste rakavih obolenj širijo še hitreje, do tega pride zaradi različnih razlogov, kot na primer večja proizvodnja določenih proteinov. Primer takega raka je pljučni rak, ki se v mikrogravitaciji širi še hitreje. Vendar pa mikrogravitacija ostaja pomembna možnost zdravljenja določenih vrst raka in lahko prinese novo upanje bolnikom z rakom. [31]

4.7. Superprevodniki pri sobni temperaturi

Znanstveniki so leta 2020 poročali o prvem superprevodniku, ki deluje pri sobni temperaturi. Delovati začne že pri temperaturi nižji od $14,7^{\circ}\text{C}$, vendar je za njegovo delovanje potreben tlak 2,6-milijonkrat večji od tlaka zemeljske atmosfere. Dias in sodelavci so superprevodnik oblikovali tako, da so med vrha dveh diamantov stisnili ogljik, vodik in žveplo in z laserjem udarili v material, da so sprožili kemične reakcije. Pri približno 2,6 milijona barov in temperaturah pod približno $14,7^{\circ}\text{C}$ je električni upor izginil. Da so se še dodatno prepričali, so ga izpostavili močnemu magnetnemu polju in kritična temperatura se je kot pričakovano znižala. Ekipa je na materialu uporabila tudi nihajoče magnetno polje in pokazala, da je material, ko je postal superprevodnik, iztisnil to magnetno polje iz svoje notranjosti, kar je še en znak superprevodnosti. [32]



Slika 14: Superprevodnik pri sobni temperaturi [32]

5. UPORABA

Superprevodniki se uporabljajo na mnogih tehnoloških področjih. Uporabljajo se pri vlakih MAGLEV, to so zelo hitri vlaki, ki s pomočjo močnega magnetnega polja lebdiijo nad tiri, zaradi lebdenja pa nimajo trenja, kar omogoča velike hitrosti. V prihodnosti načrtujejo, da bodo ti potovali v posebnih ceveh v skorajšnjem vakumu, kar bo omogočalo hitrosti tudi do 1000 km/h.

Uporabljajo se tudi kot močni elektro magneti in za prenos energije. Ker nimajo upora, nimajo izgub in se ne segrevajo. Z njihovo pomočjo bomo v prihodnosti lahko prenašali velike količine električne energije brez vsakršnih izgub.

Najdemo jih tudi v zdravstvu v napravah za magnetno resonanco zaradi možnosti sprememb v magnetnem polju. Zaradi teh lastnosti se uporabljajo tudi v zelo natančnih detektorjih magnetnega polja in v vojski za razne namene, kot na primer detekcijo podvodnih min.

Z njimi gradijo eksperimentalne fuzijske reaktorje, saj omogočajo, da se delci zaradi močnega diamagnetizma ne dotikajo sten reaktorja, kar olajšuje zadrževanje energije delcev, ki je potrebna za fuzijo.

Ameriška mornarica jih uporablja za izdelavo eksperimentalnih orožij, znanih kot »electromagnetic railgun cannon«.

Superprevodniki imajo velik potencial tudi v računalništvu. Google je razvil kvantni računalnik, ki deluje s pomočjo superprevodnikov in ki lahko opravi matematičen izračun, tako zapleten, da bi ga trenutno najmočnejši superračunalnik v Ameriki, znan kot Summit, opravljal 10000 let, v 200 sekundah. To pomeni, da je Googlov kvantni računalnik 158- milijonkrat hitrejši. Vendar lahko trenutno opravlja le zelo specifične naloge in ni primeren za splošno rabo.

6. EKSPERIMENTALNI DEL

6.1. SINTEZA 1

6.1.1. Inventar

Čaša, 600 ml	Magnetno mešalo z grelcem	Steklena palčka	Merilni valj, 100 ml
Analizna tehtnica, $d = 0,0001\text{g}$	Laboratorijsko stojalo	Filtrirni obroč	Kvantitativni lij
Sušilnik	Eksikator	Talilni mikroskop	Urno steklo, 3x
Terilnica in pestilo	Čaša, 1000mL		

Tabela 3: Inventar za sintezo s pirolizo

6.1.2. Postopek

Da pridobimo itrijev nitrat, v čašo damo itrijev oksid in v čašo damo magnetno mešalo ter ga vklopimo. Nalijemo 200 ml vode in 100 ml koncentrirane dušikove(V) kisline ter pustimo nekaj minut. Nato dodamo itrijev oksid in segrevamo. Iz te reakcije dobimo itrijev nitrat $\text{Y}(\text{NO}_3)_3$. S pomočjo itrijevega (III) nitrata pripravimo nasičeno raztopino. Dodamo toliko koncentrirane dušikove(V) kisline, da dobimo čisto raztopino. Raztopino nato prefiltriramo in segrevamo toliko časa, da spari večina vode. S palčko mešamo toliko časa, da se začnejo tvoriti kristali in nato pustimo stati čez noč. Dobljene kristale dobimo s pomočjo filtracije z znižanim tlakom, ki jih posušimo in shranimo v eksikator, da preprečimo vezavo zračne vlage. S pomočjo talilnega mikroskopa preverimo, ali se tališče kristalov sklada s teoretičnimi ali ne. S tem ugotovimo možne nečistoče v vzorcu $\text{Y}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. želimo imeti samo $\text{Y}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ da lahko preko množinskega razmerja izračunamo potrebno maso.

225 ml destilirane vode zlijemo v čašo z magnetnim mešalom in vklopimo mešalo. Nato vanj dodamo 57,3075 g bakrovega nitrata in nekaj kapljic dušikove(V) kisline, da se znebimo bakrovega karbonata, ki nastane. Dodamo 41,3178 g barijevega nitrata in segrevamo na električni plošči. Po segrevanju dodamo 30,2819 g itrijevega (III) nitrata. Počakamo nekaj minut in dodamo citronsko kislino. Počasi dodajamo raztopino amonijaka, da uravnamo pH vrednost med 6,5 in 7. Reakcija je močno eksotermna, zato raztopine ne dodajamo prehitro. Dobimo temno modro raztopino. Počakamo, da se raztopina ohladi in jo prefiltriramo. Raztopino razdelimo v manjše paralelke po 50 ml v 1000 ml čaše. Posamezno paralelko segrevamo toliko časa, da izpari večina vode, kar povzroči reakcijo. V digestoriju s palčko previdno zmešamo produkt in ga damo v skupno prahovko. Vzorec uporabimo pri izdelavi manjših tablet, ki jih dobimo s pomočjo tabletirke.

6.1.3. Tabletiranje vzorca

Za vsako tableto zatehtamo 0,200 g vzorca. Tehtamo na analizni tehtnici v keramične ladjice, nato pripravimo kalup za tabletiranje tako, da ga najprej očistimo z alkoholom, raztopljenim v stearinski kislini, zaščitno ovojko postavimo na podporno ploščo in vanjo spustimo vmesnik. V zaščitno ovojko nato nasujemo količino prahastega vzorca, ki smo jo zatehali, vanjo spustimo še drugi vmesnik in drog za stiskanje. Kalup za tabletiranje previdno prenesemo pod prešo in ga pritrdimo, da se ne more premikati, vzorec stisnemo, kalup vzamemo iz preše in iz kalupa dobimo vzorec. Kalup zopet očistimo z alkoholom, raztopljenim v stearinski kislini.

6.1.4. Oksidacija v peči

Pripravimo komorno peč in vanjo damo produkt in pričnemo s segrevanjem do 920 °C eno uro in nato vzdržujemo pri tej temperaturi 10 ur, po tem času pričnemo počasi ohlajati po 50 °C na uro, dokler se peč ne ohladi do sobne temperature. Tabletiranje, sintranje in Meissnerjev efekt sva opravila na Fakulteti za kemijo in kemijsko tehnologijo v Ljubljani, na Katedri za anorgansko kemijo.

6.1.5. Meissnerjev efekt, preizkus superprevodnosti

Supeprevodnost vzorcev dokažemo z Meissnerjevim efektom. V laboratorijsko stojalo vpnemo epruveto z dvojnim dnom, ki ima na dnu magnet. V epruveto počasi nalijemo tekoči dušik in po določenem času dodam tabletko vzorca ter počakamo, da se le-ta ohladi. Lebdenje nad magnetom je dokaz, da je vzorec superprevoden.



Slika 15: Superprevodnik YBCO lebdi nad magnetom, lasten arhiv

6.1.6. Račun

$$m(Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O) = 30,2819 \text{ g}$$

$$n(Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O) = m/M = \frac{30,2819 \text{ g}}{383,05 \text{ g/mol}} = 0,07905 \text{ mol}$$

$$\frac{n(Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O)}{n(Ba(NO_3)_2)} = \frac{1}{2} \Rightarrow n(Ba(NO_3)_2) = 2 * 0,07905 \text{ mol} = 0,1581 \text{ mol}$$

$$m(Ba(NO_3)_2) = 0,1581 \text{ mol} * 261,34 \text{ g/mol} = 41,3179 \text{ g}$$

$$\frac{n(Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O)}{n(Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O)} = \frac{1}{3} \Rightarrow n(Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O) = 3 * 0,07905 \text{ mol} = 0,2372 \text{ mol}$$

$$m(Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O) = 0,2372 \text{ mol} * 241,60 \text{ g/mol} = 57,3075 \text{ g}$$

6.2. Sinteza 2

6.2.1. Inventar

Analizna tehtnica d = 0,001 g	Spatula	Žlička	Ahatna terilnica s pestilom
Keramične ladjice			

Tabela 4: Inventar za sintezo 2

6.2.2. Postopek

Pri pripravi superprevodnika z oksidoma in karbonatom na analizni tehtnici zatehtamo 0,2003 g itrijevega oksida, 0,6999 g barijevega karbonata in 0,4236 g bakrovega oksida. Vse tri reagentne v ahatni terilnici mešamo toliko časa, da postanejo homogenizirani. Ko imamo pripravljeno homogenizirano zmes, tabletiramo tablete. Tablete damo v komorno peč na posebnem podstavku, ki je odporen na vročino in v toku zraka počasi segrevamo do 920 °C eno uro in pustimo pri tej temperaturi za 10 ur. Nato peč počasi ohlajamo po 50 °C na uro, dokler ne dosežemo sobne temperature.



Slika 16: Podstavek na katerem damo tablete v peč, lasten arhiv.

6.2.3. Tabletiranje vzorca

Za vsako tableto zatehtamo 0,200 g vzorca. Tehtamo na analizni tehtnici v keramične ladjice, nato pripravimo kalup za tabletiranje tako, da ga najprej očistimo z alkoholom, raztopljenim v stearinski kislini, zaščitno ovojko postavimo na podporno ploščo in vanjo spustimo vmesnik. V zaščitno ovojko nato nasujemo količino prahastega vzorca, ki smo jo zatehali, vanjo spustimo še drugi vmesnik in drog za stiskanje. Kalup za tabletiranje previdno prenesemo pod prešo in ga pritrdimo, da se ne more premikati, vzorec stisnemo, kalup vzamemo iz preše in iz kalupa dobimo vzorec. Kalup zopet očistimo z alkoholom, raztopljenim v stearinski kislini.

Supeprevodnost vzorcev dokažemo z Meissnerjevim efektom. V laboratorijsko stojalo vpnemo epruveto z dvojnim dnom, ki ima na dnu magnet. V epruveto počasi nalijemo tekoči dušik in po določenem času dodam tabletko vzorca ter počakamo, da se le-ta ohladi. Lebdenje nad magnetom je dokaz, da je vzorec superprevoden.

Tabletiranje, sintranje in Meissnerjev efekt sva opravila na Fakulteti za kemijo in kemijsko tehnologijo v Ljubljani, na Katedri za anorgansko kemijo.

6.2.4. Meissnerjev efekt, preizkus superprevodnosti

Supeprevodnost vzorcev dokažemo z Meissnerjevim efektom. V laboratorijsko stojalo vpnemo epruveto z dvojnim dnom, ki ima na dnu magnet. V epruveto počasi nalijemo tekoči dušik in po določenem času dodam tabletko vzorca ter počakamo, da se le-ta ohladi. Lebdenje nad magnetom je dokaz, da je vzorec superprevoden.



Slika 17: Superprevodnik YBCO lebdi nad magnetom, lasten arhiv

7. MERITVE

7.1. Superprevodnost

Vrsta sinteze	Superprevodnost dokazana z meissnerjevim efektom (DA/NE)
Piroliza	DA
Z oksidoma in karbonatom	NE

7.2. Talilna temperatura kristalov $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$

Talilna temperatura kristalov $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ na talilnem mikroskopu bi po teoriji morala znašati 51,8 °C. Na talilnem mikroskopu sva izmerila temperaturo 3 paralelkam.

Paralelka	1	2	3
Temperatura tališča v °C	52,0	52,1	52,0

Tabela 5: Talilna temperatura kristalov $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ na talilnem mikroskopu

Do manjših odstopanj je najverjetneje prišlo, ker naprava že nekaj časa ni bila umirjena. Naslednja stopnja $Y(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ pa ima talilno temperaturo 80 °C.

7.3. Masa kemikalij

7.3.1. Sinteza s pirolizo

Kemikalija	Masa (g)
Y_2O_3	
$Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$	30,2819
$Cu(NO_3)_2$	57,3075
$Ba(NO_3)_2$	41,3179
Citronska kislina (CH_3COOH)	100g
Dušikova(V) kislina ($HNO_{3(ag)}$)	/
Raztopina amonijaka	/

Pri sintezi superprevodnika količine dušikove kisline ne merimo, dodamo je le nekaj kapljic (5-10). Pri nitriranju Y_2O_3 , pa jo dodajamo toliko časa, da se ves Y_2O_3 raztopi, nato pa jo dodamo še 10 ml, da jo imamo v presežku, s tem se prepričamo, da se ves itrijev oksid nitrira.

Prav tako ne merimo dodane količine raztopine amonijaka. Dodajamo ga toliko časa, da pH naraste na 6,5 do 7.

Če delamo majhne količine, lahko pri sintezi s pirolizo, uporabimo 10-krat manj vseh kemikalij.

Če uporabimo že kupljen itrijev nitrat, itrijevega oksida ne potrebujemo. Glede na izračun željenega itrijevega nitrata ga uporabimo malo več, saj bomo imeli manjše izgube (na stenah čaše).

7.3.2. Sinteza 2

Kemikalija	Masa (g)
Y_2O_3	0,2003
CuO	0,6999
$BaCO_3$	0,4236

7.4. Meritve časa

Pri praktičnem delu, sva merila čas potreben za izvedbo, s štoparico na mobilnemu telefonu. Podatki za posamezno delo in čas potreben zanj, so zapisani v tabelah.

7.4.1. Sinteza s pirolizo

Delo	Potreben čas (h)
Nitriranje in sušenje $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$	23,5
Delo s talilnim mikroskopom	0,5
Piroliza vključno s tabletiranjem	10
Čas v peči	24
Skupaj	58

7.4.2. Sinteza z oksidoma in s karbonatom

Delo	Potreben čas (h)
Sinteza vključno s tabletiranjem	0,5
Čas v peči	24
Skupaj	24,5

8. REZULTATI

8.1. Talilna temperatura kristalov $\text{Y}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Paralelka	1	2	3
Temperatura v °C	52,0	52,1	52,0

Tabela 6: Talilna temperatura kristalov $\text{Y}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ na talilnem mikroskopu

8.2. Superprevodnost vzorcev

Pri sintezi s pirolizo sva sintetizirala superprevodnik YBCO. Pri maissnerjevemu efektu je lebdel, kar dokazuje, da je dobro oksidiran in superprevoden.



Slika 18: Superprevodnik YBCO lebdi nad magnetom, lasten arhiv

Pri sintezi s karbonatom in oksidoma sva sintetizirala superprevodnik YBCO. Pri maissnerjevemu efektu je lebdel, kar dokazuje, da je dobro oksidiran in superprevoden.



Slika 19: Superprevodnik YBCO lebdi nad magnetom, lasten arhiv

8.3. Čas potreben za izvedbo sinteze

Sinteza	Potreben čas (h)
Sinteza s pirolizo	58
Sinteza 2	24,5

9. DISKUSIJA

9.1. Hipoteze

1. HIPOTEZA: V šolskem laboratoriju je mogoče sintetizirati superprevodnik YBCO. DA

Pri raziskovalni nalogi sva sintezo s pirolizo naredila v šolskem laboratoriju vse do stiskanja vzorca v tablete. Ta del sva naredila na FKKT v Ljubljani, na oddelku za anorgansko kemijo. Nato pa sva pri njih dala vzorec v peč. Prav tako sva pri njih naredila še sintezo s karbonatom in oksidoma. Pri tej sintezi sva le zatehtala kemikalije in jih homogenizirati v ahatni terilnici, nato pa sva vzorec tabletirala in jih dala zraven vzorca sinteze s pirolizo v peč. Če bi imeli tabletirko v šolskem laboratoriju, bi lahko brez večjih problemov to naredila na naši šoli. Peč v kateri sva oksidirala vzorec na univerzi imamo tudi v šoli, vendar sva to opravila na univerzi, da ni peč obratovala tudi, ko ni bilo nikogar na šoli. Sama sinteza ni prezahtevna, rabimo le določene naprave. Če bi kupili tabletirko, bi bila sinteza v šolskem laboratoriju možna.

2. HIPOTEZA: Pri sintezi s pirolizo dobimo boljši produkt. NE

Hipotezo morava zavržiti. Pri obeh sintezah sva dobila superprevoden produkt. Superprevodnost sva dokazala z Messnerjevim efektom, to sva naredila tako, da sva tabletke, pridobljene iz obeh sintez, sinteze s pirolizo in sinteze s karbonatom in oksidoma, dala v epruveto z dvojnim dnom, ki je imela na dnu magnet, vanjo natočila tekoči dušik in ko se je ohladila, je tabletko lebdela nad magnetom. Lebdele so vse štiri tabletko iz obeh sintez, sinteze s pirolizo in sinteze s karbonatom in oksidoma, kar potrjuje, da so vse superprevodne. Prav tako pri messnerjevem efektu ni bilo opaznih razlik, kar pomeni, da imajo sintezi primerljiv produkt.

3. HIPOTEZA: Sinteza z oksidoma in karbonatom je enostavnejša in hitrejša od sinteze s pirolizo. DA

Sama sinteza je veliko hitrejša od sinteze s pirolizo, za sintezo s pirolizo sva porabila 10 ur in še čas, potreben za sušenje itrijevega nitrata (24 ur), temu bi se lahko izognila, če bi uporabila kupljen itrijev (III) nitrat, vendar je ta dražji, nato pa sva porabila še 24 ur za oksidacijo in kristalizacijo vzorca v peči. V primerjavi pa sva za sintezo z oksidoma in karbonatom porabila le pol ure, na koncu pa sva potrebovala še 24 ur, da se je produkt v peči pretvoril iz reaktantov v $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. Za sintezo s pirolizo sva potrebovala 58 ur (če bi uporabila kupljen itrijev nitrat, bi se ta čas zmanjšal na 34 ur), za sintezo z oksidoma in karbonatom pa sva porabila 24.5 ur. Aktivnega dela sva pri sintezi s pirolizo imela 13 ur (od tega nama je nitriranje in delo s talilnim mikroskopom vzelo 3 ure), pri drugi sintezi pa sva imela aktivnega dela pol ure. To hipotezo lahko potrdiva saj sva pri merjenju časa s štoparico na telefonu ugotovila, da za sintezo z oksidoma in karbonatom porabimo 24.5 ur pri sintezi s pirolizo pa kar 58 ur. Prav tako je 2. sinteza enostavnejša, saj je aktivnega dela le pol ure, pri sintezi s pirolizo pa kar 13 ur.

4.HIPOTEZA: Pri žarjenju v peči ni potrebno prepihanje s čistim kisikom, saj zadostuje prepihanje z zrakom iz okolice. Če zrak ne bi zadostoval, produkt ne bi bil superprevoden, saj se ne bi oksidiral. Superprevodnost dokažemo z meissnerjevim efektom. DA

Če pri žarjenju peč prepihujemo z zrakom, namesto s kisikom, še vedno dobimo superprevoden produkt. V teoriji je pisalo, da za oksidacijo produkta nad 6.5 kisika na kristalno celico, potrebujemo čisti kisik. Pri oksidaciji 6.5 in manj je kritična temperatura nižja od temperature tekočega dušika. Če bi tak produkt hladili s tekočim dušikom pri temperaturi njegovega vrenja, ta ne bi postal superprevoden. Z Meissnerjevim efektom, ki sva ga dosegla s pomočjo tekočega dušika pri obeh sintezah, pa sva dokazala, da za oksidacijo nad 6.5 kisika na kristalno celico zadostuje prepihanje peči z okoliškim zrakom. Je pa tudi tak način oksidacije varnejši, saj se izognemo nevarnostim dela s čistim kisikom. V primeru, da cevi ali peč ne bi bile dobro očiščene, ali pa bi se v njih ali v peči zadrževala vlaga, bi lahko zaradi reakcije s kisikom prišlo do nesreče. Prav tako pa se izognemo dodatnemu strošku, to je, nakup jeklenke s kisikom.

9.2. Povzetek ob koncu raziskovalne naloge

Pri raziskovalni nalogi sva uspešno sintetizirala superprevodnik YBCO na dva načina. Superprevodnost produktov sva dokazala z Meissnerjevim efektom, tako da sva tabletke, pridobljene iz obeh sintez, dala v epruveto z dvojnimi dnomi, ki je imela na dnu magnet, vanjo natočila tekoči dušik in ko se je ohladila, je tabletki lebdela nad magnetom. Lebdeli so vse štiri tabletki iz obeh sintez, kar potrjuje, da so vse superprevodne. S tem sva tudi dokazala, da je s srednješolskim znanjem možno narediti tudi zahtevnejše materiale, kot so superprevodniki. Prav tako sva raziskala glavna področja superprevodnosti in jih opisala v raziskovalni nalogi. Pri raziskovanju sva spoznala veliko novega o superprevodnikih, njihovih lastnostih in področjih uporabe. Pri praktični izvedbi sva prišla do zelenega produkta, nama je pa ta raziskovalna naloga dala dober vpogled v izzive praktičnega dela zaradi odstopanja prakse od teorije, za kar pa meniva, da je dobra izkušnja, saj odpira pogled v realnost dela in izzive v laboratoriju.

9.3. Nadaljevanje raziskovalne naloge

V naslednjem letu nameravamo nadaljevati raziskovanje superprevodnikov. Če bova dobila priložnost, nameravamo narediti podrobnejšo analizo produktov obeh sintez za boljšo primerjavo postopkov med seboj. V načrtu imava pogledati kristalno strukturo pod elektronskim mikroskopom, za določitev velikosti kristalov in kako njihova velikost vpliva na lastnost produkta ter ali se ti razlikujejo med sintezami. Primerjati želiva superprevodnik YBCO z njemu podobnimi superprevodniki in proučiti, kateri je najbolj primeren na katerem področju in ga tudi sintetizirati.

10. VIRI IN LITERATURA

- https://en.wikipedia.org/wiki/Conventional_superconductor [1] (čas dostopa: 15.1.2022)
- https://en.wikipedia.org/wiki/Type-II_superconductor [2] (čas dostopa: 15.1.2022)
- https://en.wikipedia.org/wiki/Type-I_superconductor [3] (čas dostopa: 15.1.2022)
- <https://www.electrical4u.com/comparison-of-type-i-and-type-ii-superconductors/> [4] (čas dostopa: 16.1.2022)
- https://en.wikipedia.org/wiki/Type-1.5_superconductor [5] (čas dostopa: 15.1.2022)
- https://cds.cern.ch/record/1252368/files/978-3-540-70977-0_BookBackMatter.pdf [6] (čas dostopa: 20.2.2022)
- https://en.wikipedia.org/wiki/Organic_superconductor [7] (čas dostopa: 20.2.2022)
- <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acsmaterialsau.1c00011> [8] (čas dostopa: 20.2.2022)
- <https://www.accessscience.com/media/EST/media/000100PV0001.pdf> [9] (čas dostopa: 20.2.2022)
- [https://en.wikipedia.org/wiki/A15_phases#:~:text=The%20A15%20phases%20\(also%20known,element\)%20and%20a%20specific%20structure](https://en.wikipedia.org/wiki/A15_phases#:~:text=The%20A15%20phases%20(also%20known,element)%20and%20a%20specific%20structure) [10] (čas dostopa: 26.2.2022)
- <https://physicsworld.com/a/ferromagnetic-superconductors/> [11] (čas dostopa: 26.2.2022)
- <https://physicsworld.com/a/ferromagnetic-superconductors/> [12] (čas dostopa: 26.2.2022)
- <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/heavy-fermion-superconductors#:~:text=Heavy%2DFermion%20Superconductivity&text=They%20are%20an%20extremely%20strange,ten%20known%20heavy%2Dfermion%20compounds.> [13] (čas dostopa: 26.2.2022)
- https://guava.physics.uiuc.edu/~nigel/courses/569/Essays_Fall2011/Files/Steiner.pdf [14] (čas dostopa: 26.2.2022)
- https://en.wikipedia.org/wiki/Heavy_fermion_superconductor [15] (čas dostopa: 4.3.2022)
- <https://hiroi.issp.u-tokyo.ac.jp/Published%20papers/JPSJ-74-Cs-Rb.pdf> [16] (čas dostopa: 4.3.2022)
- <https://www.oist.jp/news-center/photos/diagram-pyrochlore-lattice> [17] (čas dostopa: 4.3.2022)
- https://en.wikipedia.org/wiki/Strontium_ruthenate#/media/File:Sr_2_Ru_O_4_Layered_Pervskite_Structure.svg [18] (čas dostopa: 5.3.2022)
- https://www.researchgate.net/figure/a-Crystal-structure-of-YBa-2-Cu-3-O-7-YBCO-The-presence-of-the-CuO-chains_fig2_316187999 [19] (čas dostopa: 5.3.2022)
- https://en.wikipedia.org/wiki/High-temperature_superconductivity#:~:text=The%20superconductor%20with%20the%20highest,occur%20at%20very%20high%20pressures. [20] (čas dostopa: 16.1.2022)
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Superconductivity> [21] (čas dostopa: 16.3.2022)
- <http://web.pdx.edu/~pmoeck/lectures/312/supercon.pdf> [22] (čas dostopa: 16.1.2022)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Critical_field#:~:text=For%20a%20given%20temperature%2C%20the,fields%20\(the%20Meissner%20effect\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Critical_field#:~:text=For%20a%20given%20temperature%2C%20the,fields%20(the%20Meissner%20effect)) [23] (čas dostopa: 22.1.2022)

https://en.wikipedia.org/wiki/Critical_field [24] (čas dostopa: 22.1.2022)

https://en.wikipedia.org/wiki/Flux_pinning [25] (čas dostopa: 22.1.2022)

https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_flux_quantum [26] (čas dostopa: 22.1.2022)

<https://www.osti.gov/pages/servlets/purl/1257374> [27] (čas dostopa: 23.1.2022)

<https://home.csulb.edu/~abill/research/articles/reviewIE.pdf> [28] (čas dostopa: 5.3.2022)

<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/diamagnetism#:~:text=Diamagnetism%20is%20a%20very%20weak,presence%20of%20an%20external%20field> [29] (čas dostopa: 5.2.2022)

<https://www.ru.nl/hfml/research/levitation-explained/diamagnetic-levitation/#:~:text=The%20force%2C%20called%20the%20diamagnetic,it%20were%20in%20a%20spacecraft> [30] (čas dostopa: 5.2.2022)

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8102114> [31] (čas dostopa: 6.2.2022)

<https://www.sciencenews.org/article/physics-first-room-temperature-superconductor-discovery> [32] (čas dostopa: 20.2.2022)

Knjižni vir:

Zavratnik, M. Doktorska disertacija: Odziv visokotemperaturnih superprevodnih mostičnih struktur na zunanje energijske motnje. Univerza v Ljubljani fakulteta za elektrotehniko: Ljubljana. 1997 [33]

IZJAVA*

Mentor *Sebastian Klovar* v skladu z 20. členom Pravilnika o organizaciji mladinske raziskovalne dejavnosti »Mladi za Celje« Mestne občine Celje, zagotavljam, da je v raziskovalni nalogi z naslovom *Izdelava superprevodnika v šolskem laboratoriju*, katere avtorja sta *Nejc Grilc in Mark Kladnik*:

- besedilo v tiskani in elektronski obliki istovetno,
- pri raziskovanju uporabljeno gradivo navedeno v seznamu uporabljene literature,
- da je za objavo fotografij v nalogi pridobljeno avtorjevo dovoljenje in je hranjeno v šolskem arhivu,
- da sme Osrednja knjižnica Celje objaviti raziskovalno nalogo v polnem besedilu na knjižničnih portalih z navedbo, da je raziskovalna naloga nastala v okviru projekta Mladi za Celje,
- da je raziskovalno nalogo dovoljeno uporabiti za izobraževalne in raziskovalne namene s povzemanjem misli, idej, konceptov oziroma besedil iz naloge ob upoštevanju avtorstva in korektnem citiranju,
- da smo seznanjeni z razpisni pogoji projekta Mladi za Celje.

Celje, 11. 4. 2022

žig šole



Podpis mentorja

Podpis odgovorne osebe

*

POJASNILO

V skladu z 20. členom Pravilnika raziskovalne dejavnosti »Mladi za Celje« Mestne občine Celje je potrebno podpisano izjavo mentorja (-ice) in odgovorne osebe šole vključiti v izvod za knjižnico, dovoljenje za objavo avtorja (-ice) fotografskega gradiva, katerega ni avtor (-ica) raziskovalne naloge, pa hrani šola v svojem arhivu.