

NAČRTOVANJE IN IZDELAVA ULTRAVISOKOVAKUUMSKEGA KRIOSTATA S HELIJEVO KOPELJO ZA VRSTIČNO TUNELSKO MIKROSKOPIJO

Erik Zupanič, Rok Žitko, Albert Prodan, Igor Muševič

Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 1000 Ljubljana

POVZETEK

Razvoj kriogenske tehnike danes omogoča preiskovanje lastnosti snovi in opazovanje pojavov pri temperaturah blizu absolutne ničle. Znižana temperatura zmanjšuje električni šum in povečuje stabilnost merilnih inštrumentov. Z nižanjem temperature opazovanega sistema se zmanjšuje velikost termičnih fluktuacij, kar zavira difuzijo in omogoča opazovanje zanimivih kvantnih pojavov ter manipuliranje adsorbatov in rekonstruiranje površine na atomskem nivoju. Tako je nizkotemperaturni vrstični tunnelski mikroskop postal ne le zelo natančen merilni inštrument, ampak tudi obetavno nanotehnološko orodje. Opisana sta načrtovanje in gradnja ultravisokovakuumskega kriostata s helijevo kopeljo, namenjenega delu pri temperaturah pod 10 K.

Design and construction of an ultrahigh vacuum helium bath cryostat for scanning tunneling microscopy

ABSTRACT

Constant development of cryogenic techniques makes possible studies of various physical properties and phenomena at ever lower temperatures. Lowering the temperature of the instrument not only reduces thermal noise, but also largely improves the mechanical stability of the entire system. At lower temperatures the reduced scale of the thermal fluctuations in the sample, $k_B T$, allows detection of fascinating quantum phenomena and makes possible low-temperature manipulation and restructuring at an atomic scale. Thus, a low-temperature scanning tunneling microscope (STM) is, in addition to being a very precise measuring instrument, also becoming an important nanotechnological tool. We describe the design and construction of an ultra-high vacuum liquid helium bath cryostat for STM operation at temperatures below 10 K.

1 UVOD

Začetki kriogenske tehnike segajo v drugo polovico 19. stoletja, ko so ugotovili, da je mogoče pline, kot so kisik, dušik in vodik, iz zraka z ustreznimi pripravami in postopki utekočiniti.^(1,2) Utekočinjeni plini imajo pri navadnem tlaku temperaturo daleč pod lediščem vode (tabela 1) in so jih že uporabljali za hlajenje kovin, ki so kazale pri teh temperaturah zanimive lastnosti. Pred tem je sicer že uspelo utekočiniti nekatere pline, kot so etileter, amonijak in žveplov dioksid, ki pa so zaradi svoje strupenosti manj primerni za uporabo. Razvoj se je nadaljeval z iznajdbo steklene Dewarjeve posode za shranjevanje kriogenih tekočin konec stoletja, leta 1908 pa je prvič uspelo utekočiniti tudi helij, snov z najnižjo znano temperaturo vrelišča. Prav odkritji faznega prehoda v tekočem heliju (kar se je kasneje izkazalo za prvi primer superfluidnosti) ter superprevodnosti živega srebra pomenita začetek nizko-

temperaturnih raziskav v dvajsetem stoletju. Nadaljnji razvoj kriogenske tehnike so omogočile iznajdba in komercializacija helijevega kriostata leta 1946, dilucijskega hladilnika, s katerim je mogoče doseči milikelvinsko temperaturno območje, ter kombiniranih hladilnikov, ki mejo najnižjih dosegljivih temperatur dodatno znižujejo.

Tabela 1: Temperature vrelišč največkrat uporabljenih kriogenih tekočin⁽³⁾

	$T_{\text{vrelišča}} (p = 1 \text{ bar})/\text{K}$
^3He	3,20
^4He	4,22
N_2	77,35
O_2	90,15

Kriostat je naprava, ki omogoča ohlajanje vzorcev ali merilnih inštrumentov s kriogenimi tekočinami. Danes se v laboratorijih največkrat uporabljajo ultravisokovakuumski kriostati, ki se hladijo s tekočim dušikom (LN_2) in tekočim helijem (LHe). Razvitih je več vrst kriostatov, vsak tip pa ima prednosti in pomanjkljivosti.^(3,4) Po principu delovanja delimo kriostate v grobem na pretočne in na tiste s kopeljo. Kriostati s kopeljo se navadno uporabljajo takrat, ko je treba hladiti večje dele merilnih inštrumentov dalj časa in ko so ti občutljivi za tresljaje, ki nastajajo pri pretakanju tekočin. Kriostati s kopeljo namreč vsebujejo dovolj velike količine kriogenih tekočin, da ostanejo hladni brez dotakanja ali drugega vzdrževanja nekaj ur ali celo nekaj mesecev, vir tresljajev pa je le vretje kriogenih tekočin. Nasprotno pa pretočni kriostati omogočajo hitro ohlajanje manjših delov inštrumentov za krajši čas, pri čemer so tresljaji kriostata, ki so posledica pretakanja kriogene tekočine, v določeni meri vedno prisotni. Pretočni kriostati so v primerjavi s kriostati s kopeljo manjši in manj učinkoviti (poraba kriogenih tekočin in dosežena končna temperatura sta navadno višji, hladilna moč pa manjša). Na trgu je sedaj kar nekaj proizvajalcev standardnih kriostatov različnih tipov, kakovosti in cenovnih razredov (Oxford Instruments, Jannis ...).

Tipični vakuumski kriostat^(1,3,5) s helijevo kopeljo je sestavljen iz nosilnega toplega dela, ki se hkrati uporablja kot vakuumska posoda, in notranjega ohlajenega in od okolice toplotno izoliranega dela, ki je hladno mesto za toplotno sidranje merilnega inštrumenta in/ali vzorca. Vakuum je odlična toplotna

izolacija, k manjšemu prenosu toplote pa prispevajo tudi hlajeni ali toplotno izolirani sevalni (odbojni) ščiti in v nekaterih primerih večplastna superizolacija.

Vrstični tunelski mikroskop je vsestransko orodje v fiziki površin in pri preiskavi materialov, saj omogoča poleg slikanja topografije in površinskih elektronskih stanj tudi spektroskopske meritve, podatomska globinska in prečna ločljivost pa dovoljuje načrtno premikanje molekul in celo atomov ter druge manipulacije s površinskimi nanoskopskimi delci.⁽⁶⁾ Za nanotehnologijo je zato zelo pomemben razvoj nizkotemperaturnih vrstičnih tunelskih mikroskopov (angl. low-temperature scanning tunneling microscope, LT-STM), katerih delovne temperature so nižje od 10 K. Prvi nizkotemperaturni vrstični tunelski mikroskop,⁽⁷⁾ ki je deloval pri temperaturi 15 K, je bil razvit leta 1984 in je s kasnejšimi izboljšavami⁽⁸⁾ pomenil nov zagon v nanoznanosti. Prednosti dela pri nizkih temperaturah so poleg boljše stabilnosti samega inštrumenta in zmanjšanega električnega šuma tudi večja stabilnost površin in nanoskopskih delcev na površinah, kar je posledica močno upočasnjene difuzije. Slabe strani so časovna potratnost takih eksperimentov, visoke cene inštrumentov in delo, ki poleg posebne opreme zahteva veliko znanja in izkušenj.

2 NAČRTOVANJE KRIOSTATA

Na Odseku za fiziko trdne snovi IJS smo razvili in izdelali ultravisokovakuumski kriostat s helijevo kopeljo, ki je prilagojen za delo z vrstičnim tunelskim mikroskopom. Kriostat naj bi ob upoštevanju geometrijskih omejitev in zagotavljanju potrebnega prostora za merilno glavo mikroskopa omogočal čim daljši čas obratovanja med dvema polnjenjima utekočinjenih kriogenih plinov. Med nadaljnji zahtevami je bila pomembna tudi možnost nastavljanja helijeve posode po višini in nagibu ter enostavno razstavljanje, ki naj bi olajšalo odpravljanje napak in zagotavljalo dostop do električnih vodnikov in drugih delov v notranjosti kriostata. Nadalje je bilo treba zagotoviti zadostno število, velikost in položaje ultravisokovakuumskih električnih in mehanskih skoznikov, ki so potrebni za delovanje mikroskopa. Delo je bilo opravljeno v več korakih. Po pripravi, pregledu literature in zbiranju podatkov o električnih, mehanskih in toplotnih lastnostih materialov pri kriogenih temperaturah, je bil izdelan okvirni načrt, ki je bil končno optimiziran s teoretičnimi izračuni. Pri teh so bili preverjeni različni možni materiali za izdelavo posameznih delov kot tudi oblike, ki naj bi zagotavljale optimalne izkoristke hladilnih medijev. Po izdelavi je bil kriostat vakuumsko preizkušen, sedaj pa

poteka njegovo ožičenje in preizkušanje pri nizkih temperaturah.

2.1 Teoretične osnove

V tabeli 2 so podane pomembne fizikalne lastnosti dušika in helija, tj. plinov, ki se utekočinjena uporabljata za ohlajanje kriostata ter s tem merilne glave mikroskopa in vzorca.

Tabela 2: Pomembnejše fizikalne lastnosti dušika in helija⁽⁴⁾

Lastnost	N ₂	⁴ He
Temperatura vrelišča (pri 101,3 kPa, K)	77,3	4,22
Izparilna toplota (J/g)	198	20,9
Količina tekočine, ki jo upari 1 W toplotne moči (L/h)	0,024	1,38
Gostota tekočine (g/cm ³)	0,808	0,125
Razmerje volumnov tekočina/plin	694:1	750:1
Toplotna kapaciteta plina: C _p (J/g · K)	1,05	5,19
C _p (J/cm ³ · K)*	0,85	0,65

*toplotna kapaciteta količine plina, ki nastane pri uparitvi 1 cm³ tekočine

Helij ima v primerjavi z dušikom kar desetkrat manjšo izparilno toploto, ima pa veliko večjo toplotno kapaciteto, ki se do sobne temperature bistveno ne spremeni. V praksi to pomeni, da že zelo majhen toplotni tok v ohlajen sistem pomeni veliko izgubo (uparitev) utekočinjenega helija. Po drugi strani pa lahko uparjen, a še vedno zelo hladen plinasti helij uporabimo za hlajenje nekaterih delov, na primer sevalnih ščitov in samega vratu helijeve posode. Upoštevati je treba tudi ceno utekočinjenega helija, ki je kljub utekočinjevalniku na IJS vsaj za velikostni razred višja od cene utekočinjenega dušika. Izgubo helija je zato treba zaradi stroškov in zapletenosti dotakanja zmanjšati na minimum, velikost posode dušika pa prilagoditi porabi in velikosti posode helija.

Pomembni so načini prehajanja toplote iz toplejšega (tj. okolice, ki ima sobno temperaturo) na hladnejši del (tj. helijevo posodo, ki se nahaja na temperaturi tekočega helija). Ker je v našem primeru kriostat izčrpan oz. vakuumski, nam ni treba skrbeti za konvekcijski prenos toplote v njegovi notranjosti. Tako so glavni viri izgub prenos toplote vzdolž vratu, na katerem visi helijeva posoda, prenos po električnih žicah in drugih povezavah ter sevalne izgube med stenami helijeve posode in njene okolice. Toplotni tok zaradi konvekcije skozi ozek helijev vrat in sevalni tok neposredno s pokrova vratu nad tekočino sta zaradi majhnega prispevka zanemarljiva. Ker je toplotna prevodnost materialov močno odvisna od njihove temperature, je treba pri izračunih vedno upoštevati temperaturno prevodnost materiala pri temperaturi obratovanja. Toplotni tok Q skozi material

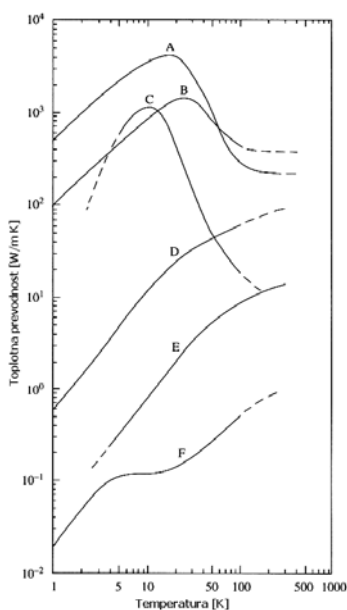
s prerezom A in temperaturnim gradientom dT/dx je podan z enačbo (1):

$$Q = \lambda(T) \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

kjer je $\lambda(T)$ temperaturno odvisni koeficient toplotne prevodnosti materiala. Na sliki 1 so prikazani ti koeficienti za nekaj materialov v izbranem temperaturnem območju. Ugotavljamo, da je razlika v toplotni prevodnosti med posameznimi materiali lahko zelo velika (na primer med nerjavnim jeklom in elektrolitskim bakrom pri nizkih temperaturah kar za tri velikostne rede), prav tako pa se močno razlikujejo tudi vrednosti za posamezne materiale med sobno temperaturo in 4 K (na primer pri elektrolitskem bakru za manj kot velikostni red, medtem ko je ta razlika pri nerjavnem jeklu dva velikostna razreda)! Nadalje je pomembno, da je temperaturna (in električna) prevodnost kovin pri nizkih temperaturah močno odvisna od čistoče materiala in kristalnih defektov (kot posledica mehanske in toplotne obdelave) in lahko prav tako niha za velikostni red in več. Zaradi vsega naštetega ima izbira pravega materiala posameznih delov ključni vpliv na karakteristiko izdelanega kriostata.

Ker navadno toplotni tok prehaja med mestoma z veliko razliko v temperaturi, definiramo (za lažje računanje) povprečni koeficient toplotne prevodnosti med temperaturama T_1 in T_2 (2):

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{T_1 - T_2} \cdot \int_{T_1}^{T_2} \lambda(T) \cdot dT \quad (2)$$



Slika 1: Koeficienti toplotne prevodnosti v odvisnosti od temperature za: A) Al z RRR 500, B) elektrolitski baker z RRR 65, C) kristal kremena, D) žarjena medenina (70Cu/30Zn), E) nerjavno jeklo in F) amorfni silicij.⁽¹⁾ Razmerje RRR (angl. residual resistivity ratio) je navadno definirano kot razmerje upornosti pri sobni temperaturi in pri vrelišču helija.

Z uporabo enačbe (1) in povprečnim koeficientom toplotne prevodnosti, ki ga najdemo v literaturi za izbrano temperaturno območje, lahko dobimo dokaj natančno izračunane toplotne tokove, ki so posledica prevajanja.

Toplota med mestoma z različnima temperaturama prehaja tudi s toplotnim sevanjem. Toplotni tok zaradi sevanja med dvema vzporednima ploskvama s ploščino A ter s temperaturama T_1 in T_2 ter emisijskima koeficientoma ε_1 in ε_2 je enak:

$$Q = \sigma(T_1^4 - T_2^4) \cdot \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \varepsilon_2} \quad (3)$$

pri čemer je σ Stefan-Boltzmannova konstanta. Emisijski koeficient ε ima za idealno črno telo, ki absorbira celotno vpadno sevanje, vrednost 1. Površine kovin imajo vrednosti emisijskih koeficientov med 0,01 in 1, odvisno od materiala, obdelave (hrapavosti) površine, oksidiranosti, njihove temperature ter valovne dolžine vpadlega sevanja. Tabela 3 podaja nekaj eksperimentalnih vrednosti emisivnosti ε za materiale pri različnih temperaturah. Vse vrednosti so podane za infrardeče sevanje z valovno dolžino 10 μm , kar približno odgovarja sevanju telesa s temperaturo 300 K. Razberemo lahko, da je možno z ustrezno obdelavo površine toplotni tok zaradi sevanja zmanjšati za deset- in večkrat. Površine je zato smotno fino polirati in dodatno prevleči s kovino, ki ne oksidira (na primer pozlatiti ali pokromati).

Tabela 3: Nekaj eksperimentalnih vrednosti emisijskih koeficientov za sevanje z valovno dolžino 10 μm ⁽⁴⁾

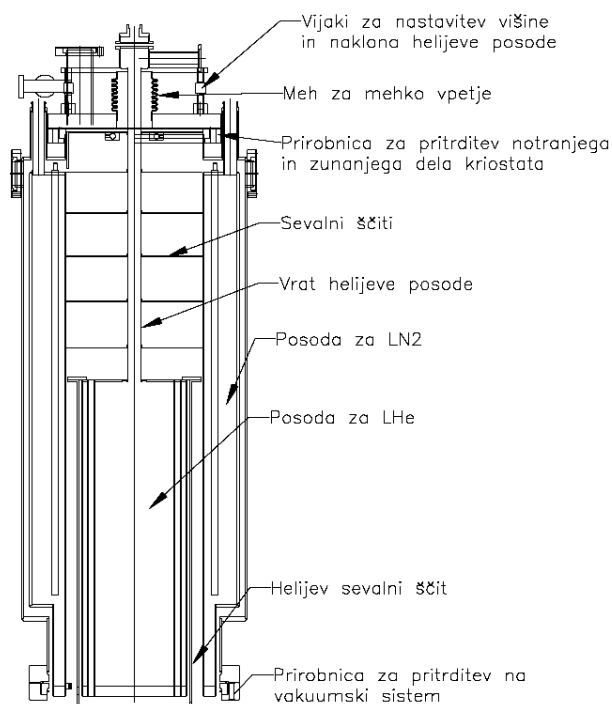
Temperatura površine	4.2 K	77 K	300 K
Baker (poliran)	0,0050	0,008	0,018
Zlato (polirano)		0,01	0,02
Srebro (polirano)	0,0044	0,008	0,02
Aluminij (poliran)	0,0011	0,018	0,03
Nerjavno jeklo (polirano)		0,048	0,08
Oksidirana površina bakra ali aluminija			0,3–0,6

Za izolacijo kriogenskih posod se pogosto uporablja tako imenovana superizolacija, na primer metaliziran mylar.⁽⁹⁾ Gre za tanko plast poliestra, na katerega je nanesena visokoodbojna plast kovine, navadno aluminij ali zlato. Taka folija ima majhen emisijski koeficient in majhno toplotno prevodnost ter odlične mehanske lastnosti, uporabna pa je tudi v ultravisokem vakuumu. Meritve kažejo,⁽¹⁰⁾ da pade vrednost toplotnega sevanja pri prehodu skozi 150 μm debelo plast obojestransko aluminiziranega mylarja pri temperaturi 20 K za faktor 10^{-10} . Ovira pri uporabi takih izolacij v ultravisokovakuumskih sistemih je njihova velika površina in posledično, še posebej pri uporabi večjega števila plasti, ujeta prostornina plinov.

2.2 Oblika in optimiranje načrta

Shemo načrtovanega kriostata z označenimi glavnimi deli prikazuje slika 2.

Notranji, helijev del kriostata je sestavljen iz posode za tekoči helij, izdelane iz poliranega nerjavnega jekla, ki prosto visi na dolgem tankem vratu na zgornji prirobnici. Uporabili smo cev notranjega premera 19 mm z debelino stene 0,25 mm. Premer vratu mora biti čim manjši in njegove stene čim tanjše, tako da je toplotni tok z mesta pritrditve na prirobnici, ki je vedno na sobni temperaturi, do helijeve posode čim manjši. Hkrati mora biti notranji premer cevi dovolj velik, da lahko vanj vstavimo cev za natakanje in da lahko med samim točenjem plinasti helij brez težav zapušča posodo. Če je vrat preozek, obstaja namreč nevarnost ustvarjanja turbulence in stoječih valov ter s tem vnašanja toplote v posodo. Dno posode je bakreno in je hladno mesto, na katerega so pritrjeni in toplotno sidrani glava mikroskopa in helijevi sevalni ščiti. Na vrat helijeve posode so pritrjeni bakreni polirani in s kromom prevlečeni sevalni ščiti, ki preprečujejo prenos toplote iz prirobnice na posodo s helijem. Premer helijeve posode je prilagojen velikosti glave mikroskopa, višina posode oziroma dolžina vratu pa je optimizirana z izračuni. Daljši vrat namreč pomeni manjše izgube zaradi zmanjšane toplotnega toka, istočasno pa zmanjšuje prostornino helija in s tem neprekinjen čas delovanja. Nasprotno kratek vrat pomeni velike izgube, tudi na račun večje površine posode, a zaradi večje prostornine daljši čas neprekinjenega delovanja. Vrat helijeve posode je na



Slika 2: Prerez kriostata z označenimi glavnimi deli

zgornjo prirobnico pritrjen preko mehkega meha iz nerjavnega jekla, ki omogoča s tremi nastavitvenimi vijaki spreminjanje višine in naklona vratu in s tem celotne helijeve posode. Pri ohlajanju in segrevanju prihaja namreč zaradi velikih skrčkov in raztezkov materiala do odmika posode od idealne lege, kar je mogoče z omenjenim mehanizmom popraviti.

Poleg velikosti in emisivnosti površin na sevalni toplotni tok iz okolice na ohlajeno helijevo posodo vpliva tudi temperatura plašča, ki ga obdaja. Približen izračun z enačbo (3) pokaže, da je prenos toplote s sevanjem med površinama na temperaturah 300 K in 20 K približno 45 mW/cm^2 , med površinama s temperaturama 77 K in 20 K pa samo še okoli $0,2 \text{ mW/cm}^2$. Zato je treba med helijevo posodo in toplo okolico pritrčiti dodatne sevalne ščite, ki morajo biti hlajeni z iztekajočo helijevo paro ali z dodatno dušikovo posodo. Predvsem zaradi ugodnejše geometrije kriostata in manjše porabe helija, ki ga ta izvedba ponuja, smo se odločili za drugo možnost. Tako je helijev del kriostata radialno po vsej višini obdan s posodo, v kateri je tekoči dušik na temperaturi 77 K. Stene posode so tudi v tem primeru izdelane iz poliranega nerjavnega jekla, med obema posodama (helijevo in dušikovo) pa je dovolj prostora za dodatni bakreni sevalni ščit. Ta je le šibko hlajen s helijevo paro, saj je samo z nekaj manjšimi vijaki pritrjen na zgornji del helijeve posode, kar v praksi pomeni slab toplotni stik med obema deloma.⁽¹⁰⁾ Takšni sevalni ščiti so lahko ali hlajeni ali pa 'prosto' visijo in je njihova temperatura odvisna predvsem od bilance sevalnih tokov.

Dušikova posoda je na ohišje kriostata pritrjena s tremi cevmi iz nerjavnega jekla, podobno kot helijeva posoda. Cevi so krajše in s svojim številom zagotavljajo mehansko stabilnost. Dno posode je bakreno, z luknjami za pritrnitev sevalnih ščitov. Za dodatno zmanjševanje toplotnih izgub po vratu helijeve posode je le-ta na zgornjem delu (približno 10 cm pod prirobnico) s primerno bakreno pletenico povezana z bakrenimi palicami, ki segajo do dna dušikove posode in so tako tudi pri delno izpraznjeni posodi ohlajene. Tako je zgornji del vratu helijeve posode ohlajen na temperaturo blizu vrelišča dušika, kar dodatno zmanjšuje toplotni gradient po cevi.

Končne dimenzije delov kriostata so bile optimizirane z računalniškim paketom Krio,⁽¹²⁾ ki smo ga napisali v ta namen. Program numerično rešuje sistem enačb za nastavljeni kriogeni model, seveda ob upoštevanju temperaturno odvisnih konstant in drugih vnesenih podatkov. Izračun da temperature posameznih delov in toplotne tokove med njimi. Najbolj presenetljiva ugotovitev analize izračunov je, da je za dobre karakteristike kriostata poleg pravilne izbire



Slika 3: Nosilni del kriostata s dušikovo posodo: A) spodnja prirobnica za pritrnitev kriostata na sistem, B) nosilni plašč, C) zgornja prirobnica za pritrnitev helijevega dela kriostata in D) tri cevi, na katerih visi dušikova posoda

materiala odločilna emisivnost površin posod in sevalnih ščitov.

Posebno pozornost smo namenili električnim napeljavam od ultravisokovakuumskih priključkov na zgornji prirobnici do priključka, pritrjenega na spodnjo stran helijeve posode. Ker želimo vnesti v ohlajeni sistem kar najmanj toplote, moramo uporabiti čim tanjše žice. V našem primeru smo se predvsem na podlagi izkušenj odločili za žice iz nerjavnega jekla premera 75 μm in dveh debelejših koaksialnih signalnih žic. Tako tanke žice so mehansko zelo občutljive in jih je treba napeljati brez ostrih kolen. Hkrati morajo biti na več mestih dobro toplotno sidrane na ohlajene površine, tako da so ohlajene, še preden dosežejo priključek na dnu helijeve posode. Neohlajene žice bi namreč toploto dovedle neposredno na merilno glavo mikroskopa in s tem dvignile njegovo delovno temperaturo. Žice so zato napeljane od priključkov na prirobnici skozi luknje v sevalnih ščitih (kjer so večkrat toplotno sidrane) in nadalje skozi cevki premera nekaj milimetrov, ki potekata skozi helijevo posodo.

Kriostat je bil po končanem načrtovanju v celoti izdelan v podjetju Vacutech v Ljubljani. Slika 3



Slika 4: Helijev del kriostata: A) odprtine za vakuumske skoznike, B) prirobnica za pritrnitev na nosilni del, C) bakreni pletenici za toplotni stik, D) vrat s sevalnimi ščitovi, E) dva šopa dovodnih žic, F) helijevo posodo, G) priključek in H) mehovi za nastavitve višine in nagiba helijeve posode.

prikazuje nosilni del kriostata z dušikovo posodo. Vidna je zgornja prirobnica (C), na katero je pritrjen helijev del kriostata, trije vratovi (D), na katerih visi dušikova posoda ter stranska odprtina, ki omogoča dostop do bakrene pletenice med dušikovim in helijevim delom kriostata. Na sliki 4 je prikazan helijev del kriostata. Na prirobnico (B) je pritrjen kovinski meh s tremi vijaki (H) in vratom, na katerem visi helijevo posodo. Skozi sevalne ščite (D) potekajo večkrat toplotno sidrane žice (E), ki so po prehodu skozi helijevo posodo (F) povezane na priključek (G).

4 SKLEPI

Opisani so principi in metode pri načrtovanju ultravisokovakuumskega kriostata s helijevo kopeljo in podani bistveni podatki, potrebni za teoretične izračune. Razvit je bil program za enostavno modeliranje toplotnih tokov in izračun končnih temperatur posameznih delov kriostata. Na tej podlagi je bil v sodelovanju s podjetjem Vacutech izdelan kriostat ter izvedeno osnovno preizkušanje. Uporabljeni so bili

različni vakuumsko in kriogeno kompatibilni materiali in metode za njihovo spajanje. Zaradi različnih, pogosto nasprotujočih si navedbah vrednosti podatkov o lastnostih materialov pri kriogenih temperaturah se je kot precej težavno izkazalo predvsem ocenjevanje koeficientov emisivnosti površin v kriostatu. Majhne razlike v teh ocenah namreč močno spreminjajo izračunane temperature in toplotne tokove.

Zahvala

Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije za finančno podporo (ARRS aplikativni projekt L1-6611-0106-05) in podjetju Vacutech, d. o. o., Ljubljana, za sodelovanje pri končni izvedbi kriostata.

5 LITERATURA

¹G. K. White in P. J. Meeson. *Experimental techniques in low-temperature physics* (IV. Edition), Oxford science publications, Oxford, 2002

²History of cryogenics – Cryogenic Society of America [online], 2007, dosegljivo na http://www.cryogenicsociety.org/cryo_central/history_of_cryogenics.php

³J. G. Weisend II, editor. *Handbook of cryogenic engineering*, USA, 1998

⁴N. H. Balshaw. *Practical cryogenics: An introduction to laboratory cryogenics*, Oxford instruments superconductivity limited, England, 2001

⁵F. Pobell. *Matter and methods at low temperatures* 2. edition, Springer Verlag, Germany, 1996

⁶R. Žitko in I. Muševič. *Vakuumist* 24 (2004) 3, 4–13

⁷S. A. Elrod, A. L. de Lozanne in C. F. Quate. *Appl. Phys. Lett.*, 45 (1984), 1240–1242

⁸G. Meyer. *Rev. Sci. Instrum.*, 67 (1996), 2960–2965

⁹Introduction to Mylar poliester films [online], 2007, dosegljivo na <http://www.dupontteijinfilms.com/datasheets/mylar/overview/h67160.pdf>

¹⁰J. B. Heaney. Efficiency of aluminized mylar insulation at cryogenic temperatures, *Proceeding of SPIE* 3435 (1998), 150–157

¹¹R. Berman in C. F. Mate. *Nature*, 182 (1958) 4650, 1661–1663

¹²<http://auger.ijs.si/nano/krio>