

Vakuumski helijev kriostat za doseganje superprevodnosti mikrovalovnega resonatorja

Vacuum He Cryostat for Assuring the Superconductivity of a Microwave Resonator

Andrej Pregelj, Miran Mozetič, IEVT Ljubljana,

Alojz Paulin, TF Maribor

Pri načrtovanju eksperimentalne naprave za preizkušanje mikrovalovnih resonatorjev iz različnih superprevodnih materialov na IEVT se je izkazalo, da je osrednji problem projekta izbira in konstrukcija hladilnega sistema, ki ga bo možno realizirati z domačimi tehnologijami. Vakuumska izolacija s primernimi sevalnimi ščiti preprečuje sevanje okoliških teles proti hladnemu helijevemu rezervoarju v sredini in s tem zagotavlja vzdrževanje temperature vrelišča ob čim manjši porabi tekočega helija. Prispevek podaja postopek preračuna prehoda toplote iz okolice do He rezervoarja ter vpliv le-tega na izboljšave pri izvedbi toplotne izolacije in s tem tudi na konstrukcijo celotnega kriostata.

Ključne besede: helijev kriostat, prestop toplote, vakuumska izolacija

Developing an experimental device for testing microwave resonators made of different superconducting materials it became evident that the main problem was the constructing the cooling system. Vacuum insulation with suitable shields would prevent the transport of the heat by radiation of the neighbouring bodies to the cold LHe reservoir in the middle, thus maintaining the boiling-point temperature with minimal consumption of the liquid helium. The balance of heat transfer from the environment to the cryostat centre and also the possible optimisation of temperatur insulation are represented in the contribution.

Key words: helium cryostat, heat transfer, vacuum isolation

1 Uvod

Mikrovalovi in mikrovalovne tehnologije so s presledki že več desetletij tudi del dejavnosti Inštituta za elektroniko in vakuumsko tehniko. V prvih letih (1955-1965) je bil to razvoj magnetrona, kasneje izdelava medicinskih naprav za globinsko obsevanje in razvoj mikrovalovne pečice za gospodinjstvo, nato postavitev postopkov regeneracije izrabljenih magnetronov in študij izdelave mikrovalovnega generatorja plazme. V zadnjem obdobju (po 1990) se v okviru sodelovanja z mariborsko Tehniško fakulteto ukvarjamo z načrtovanjem eksperimentalne naprave za preizkušanje mikrovalovnih superprevodnih (SP) resonatorjev.

Ideja je naslednja: stoječe elektromagnetno valovanje v mikrovalovnem votlem resonatorju lahko povzročimo in vzdržujemo tudi s pulzirajočim elektronskim curkom, ki prehaja skozenj. Pri tem se energija curka bolj ali manj zmanjša; iz stopnje oslabitve lahko določimo faktor kvalitete resonatorja Q. Pri določeni frekvenci pulzov je Q odvisen predvsem od oblike in velikosti votline. Predvidevamo, da bodo resonatorji popolnoma iste oblike imeli različen Q, ki bo odvisen samo od različnih materialov. V primeru uporabe SP in drugih materia-

lov bomo tako lahko iz različnih Q v odvisnosti od temperature sklepali na njihove lastnosti pri visokih frekvencah (VF), za kar je po našem poznavanju še zelo malo podatkov v literaturi.

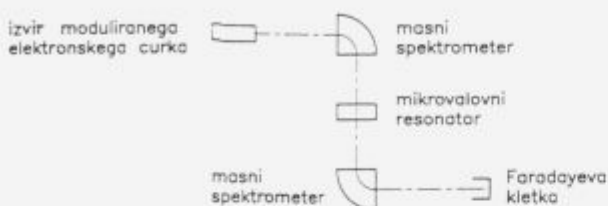
Shemo naprave, ki bi omogočala izvedbo nakazanih meritev, prikazuje **slika 1**. Bistveni element - resonator mora biti:

- nameščen v vakuumu, da je omogočen izvir in gibanje elektronov v curku ter
- tesno pritrjen na ležišče, s katerim ga je možno ohladiti na zelo nizke temperature (okoli 4 K) in tako zagotoviti pojav SP lastnosti.

Glede ustvarjanja vakuumu je bila odločitev enostavna; izbrali smo dinamičen črpalni sistem (s turbomolekularno in rotacijsko črpalno), ki po vsakem odpiranju omogoča hitro doseganje tlaka, potrebnega za elektronski curek ($p < 10^{-5}$ mbar).

Tudi glede izvedbe ohlajanja v našem primeru ni bilo večjih težav. Tako pregled literature kot informiranje o obstoječih napravah, ki bi vsaj deloma odgovarjale zahtevam projekta SP resonatorja, sta pokazala, da je najugodnejše uporabiti

s helijem hlajeni kriostat. Potrebno ga je le konstruirati tako, da bo omogočal vstavljanje resonatorjev. Ker smo želeli uporabiti tudi čim več tujih izkušenj, predvsem v zvezi z zahtevno toplotno izolacijo, smo zbrali in preštudirali mnoge profesionalne izvedbe (Varian, LH, Lake Shore, Jannis, Oxford Instr., itd).



Slika 1. Shema aparature za preizkušanje mikrovalovnih resonatorjev; spektrometer z nastavljivim magnetnim poljem in F kletka služita za merjenje energije elektronskih pulzov

2 Vakuumska izolacija kriostata

Kriostati so posode, ki z vgrajenimi materiali specifičnih lastnosti ter s tehnološko-oblikovnimi rešitvami čim bolj preprečujejo prehod toplote (prevajanje, sevanje in konvekcija) v notranje hladno jedro. Pri helijevih kriostatih je osrednji He-rezervoar vedno obdan s plaščem tekočega dušika. Vmesni evakuirani prostor je podprt z distančniki, ki ohranjajo geometrijo; seveda jih mora biti čim manj; zanje izberemo materiale z nizko toplotno prevodnostjo in njihov stik s stenami izvedemo čim bolj točkovno.

Glavni delež pri zmanjševanju toplotne prevodnosti vakuumskega plašča pa ima tlak, ki za popolno izolacijo ne sme biti višji od 10^{-4} mbar. Izbrane črpalke za našo napravo to z lahkoto dosežajo, hkrati pa je pri kriostatih zelo pomemben in dobrodošel še dodatni učinek površinskega črpanja hladnih sten na nizkih temperaturah.

Prenos toplote s sevanjem zmanjšamo z namestitvijo primernih reflektorskih ščitov.

3 Konstrukcija in toplotni preračun

Izvedbo kriostata, ki je osrednji del naše naprave, shematsko prikazuje **slika 2**. Sestavljajo ga:

- helijeva posoda s sedežem za resonatorje
- pločevinast sevalni ščit okrog He-rezervoarja
- koncentrična okoliška posoda s tekočim dušikom
- zunanji sevalni ščit
- ohišje, ki je del celotnega vakuumskega sistema
- cevi za dolivanje utekočinjenih plinov v oba rezervoarja ter za izpuh dušika oz. za zajemanje dragega helija

Zgornja odprtina na ohišju se uporablja za namestitev izvira elektronskega curka in za menjavanje vzorčnih resonatorjev, spodnja pa za priklop na merilnik energije izstopajočih elektronov in na vakuumski črpalni sistem.

Velikost celotne naprave je odvisna od toplotne izolacije kriostata. Zakaj? Vsa proti notranjosti prodirajoča toplota se porabi za izparevanje dušika in helija. Če hočemo uspešno hladiti, mora biti vsakega od utekočinjenih plinov volumsko

dovolj, da njuna gladina zaradi odparevanju kljub izolaciji ne upade pod minimalni nivo. To lahko zagotovimo predvsem s primerno velikostjo rezervoarjev za oba hladilna plina.

Postavili smo si cilj, naj bo čas varnega delovanja kriostata minimalno 2 dni. Izračunati moramo torej toplotni tok, ki pri izbrani izolaciji prodira k utekočinjenemu heliju in oceniti količini obeh plinov (V_{LN_2} in V_{LHe} v litrih), ki se zaradi tega toka v dveh dneh uparita. Konstrukcija, ki jo preverjamo, bo dobra, če bo po izparitvi izračunanih volumnov resonator še vedno obdan z zadostno količino (nivo) utekočinjenih plinov.

Prenos toplote poteka s prevajanjem po stenah cevi in skozi opore ter s sevanjem.

Prispevki toplote bodo proti hladnemu jedru helijeve posode prihajali od različno toplih sestavnih delov kriostata; njihove postopno vedno nižje temperature smo ocenili takole:

- 298 K - zunanja stena vakuumske posode (25°C)
- 200 K - zunanji sevalni ščit (predhodni izračuni)
- 77 K - rezervoar s tekočim dušikom (vrelišče N_2)
- 66 K - sevalni ščit med LN_2 in LHe posodo (predh. izračun)
- 4 K - rezervoar s tekočim helijem (4,2 K - vrelišče He)

V nadaljevanju članka je kratko podan izračun glavnih tokov toplote za končno varianto.

Prevajanje, ki v našem primeru poteka le preko trdne snovi, se izračuna po enačbi

$$Q = k \cdot \Delta T \cdot \frac{A}{l}$$

pri tem pomeni:

- k = koeficient toplotne prevodnosti
- ΔT = temperaturna razlika med toplim in hladnim delom
- l = razdalja med hladno in toplo točko (dolžina prevodnika)
- A = površina povprečnega preseka toplotnega vodnika

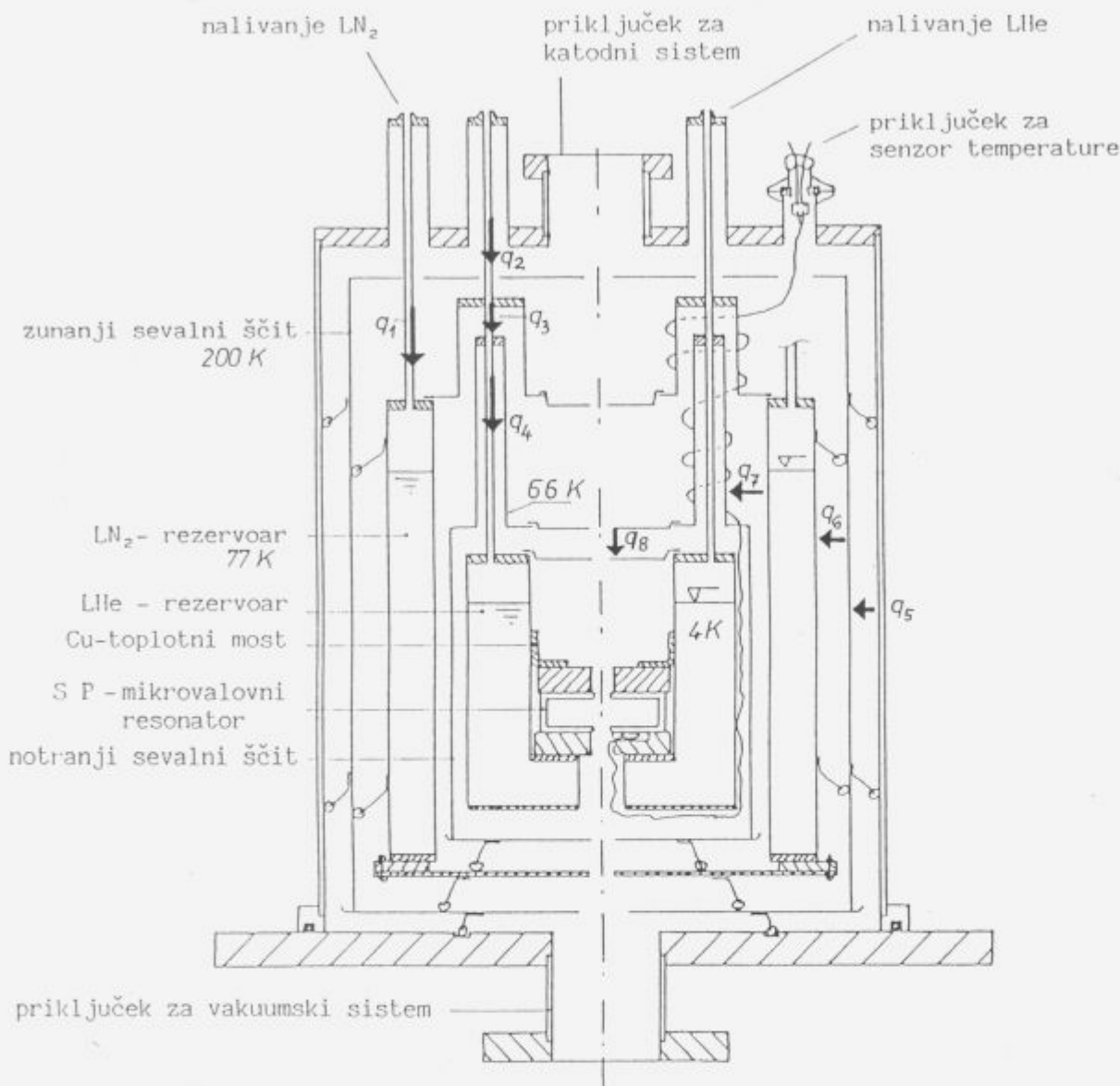
Enačba pove, da morajo toplotni mostovi biti čim daljši in čim tanjši in to iz materialov, ki imajo čim manjšo toplotno prevodnost. Priporočljivo je uporabljati točkovne dotike iz trdih materialov, ne pa varjenih in lotanih spojev.

Sevanje med dvema telesoma različnih temperatur je za situacijo v vakuumu in za črno telo podano s Stefan-Boltzmannovim zakonom. Za prakso, kjer nastopajo materiali poljubne barve, je osnovna enačba korigirana s faktorjem emisivnosti (f_e) in glede na obliko tople in hladne površine še s faktorjem oblike (f_{12}):

$$Q = \sigma \cdot f_{12} \cdot f_e \cdot A_2 \cdot (T_2 - T_1)$$

pri tem pomeni:

- $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}$
- $f_{12} = 1$, če je notr. cilindrično telo zelo dolgo in povsem obdano z zunanjim cilindrom
- A_1, A_2 = površini, ki sevata ($T_{A2} = T_2 > T_1$)



Slika 2. Shema kriostata z nekaterimi podatki za izračun toplotnih tokov

Konvekcija ali prevajanje toplote s pretokom plina proti hladni notranjosti v kriostatu ni prisotna. V vakuumskem plašču namreč ni pretoka plina, povezavne cevi pa se konvektivno kvečjemu rahlo ohlajajo, ko skozi njih izhlapevajo helijeve pare.

Osnovni izračun napravimo za stacionarno stanje, ko z napravo ne izvajamo poskusa; tedaj je notranja posoda napolnjena z LHe, zunanja pa z LN2. Prenos toplote poteka samo iz okolice in to s prevajanjem po ceveh in oporah ter s sevanjem, kot je nakazano na sliki 2. S preračuni smo dobili v skrajšani obliki naslednjo bilanco toplotnih tokov:

$$\begin{aligned} \text{- na LN2 posodo: } q_{\text{prev}} &= q_1 + q_2 = 0,53 + 0,31 = 0,84 \text{ W} \\ q_{\text{sev}} &= q_5 + q_6 = 0,37 + 2,01 = 2,38 \text{ W} \\ q_{\text{cel}} &= 0,84 + 2,38 = 3,22 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\epsilon_t = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)} = \text{faktor sevalnosti}$$

ϵ_1, ϵ_2 = specifična emisivnost površin sevajočih materialov

Podatki za specifično emisivnost so odvisni od materiala, obdelave oz. hrapavosti površine, stopnje oksidacije, čistoče oz. umazanosti itd. V literaturi objavljeni eksperimentalni podatki se zato za isti material lahko zelo razlikujejo. Pomembno je opozoriti, da je emisivnost nekaterih materialov v temperaturnem območju 0-100 K, ki je zanimivo za kriostate, precej različna od emisivnosti v področju sobnih temperatur.

- na LHe posodo: $q_{\text{prev}} = q_3 + q_4 = 0,018 + 0,024 = 0,042 \text{ W}$
 $q_{\text{sev}} = q_7 + q_8 = 0,012 + 0,014 = 0,026 \text{ W}$
 $q_{\text{cel}} = 0,042 + 0,026 = 0,068 \text{ W}$

Izračuni so bili izdelani pred tem že večkrat in rezultate smo vedno sproti upoštevali za optimiranje konstrukcije. Proti prvotni zamisli smo podaljšali zgornje dovodne cevi za obe posodi s tekočima plinoma, stanjšali debelino njunih sten, povečali spoliranost notranjih delov, dodali zunanji sevalni plašč in malo povečali prostornini obeh rezervoarjev. Pri končni verziji konstrukcije, za katero velja tudi prikazana bilanca toplotnih tokov, sta bila volumna plinov, ki smeta izhlapeiti: $V_{\text{LN}_2} = 3,12 \text{ l}$ in $V_{\text{LHe}} = 2,05 \text{ l}$. Od tu dobimo:

- za LN₂:
 - toploto izparevanja: $Q_{\text{iz}} = 503 \text{ kJ}$,
 - toploto za segrevanje par: $Q_p = 568 \text{ kJ}$; v dveh dneh ($t = 2.24.3600 \text{ s}$) pomeni to toplotno moč: $P_{\text{LN}_2} = (503 + 568) / 48.3600 = 6,18 \text{ W} > 3,22 \text{ W}$
- za LHe: - $Q_{\text{iz}} = 5,2 \text{ kJ}$ in $Q_p = 83,2 \text{ kJ}$, kar v dveh dneh pomeni toplotno moč: $P_{\text{LHe}} = (5,2 + 83,2) / 172800 = 0,51 \text{ W} > 0,068 \text{ W}$

Vidimo, da je hladilna moč s konstrukcijo predvidenih izparjenih količin obeh plinov večja od navznoter prodirajočih toplotnih tokov; iz tega sledi, da so dimenzije rezervoarjev zadovoljivo izbrane.

4 Sklep

S predstavljenim izračunom kriostata smo določili zunanje mere recipienta in s tem celotne aparature. Vzporedno smo zbrali mnoge pomembne podatke o toplotnih izolatorjih, o gradbenih materialih za kriostate in o njihovih lastnostih pri nizkih temperaturah. Iz preračunov so sledile poleg dimenzij tudi odločitve o nekaterih izvedbenih detajlih, kot npr.: oblikovanje toplotnih mostov (točkovni nasedi, uporaba toplotno-prevodne paste), obdelava površin (peskanje, sijajno poliranje), vrste in izvedba vakuumsko tesnih spojev, posebne izolacije (večplastne), rokovanje z utekočinjenim helijem, itd.

5 Literatura

- ¹ G.Kipling: Kontinuierliche Kühlung zwischen 1 and 293 K, überreicht von LH GmbH Köln, 1968
- ² R.B.Scott: Tehnika nizkih temperaturi, Moskva, 1962
- ³ Wutz, Adam, Walcher: Theorie und Praxis der Vakuum technik, F.Vieweg and S.Verlags GmbH, Braunschweig, 1982
- ⁴ A.Juhart: Miniaturni kriogeni hladilni sistem, Nova proizvodnja, NP 1-92
- ⁵ A.Pregelj: Kriostati in vakuumska tehnika, Vakuumist, 1993/2
- ⁶ K.D.Timer Hans: Advances in Cryogenics, 9.11.1972
- ⁷ Tehnični prospekti in podatki različnih proizvajalcev kriostatov