

KRYO-vákuumtechnika a mikroelektronikában

DR. BUDINCSEVITS ANDOR



ÖSSZEFOGLALÁS

A szerző ismerteti a kryo-vákuumtechnika alkalmazásának lehetőségeit a mikroelektronikában. Az elméleti alapok tárgyalását követően részletesen foglalkozik a kryo-szivattyúzás módszereivel és különböző eszközeivel, így a Stirling-ciklusú hűtőgép alkalmazásáról részletesebben is ír.

A mélyhűtéses ultravákuumtechnika és a szivattyúzási rendszerek az elmúlt évek során mind az alap kutatás szinten, mind a vákuumipar területén jelentős haladást értek el. A kryo-vákuumtechnika kutatási köre kibővült a tisztavákuum terek s az atomi-tiszta gázmentes vákuumfelületek témakörével. Ezek alkalmazása az integrált vékonyréteg-áramkör-struktúrák, a chippek és mikroprocesszorok gyártástechnológiája. A félvezető szilíciumlapkák a chippek bonyolult gyártásának kibontakozásában forradalmi változást hozott a kryo-vákuumszivattyúzás bevezetése.

A modern vákuumtechnika az elmúlt két évtized alatt átalakult a szilárdtestek, tiszta vákuumfelületek és vékonyrétegek fizikai tudományává, ekkor kezdtük megérteni a szilárdtestek felületén a gázoknak és a gőzöknek a kondenzációját, a molekulák és az atomok migrációját, szorpcióját s gázoknak szilárdtesteken keresztül történő permeációját. Tanulmányozni kellett az atomi tiszta felületeket, anélkül, hogy a maradékgázok újra befednék. Felismertük a gázok szabad úthosszából származó falütközések, a Knudsen-terek jelentőségét, megtudtuk és észleltük, hogy még ultravákuumban is marad a szilárdtestek felületén egy igen vékony monoatomos gázréteg és ez a gyakorlatban az adszorpciós és kemisorpciós kötési energiával egyenértékű hővel eltávolítható, vagy ion-bombázással a gázcseppképek felszabadíthatók. Az ilyen módon megtisztított atomosan tiszta felületek megtarthatók akár 1-2 órára a technológiailag előírt műveletek időtartamára szuper-ultravákuumban, amely 10^{-10} – 10^{-12} torr nagyságrendű. Az ilyen vákuumfelületekre jellemző a t_b újra befedési idő, amely eltelik míg egy letisztított felületen a gárcseppképek a felületi ütközések folytán ismét egy monoatomos gázréteget képeznek.

Az az eredmény, hogy a már atomosan tiszta felületekre közvetlenül gőzölhetünk, idegen atomokat ion-implantálhatunk vagy epitaxiális gőzölés alkalmazásával egykristály vékonyrétegeket felvihetünk, a szuper-ultravákuum megfelelő ideig tartó fenntartásának köszönhető.

Szuper-ultravákuumot ma már hagyományosnak mondható getter ionszivattyúkkal is elérhetünk

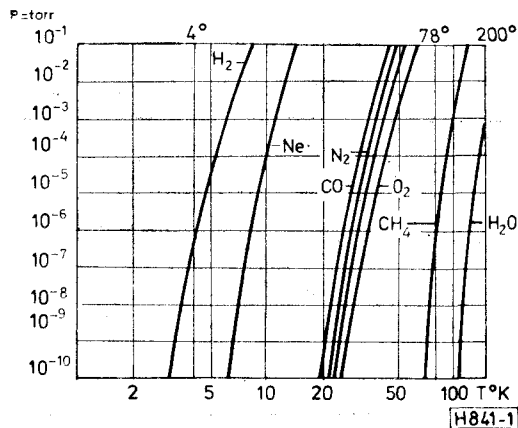
Bérekzett: 1982. VI. 22.

DR. BUDINCSEVITS ANDOR

Vegyésszermérnöki oklevelet 1950-ben szerezte az ELTE-n. Kutatási témáin a TUNGSRAM, illetve az Egyesült Izzó Kutató Intézetében dolgozott. 1952-ben a műszaki tudományok kandidátusa lett. Az elektronemisszió terén eredményeket ért el. 1938-tól mikrohullámú csöveket fejlesztett és a háború alatt az

országos lokátor bizottság tagja. Ezekben az években mikrohullámú csövek fejlesztése volt fő feladata. 1950-től, a TKI-ban klisztron és magneutron gyártási technológiákat, fém-kerámia csöveket és kerámia eljárásokat dolgozott ki. Tudományos munkáját 29 szabadalomban és 23 publikációban írta le. 1953-ban Kossuth-díjjal, 1970-ben kutatási Nívó-díjjal jutalmazták. (Δ)

30–40 óra alatt, azonban a műveletek során felszabaduló gázok miatt fenntartásuk nem biztosítható. A fenti követelmény csak kryo-ultravákuum szivattyúval érhető el, a cseppfolyósított hélium 4,2 °K hőmérsékletén, mert ennél már minden gáz szilárd halmazállapotba kerül (1. ábra), és tenziójuk 10^{-14} – 10^{-16} torr nagyságrendben van, folyamatos fenntartása pedig 10^5 – 10^6 l/sec leszívási sebesség elérésével biztosítható.



1. ábra. Gázok parciális nyomása mélyhőmérsékleten

Korábban a kryo-szivattyúzást csak elvéve alkalmazták szuper-ultravákuum eléréséhez. A kryo-szivattyúzást hátráltatta a fejlődésben a vákuumkryosztátok költséges üzemelése, a cseppfolyós hélium beszerzésének nehézsége.

Gyorsan szuper-ultravákuumot iparszerűen előállítani hagyományos vákuumszivattyú eszközökkel nem lehet, mert azok max. szívási sebessége a 10^3 l/sec-ot nem haladja meg. A kryo-szivattyúk igazi jelentősége abban van, hogy az egyszer letisztított felületek fenntarthatók, sőt a gőzölés követ-

keztében felszabaduló gázkitörések sem változtatnak a tisztaatomos felületeken, ami az integrált-áramkör-struktúrák minőségi gyártásának alapfel-tétele.

Jelentős haladást hozott a kryo-ultravákuum technikában, mikor zárt rendszerben összekapcsolták a nagy hatásfokú és e célra tervezett Stirling-ciklusú kis, kb. 1 kW teljesítményű héliumcseppfolyósító gépi berendezést az ultravákuumkryosztáttal a vákuumgőzölő kiszolgálására. Miután az egész rendszer üzemelése csak forgó mechanikai munkát igényel, előállítható 1-2 órán belül 10^{-11} torr szuper-ultravákuum, letisztított atomosan tiszta felületekkel.

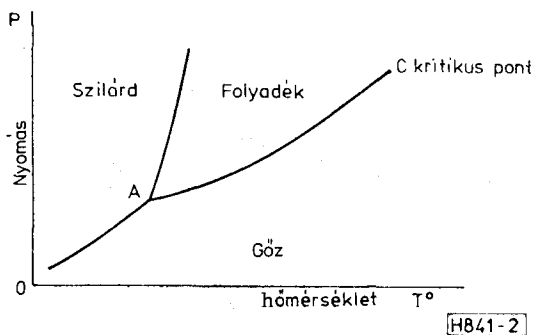
Már korábban számos szerző tanulmányozta mély hőmérsékletre hűtött felületeken gázok és gőzök kondenzációját, szorpcióját és diffúzióját, mikor a nagy szívási sebességek iránti igény mind sürgetőbben jelentkezett a nagy berendezések építésénél. Ilyen berendezések a szinkrociklotron részecskegyorsítók, tároló gyűrűk, világűr szimulátorok, újabban a termionukleáris plazmagenerátorok. — Valamivel később jelentkezett az igény a mikroelektronikában.

A kryo-vákuumtechnika bevezetése minőségi javulást hozott és a gyártási idő nyereségét okozta az elektronikai alkatrésziparban. Ez jelentős gazdasági előnyökkel is járt, hatására a multi chippek és mikroprocesszorok ára jelentősen csökkent.

KRYO-VÁKUUMTECHNIKA ELMÉLETI ALAPJAI

A szuper-ultravákuum getter- és ionszivattyúzás, valamint eszközei és módszerei és a kryo-szivattyútechnika között szoros vákuumfizikai összefüggés áll fenn, mégis módszereiben lényeges eltérést találhatunk, mikor gázokat és gőzöket mélyhőmérsékletű felületeken kondenzálunk és adszorbeáltatunk.

Ha a hélium mélyhőmérsékletre hűtött vákuumkryosztátot magas vákuumba helyezünk, akkor annak felületén az összes maradék gárrészecskék adszorpcióra van der Waals erővel megkötődnek. A kryo-szivattyúzás aktív munka közege a cseppfolyós gázok, így a N_2 77° K-en, az Ne 30° K-en, a H_2 20° K-en, a He 4,2° K-en cseppfolyós, tovább menve alacsonyabb hőmérséklet elérésére törekszünk, akkor 4He / 3He izotóp elegyet használva kb. 1,2° K-ig vagy párologtatós vákuumkryosztátot alkalmazva 0,9° K-ig juthatunk. Kibővíthető még az adiabatikus mágnesztelenítés módszerével 0,15° K hőmérsékletig is, ahol már a hélium tenziója eléri a 10^{-20} torr-t.



2. ábra. Fázisdiagram, állapotábra

A kryo-szivattyúzásnál a H_2 és a He-on kívül a többi gázoknak nincs jelentőségük. A cseppfolyós N_2 , csak a kryosztátok, pl. a cseppfolyós héliumot szállító vákuumvezetékek hőárnyékolását, ill. hőszigetelését szolgálja.

A termodinamikából jól ismert fogalom a szilárd, cseppfolyós és gőzfázisra érvényes hármaspont-szabály. Eszerint, minden folyadék s annak gőzfázisa egymással érintkezve egyensúlyba kerülhet, ha sem gőz le nem csapódik, sem folyadék el nem párolog. Ez a fázisegyensúly különböző hőmérsékleten jöhet létre, de csak a gőzfázis egyetlen meghatározott gőznyomásán állhat fenn (2. ábra). A kryo-szivattyúzásnál az egyensúly határán a hármaspontnál kondenzálódnak, mikor a gáz-szilárd vagy gáz-folyadék fázisba kerülnek. Az 1. táblázat néhány fontosabb gáz hármaspontját és nyomását adja meg.

1. táblázat

Gázok	T_A °K	P_A atm.
N_2	63,16	0,124
O_2	54,36	0,001
H_2	13,96	0,071
4He	Nincs hármaspontja	

A kryo-szivattyúzás tanulmányozása a hatvanas évek közepétől új szakaszába érkezett. Megállapítást nyert, hogy a mélyhőmérsékleten történő gázbefogás több fizikai jelenség együttes hatásaként jön létre hűtött felületeken. Ilyenek a kryo-kondenzáció, a kryo-szorpció, a porózus felületek kryo-adszorpciója, valamint a kémiailag kötött gázok kryo-getter szorpciója. A végvákuum javulásával a gázmolekulák ütközése gázmolekulákkal egyre ritkább lett a falütközésekhez viszonyítva, míg végül teljesen elhanyagolható, ekkor a molekulák áramlása sugárirányú és a kölcsönhatás a felületütközések számával arányos. Tehát a kryo-felületek tulajdonságainak meghatározása és méreteinek megállapítása a modern kryo-szivattyúk hatásosságának és teljesítményének számítását tették lehetővé.

A kryo-szivattyúzáshoz a legeredményesebben a gázok közül a héliumot lehet felhasználni és ezzel lehet a legmélyebb hőmérsékletet elérni. A héliumgáz normál nyomáson 4,22° K hőmérsékleten cseppfolyósodik. A folyékony hélium vákuumban elpárologtatva eléri az alsó hőfokhatárt, a 0,9° K-t. Ezen hőfokhatár elérése előtt 2,17° K-nál a hélium II-es módosulata áll elő, ahol a hélium szuperfolyékonnyá válik, a λ -pontnál a cseppfolyós héliumnak rendkívül csekély a fajhője és aránytalanul megnő a hővezető képessége. Szuperfolyékonysági állapot áll be, jellemzője, hogy ezen a hőmérsékleten az atomok közötti távolság megfelel a De Broglie-féle hullámhossznak és már kvantumstatisztikai jelenségek lépnek fel. Ezért a fizikusok a szuperfolyékonny héliumot általában kvantumfolyadékknak is szokták nevezni. A cseppfolyós hélium szuperfolyékonysága kedvező.

zően befolyásolja a párologtatós kryo-szivattyúzást azzal, hogy a héliumnak nincsen hármaspontja, ezért van lehetőség a hélium hőmérsékletének további csökkentésére. Ez szuper-ultravákuum előállítását és a rendszerben levő H_2 , valamint a permeációból származó hélium kondenzációját teszi lehetővé.

Normál nyomáson a héliumgáznak a kritikus állapota jól definiálható: megszűnik a folyadék s a felette levő telített gőz közötti különbség. A kritikus hőmérséklet az a pont, amely felett a gáz már nem cseppfolyósítható, mert a folyadék és a gáz sűrűsége egyenlővé válik. Ekkor a hideg héliumgáz belső hőtartalmának — az entalpiának Gibbs hőfüggvénye szerint a nyomás és térfogat szorzatának megnövelt értékével számolnak:

$$I = U \cdot V \cdot P$$

Tehát az entalpia, mint állapotjelző a termodinamikában egyértelműen meghatározott a rendszer állapotával és egyenlő az állandó nyomáson leadott hővel.

A kryo-szivattyúk szívássebességére különböző szerzők elméleti levezetésekkel kiindulva megkísérelték levezetni és kiszámítani az egységnyi felületek gázmegkötő sebességét. Minden esetben a gázkinetika törvényeiből számított eredményeket a mérésekkel összehasonlították. A J. J. Thibault, J. Roussel számításait alapul véve, a kryo-szivattyúk szívási sebességét N_2 és Ar gázokra számítva az időegység alatt, egységnyi hűtött felületre érkező N molekulák számából s a deszorbeált távozó gázmolekulák egyenlő nyomásából kiindulva az alábbiakat kapjuk.

Ha A a szivattyúzásban részt vevő összes gázmolekulák száma, melyek cm^2/sec alatt érkeznek a mélyhőmérsékletű felületre, akkor

$$\frac{dN}{dt} = \frac{A}{4} n_g \cdot v_g, \quad \text{ahol}$$

n_g = a hűtött felületre érkező gázmolekulák száma,
 v_g = a gázmolekulák közepes átlagsebessége:

$$v_g = \sqrt{\frac{8kT_g}{\pi m}}$$

Ha Q = a hűtött felületre áramló összes gázmolekulák száma, akkor

$$Q = P_g \frac{dv}{dt} \cdot \frac{dN}{dt} kT_g$$

ebből; $\frac{Q}{P} = \frac{dN}{dt} \cdot \frac{kT_g}{P_g}$, ahol

P_g = a befogott gázmolekulák száma, k = a Boltzmann állandó, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ joule/°K).

$$P_g = n_g \cdot k \cdot T_g$$

Legyen P_c = a deszorbeált gázmolekulák száma, S_m a kryo-szivattyú szívássebessége, akkor

$$S_m = A \sqrt{\frac{kT_g}{2m}} \left(1 - \frac{P_c}{P_g} \sqrt{\frac{T_g}{T_c}} \right)$$

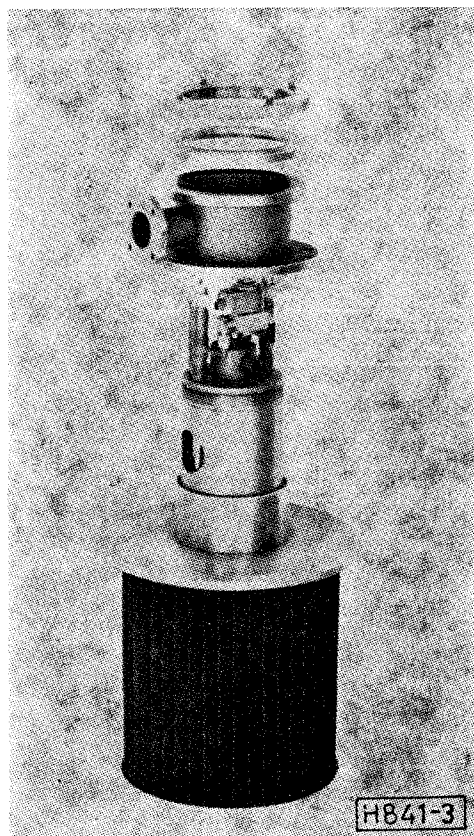
A kryo-szivattyú szívássebességének általános egyenlete azonban nem írja le teljesen a jelenségeket, csak megközelítő eredményt ad, mivel a $4,2$ °K-en cseppfolyós hélium forrásponti és ez alatti hőmérsékleten a gázok kondenzációja nem eléggé tisztázott. Mert nem veszi figyelembe a különböző gázokra érvényes α befogási tényezőt, valamint a különböző gázok kritikus megtapadási sebességét az 1 °K körüli hőmérséklettartományban.

A KRYO-ULTRAVÁKUUMTECHNIKA

A vákuumtechnikában alacsony hőmérsékletre hűtött csapdákat már korábban is alkalmaztak. A recipiens belső felületein okkludált vízgőznek és a szivattyú aktív anyagának tenziójából származó gázok megkötésére, mint pl. a higanygőzt. E célra rendszerint szilárd CO_2 + acetont használtak, mellyel 83 °K érhető el, vagy cseppfolyós N_2 -öt, mellyel 77 °K hőmérsékleten a vízgőz és egyéb gázok kondenzálódnak.

Szuper-ultravákuum elérésénél akkor kezdtek először alkalmazni a mélyhőmérsékletre hűtött kryosztátokat a maradékgázok kondenzálódására, mikor a deszorpcióból származó gázok mennyisége meghaladta a 10^{-8} – 10^{-9} torr-nál már lecsökkent szívósebességet; valamint ion-getter szivattyúk esetében, mikor a szívási idő jelentős csökkentését akarták elérni.

Szuper-ultravákuum szivattyúzására több m^3 űrtartalmú nagy berendezéseknél először merülő vagy más néven fürdő kryosztátokat alkalmaztak, ame-

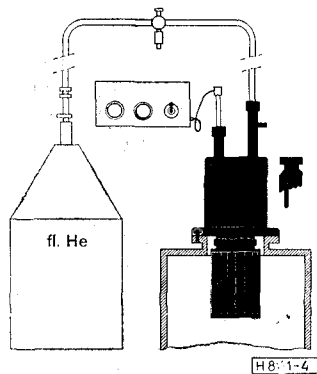


3. ábra. Merülő, vagy fürdő ultravákuum kryosztát

lyekkel H_2 esetén $20^\circ K$ -t és He $4,2^\circ K$ mélyhőmérséklet volt elérhető. A merülő kryosztátok hőcserélő edények és aktív felületükkel a vákuumterbe vannak, jól zártak, anyaguk csekély permeációból származó gázt ereszt át, ezért vákuumban olvasztott krómaccélból készülnek. Kívülről vákuummal szigetelt vezetéken keresztül feltölthetők, egy megfelelő nagyságú tároló edényből cseppfolyós hidrogénnel vagy héliummal. A merülő kryosztátok H_2 -vel $20^\circ K$ -re és He -mal $4,2^\circ K$ -re hűlnek le, a 3. ábra egy merülő kryosztátot ábrázol.

A merülő kryosztátok szívási teljesítményét a mérésekből kiindulva elméletileg határozták meg a cseppfolyós hidrogénre, ugyanis 1 cm^2 nagyságú felület $20^\circ K$ hőmérsékleten $11,8\text{ l/sec}$ N_2 -es gázt képes megkötni. A gyakorlatban kryosztátok tervezésénél $6\text{ l/cm}^2\text{/sec}$ -mal szokás számolni. Tehát a kryosztátok szívási teljesítményét elsősorban a hőmérsékletük és a hűtött felületük nagysága határozza meg. Könnyen belátható, hogy a teljesítményük növelhető a felület nagyságával, bordázással és hűtőszárnyak alkalmazásával, amint az ábrán is látható. A kondenzációs felületeket kryoszorpciós és sugárzást csökkentő bevonattal is ellátják, rendszerint fekete platinkorom vagy finom szemcsés fémzirkon réteggel, amely kifűtött állapotban kryogetter hatást is kifejt.

Az ultravákuum-kryosztátok szívási teljesítményét azáltal is növelhetjük, ha az előkészítésnél az indulóvákuumban kifűtjük 10^{-5} – 10^{-7} torr-nál több órán keresztül 450 – $550^\circ C$ -nál. A vákuumrendszer és a kryosztát gáztalanítását mindaddig folytatjuk, míg a kifűtési hőmérsékleten elérjük a kryosztát induló vákuum nagyságát.



4. ábra. Merülő ultravákuum rendszer Kry. 5000 l/sec. kryosztáttal

Merülő kryosztátoknál, ha cseppfolyós hidrogént alkalmazunk, bizonyos idő után a vákuum lassú romlása tapasztalható. Ezt a folyadéknyívó csekély mértékű csökkenése okozza, megszüntethető a kryosztát automatikus utántöltésével anélkül, hogy a kryosztát hőegyensúlya felborulna. Az automatikus utántöltés nívószintje gyakorlatilag 1 mm -en belül tartható. A merülő kryosztátoknál a hűtőfolyadék takarékos felhasználására, módosított hűtési technológiát alkalmaznak, nagyobb időközönként úgy egészítik ki a hűtőfolyadék nívóját, hogy a programozásnál 2 – 3 mm -rel túltöltik, az erre a célra tartá-

lékolt szabad hűtőfelületet. Ezzel biztosítani lehet az ultravákuum folyamatos fenntartását, friss kondenzációs felülettel. A 4. ábra egy merülő kryosztát automatikus utántöltő rendszer vázlatos elrendezését mutatja.

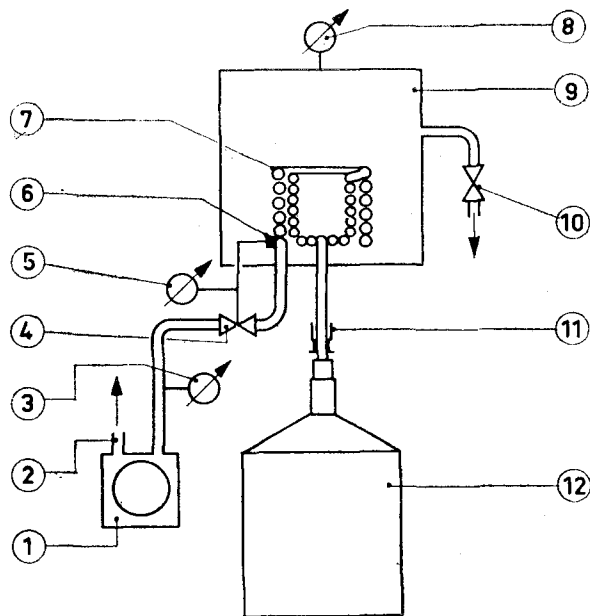
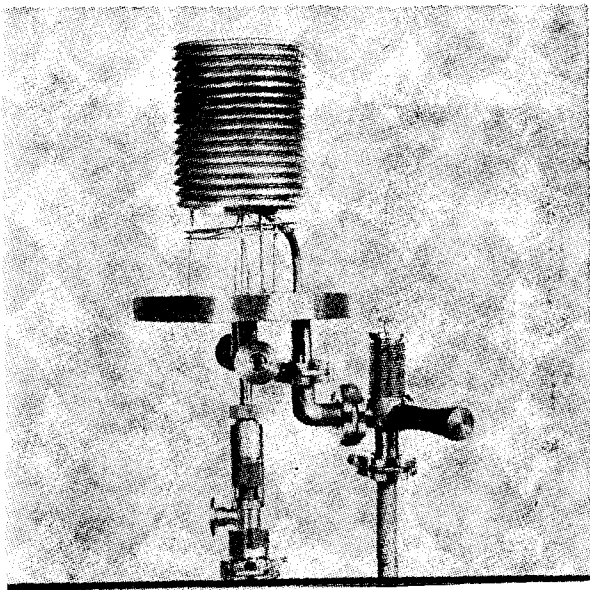
HÉLIUM PÁROLOGTATÓS SZUPER-ULTRAVÁKUUMKRYOSZTÁT

A kryo-szivattyúzás hatásosabbá tételének irányzata a héliumot párologtató ultrakryosztátok alkalmazása, mellyel folyamatos hőelvonás valósítható meg, és ezzel a hélium forrpont alatti hőmérsékletek érhetők el. Mivel a héliumnak nincs hármaspontja és szuperfolyékony állapotba kerül, a hőmérséklete is lejjebb vihető, s a null-pont körüli hőmérsékleten kondenzálódó gázok parciális nyomása közel 0 , miáltal a permeációból származó csekély számú hidrogén és hélium atomok is megköthetők és szuperultravákuum-terek állíthatók elő. A 5. ábrán egy héliumot vákuumban párologtató ultrakryosztát látható.

Cseppfolyós héliumot vákuumban párologtató ultrakryosztát egy kettős vörösréz spirálból áll, melyek egymásba vannak helyezve. A belső csőspirálon beáramlik vákuumban a cseppfolyós hélium egy hidegadagoló szelepen keresztül, ahol a szuperfolyékonyra váló hélium jó hővezetése következtében nagy mennyiségű hőt von el a rendszertől. A folyamatos hőelvonással a csőspirál a forrpont alatti 1 – $0,9^\circ K$ hőmérsékletre hűl le. Majd tovább áramolva, a külső nagyobb átmérőjű spirálba kerül, és mint az ábrán is látható, a második spirálcső hőárnyékolóként veszi körül a belső csőspirált. A cseppfolyós hélium a spirálcső vákuumterében (mely kb. 40 torr) elpárolog és hőt von el a vörösréz csőből, végül $1^\circ K$ -nél eléri a legmélyebb hőmérsékletet, közben szuperfolyékonyra válik, s tovább áramolva a bővebb átmérőjű külső csőspirált is hűti a belső energiájával az entalpiáját hasznosítva. Ezzel védi a belső mélyebb hőmérsékletű csőspirált a sugárzási veszteségektől. A szuperkryosztátokat a hőszugárzás reflektálására alkalmas bevonattal látják el, optikailag tükröző aranyréteggel. A szuperkryosztátban a cseppfolyós hélium áramoltatására és a szükséges vákuum előállítására hélium tömített forgószivattyút alkalmaznak. A hélium áramoltatása teljesen automatikusan működik hidegszelepeken keresztül egy tároló edényből. A szuperkryosztáton keresztül áramló folyékony hélium közben hőt vesz fel és egy automatikusan vezérelt hidegszelepen keresztül mint héliumgáz egy visszanyerő rendszerbe kerül.

A párologtató ultrakryosztát automatikus vezérlését a belső csőspirál hőmérséklete végzi a ráerősített termisztor vagy platina ellenállás-hőmérővel. Az erről kapott elektromos jelet egy differenciálerősítő bemenetére adják, mely azt felerősítve a mágneses hidegszelepeket meghatározott program szerint vezérli.

A cseppfolyós hélium szállítását a kryosztátba a tároló edényből és vissza a felfogó rendszerbe egy folyékony N_2 -vel körülvett és magas vákuummal szigetelt rézvezetékeken keresztül látják el.

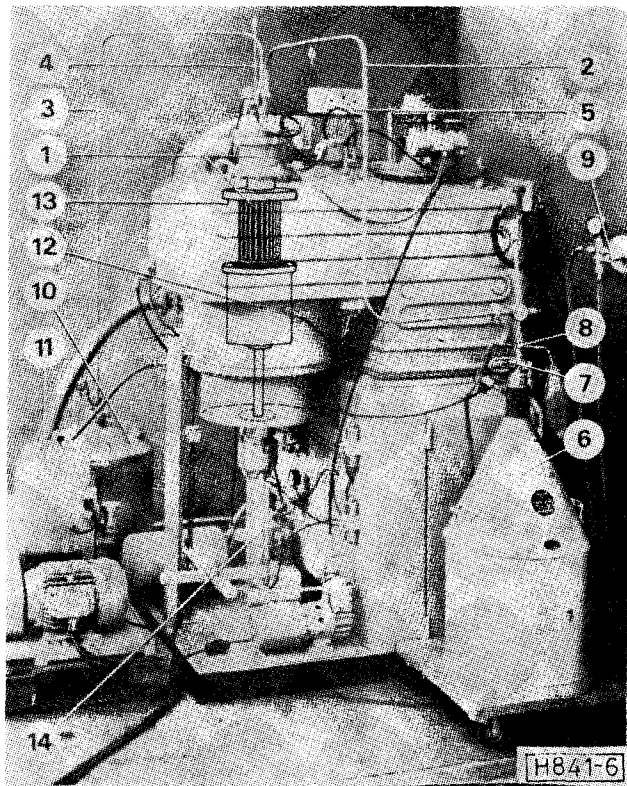


H841-5

5. ábra. Héliumot párologtató ultrakryosztát. 5a ultrakryosztát, 5b vázlatos elrendezés. 1 héliumot keringető szivattyú, 4 vákuumszabályzó szelep, 6–7 párologtató ultrakryosztát rézspiráljai, 11 vákuummal szigetelt csatlakozás, 12 héliumtároló edény

Az ultrakryosztát teljesítményét, ill. hőmérsékletét az időegység alatt keresztáramló és elpárolgó cseppfolyós hélium mennyisége határozza meg egészen a legalsó hőmérsékleti határig $1-0,9^\circ\text{K}$ -ig. A 6. ábra

egy komplett vákuumgőzölő kryo-szivattyú rendszert ábrázol, 5000 l/sec teljesítménnyel, mely esetenként kiegészíthető egy párologtató kryosztáttal, az elérhető végvákuum $10^{-12}-10^{-13}$ torr. A kryosztát héliumfogyasztása óránként $800-900\text{ cm}^3$, a leszivási ideje kb. 40 perc. A kryo-szivattyú ellátására telepített héliumcseppfolyósító berendezés Stirling-rendszerű hűtőgép kb. 6 kW teljesítményű és 4,5 l/óra cseppfolyós héliumot termel.



H841-6

6. ábra. Komplettszuper-ullravákuum gőzölő berendezés Kry. 5000 l/sec kryosztáttal. 1 kryoszivattyú, 2 cseppfolyós héliumot szállító vákuum szigetelt vezeték, 5 hélium vivő szabályzó, 0 héliumtároló, 10 nitrogéntároló edény, 11 elővákuum szivattyú

VÁKUUMKRYOSZTÁTOK KÖZVETLEN ÖSSZEKAPCSOLÁSA STIRLING-HŰTŐGÉPPEL

A szuper-ullravákuum szivattyúzás technikában lényeges haladást értek el, mikor a kryosztátot közvetlenül összekapcsolták a nagy hatásfokú Stirling-ciklusú H_2 -öt, vagy ^4He -ot cseppfolyósító hűtőgéppel, mellyel a kryo-szivattyú-rendszer zárt egységet képez. Itt a cseppfolyósított munkaközéget folyamatosan áramoltatják keresztül a kryosztáton, s az lehűti H_2 esetében 20°K -re és ^4He -nál $4,2^\circ\text{K}$ -re. Ezen kombinációs kryo-szivattyúzás leegyszerűsíti a műveleteket s folyamatos üzemet biztosít, a mikroelekttronikai ipar ultra-tiszta vákuumgőzölő és ionimplantáló berendezések kiszolgálására. Mivel a rendszer csak forgó mechanikai munkát igényel, a bekapcsolást követően kb. 40–50 perc után egy 100 l-es recipiensben 5000 l/sec teljesítményű merülő kryosztáttal 10^{-11} torr érhető el.

A kombinációs rendszer további előnye, hogy nincs héliumfogyasztása, a kryosztát minden helyzetben alkalmazható, ami konstrukciós előnnyel jár. Nincs szükség hidegszelepekre, automatikus utántöltésre, a héliumgáz visszanyerésére. A Stirling-ciklusú kryo-

szivattyúzás szuper ultratiszta vákuumú felületek ipari megmunkálását mindennapi technológiává avatja.

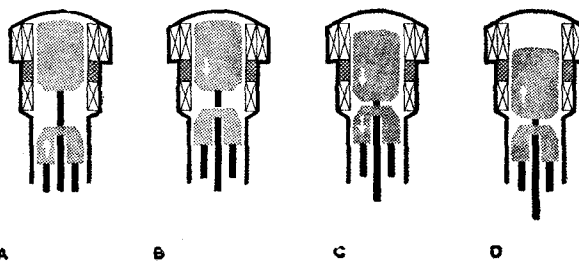
MÓDOSÍTOTT STIRLING-CIKLUS

Az a módosítás, amelyet a Stirling-ciklusú mélyhűtőgép leírásában röviden összefoglalok, a gázok cseppfolyósítását alapvetően megváltoztatták. Robert Stirling 1817-ben a Carnot körfolyamattól eltérő hőciklusra hívta fel a figyelmet és hőlégmotort szerkesztett, amelyre szabadalmat is kapott. A Stirling-féle hőlégmotor már az első kísérleteknél elérte a 40% hatásfokot és úgy gondolta, hogy minden betáplált hőenergiát át lehet alakítani mechanikai energiává, ha a motorban használt regenerátort addig javítja, míg az a 100%-ot eléri. Ezen téves elméleti kiindulás ellenére a nagy hatásfokú hőlégmotor felkeltette a Philips-kutatók figyelmét, ugyanis a Stirling-ciklus elméletileg is a legnagyobb hatásfokú energiaátalakítást teszi lehetővé. W. L. Köhler 1963-ban arra a meglepő gondolatra jutott, mi történik, ha megfordítja a Stirling-ciklus irányát és hűtőgépet szerkeszt ezen elv alapján.

A módosított Stirling-ciklus lényegileg egy kétlépcsős hűtőgép, melyben a hűtésre kerülő gáz két különböző hőmérsékleten expandál. Ezen módosítás végett kettős terjeszkedésű gépnek is szokás nevezni. A kifejezés azonban nem fedi pontosan a működés fázisait, mivel azt gondolhatnánk, hogy a gáz kiterjedése két nyomáslépcsőben történik, holott ez a valóságnak nem felel meg. Mert a Stirling-ciklusú gép reverzibilis és nagy a termodinamikai hatásfoka. A számított elméleti hatásfok közel áll a gyakorlatban már elért eredményekhez és jobb mint 40%, mivel ugyanazt a hengert használja úgy a kompressziós, mint az expanzíós folyamatokhoz. Ezáltal a legkisebbre csökkenthetők a gép mechanikai veszteségei.

A Stirling-ciklusú gázcseppfolyósító gép működésének a lényegét a következőkben foglalhatjuk össze. A kompressziós térben a munkaközeg, amely lehet H_2 vagy 4He -gáz, 6–8 atm nyomáson van betöltve, és szívárgásmentesen van lezárva. Ezt a gázt 1:3–1:4 arányban egy dugattyú összenyomja, s a felszabaduló hőt vízhűtéssel eltávolítják. Ezt követően az expanzíós térben engedik kiterjedni, ahol a gáz lehül kb. 60 °K-re. A módosított Stirling-ciklus újszerű megoldása a két tér közötti gázáramlás, amely egy nyitott rövid szűk csatornán keresztül összeköti a kompressziós teret az expanzíós térrel. Ezek a csatornák körben elhelyezett vörösréz csövekből készülnek, amelyek finom vörösréz huzalokkal vannak megtöltve, s ezzel nagy felületű hosszú pórusok tömegét képezi és a gáz áramlásának útjában ellenállást fejtenek ki. Ezen részét a Stirling-ciklus regenerátorának nevezték el, mivel a beáramló része mindig a környezet hőmérsékletén van.

A komprimált gáz a regenerátorban lehül, csak ezután jut a ciklus újabb expanzíós részéhez, ahol lényegileg indul a módosítás, amelyet egy különleges rombusz mozgatómű végez. A rombusz mozgatóműnek két helyzete van és a közbenső expanzíós térbe emeli az alsó dugattyút, ahol a gáz közepes hőmér-



A

B

C

D

H84T-7

7. ábra. A Stirling körfolyamat egyes fázisai

sékleten kiterjed. Ez a lehülése a gáznak kompenzálja a regenerátor veszteségét. Azzal az eredménnyel, hogy a gáz egy része frissen folytatja útját a regenerátoron keresztül a felső expanzíós térbe, ahol lehül a legkisebb hőmérsékletre, ahol a gáz már cseppfolyósodik. A Stirling-rendszer e ponton kapcsolódik az ultravákuumkryosztáthoz, melyből a folyékony hélium hőt von el, lehűti 3–4 °K-re, majd átáramolva visszakérül az expanzíós térbe.

A regenerátorban a hőmérséklet lineárisan csökken az egyik végétől a másikig. A hélium átmegy a melegtérből a hidegtérbe, oda és vissza anélkül, hogy a héliumgáz hőmennyiséget venne fel. A héliumgáz a hidegtérbe történő áramlása közben lehül a nagytömegű regenerátorban, mely felveszi a gázban felgyülemlett hőt. Amint a hélium visszatér a hidegtérből a melegtérbe, a regenerátor felmelegíti, így visszakapja az elraktározott hőt. Emiatt a hélium mindig a tér megközelítő hőmérsékletén lép be a komprimáló vagy expandáló térbe. Ezen módosított megoldás eredményeként nagyon kevés a héliumnak egyik térből a másik térbe történő áramlása következtében fellépő belső hőcseréje. A héliumgáznak a ciklushoz szükséges kompresszióját és expanzíóját két dugattyú végzi, amelynek a mozgását, mint egy különleges rombusz meghajtómű végzi, s melynél a két dugattyú mozgása nincs fázisban.

Tehát az ultrakryosztát hűtése hideg szelepek nélkül megy végbe zárt rendszerben, ahol nincs szükség a héliumgáz visszanyerésére, a 7. ábra a módosított Stirling-ciklus egyes fázisait ábrázolja. A Stirling körfolyamat újszerű megoldása a közvetlen összekapcsolása az ultrakryosztáttal számos technikai előnyt eredményez a tiszta szupervákuum felületek fizikájában.

A STIRLING-KÖRFOLYAMAT FÁZISAI

A cseppfolyósításra kerülő munkaközeg a héliumgáz, melynek összenyomásával energia szabadul fel hő alakjában, s melyet hűtéssel távolítunk el (8a ábra).

A munkaközeg a kompressziós térből lehűtve átmege a regenerátoron, melynek két vége között hőmérsékletkülönbség áll fenn és további hőt ad le (8b ábra).

Az összenyomott munkaközeg egyidejűleg a második dugattyú fejének a terébe kerül, ahol expandál, ezáltal tovább hűl egy alacsonyabb hőmérsékletre s cseppfolyósodik. Ez az expanzíós tér egy szelepen

keresztül össze van kötve a vákuumkryosztáttal (8c ábra).

A munkaközeg lehűti a vákuumkryosztátot majd visszaáramlik a regenerátoron keresztül a kompressziós térbe, s a regenerátorban tárolt hőt elnyeli, és a környezet hőmérsékletén ismét visszakerül a héliumgáz a kompressziós térbe, ahol a folyamat megismétlődik (8d ábra).

Ultravákuum kryoszivattyúzásnál sokszor elegendő a cseppfolyós hidrogéngáz 20 °K hőmérséklete, ez esetben a nagy szívásebesség, a 10^3 l/sec elegendő a szívási idő csökkentésére a műveletsorok elvégzéséhez. A mélyebb hőmérséklet, s ezzel a nagyobb szívásebesség cseppfolyós héliummal érhető el a Stirling-rendszer alkalmazásával. Ez lehet közvetlen áramoltatása kryosztáton keresztül vagy a gyártott cseppfolyós héliumot egy tároló edénybe összegyűjtve táplálják a merülő vagy párologtatós kryosztátokat.

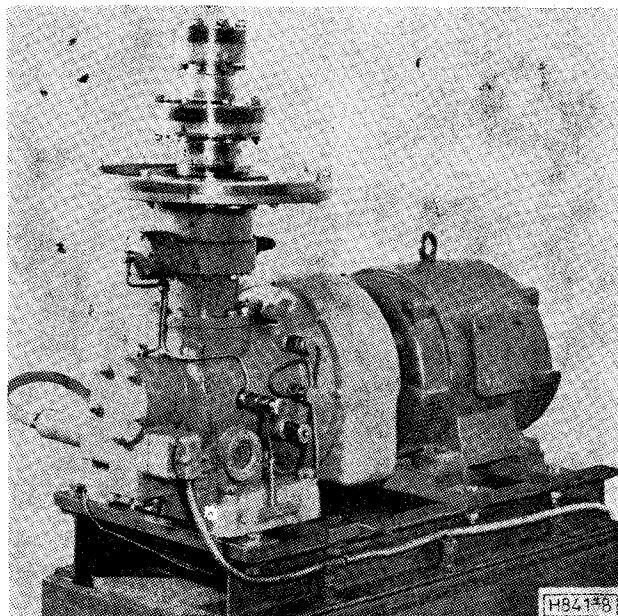
A mélyhőmérséklet által elért szuper-ultravákuumot, s a nagyobb szívósebességet csak akkor célszerű alkalmazni, mikor az műszakilag is indokolható; pl. vékony atomos rétegek felvitelénél, az újrafedési idő hosszabbításánál, diszlokációmentes epitaxiális rétegeknél, nagy integrált sűrűségű mikrostruktúrák készítésénél, a vonalkiszélesedés problémák elkerülésénél. Sorolhatók még mindazok az előnyök, melyek elérhetők a szuperultravákuum alkalmazásával a mikroelektronikában.

A Stirling-féle héliumgáz cseppfolyósító gép közvetlen összekapcsolása az ultravákuum-kryosztáttal gyors lehűlést és felmelegedést tesz lehetővé, nagymértékben elősegíti ezen eszközök ipari alkalmazhatóságukat. Az utóbbi időben jelentős eredményeket értek el a Stirling-rendszerű hélium-cseppfolyósító gép 1 kW-os konstrukciójával. Az új konstrukció előnye, hogy a henger és a dugattyú között nincs kenőanyag, a száraz teflontömítés a mozgó dugattyúnak kb. ezer óra üzemidőt biztosít.

A kryo-szivattyúzás technikai részletének leírása; mint a felületek atomos gázzrétegének letisztítása, a pormentesség biztosítása, a szuper-ultravákuum tisztasági feltételei, az elért vákuum mérése, a kryosztátok telítettségének megállapítása újraaktiválása, a rendszer levegőre hozása, mind olyan feladatok, melyek túlmennek jelen dolgozat keretein.

A Stirling-ciklusú egyszerű héliumgázt cseppfolyósító gép közvetlen alkalmazása a fizikai és híradástechnikai eszközök területén is jelentős. A mélyhőmérsékletek mind szélesebb területen találnak alkalmazásra, a mikrohullámú kis zajú erősítőknél, mint a 26 °K-nél zajmentes parametikus erősítőknél, vagy a 4,2 °K-nél zajmentes mazereknél, sokcsatornás infragázást detektáló félvezetőknél. Az infradetektorok hűtésére szintén zártciklusú törpe Stirling 45 W-os hűtőgépet használnak, többek között a felderítő műholdakban. Ma már széles skálája áll rendelkezésre a Stirling-ciklusú berendezéseknek kis és nagy teljesítménnyel. Mélyhőmérsékletet használnak fizikai méréseknél, a magfizikában és az űrszimulációnál, a biológiában, a szupra vezetőknél és sorolhatnánk számos ipari alkalmazását is.

A szuper-ultravákuum gyors elérését a kryo-technológia 10^4 – 10^6 l/sec szívásebességével hozta a



8. ábra. 1 kW teljesítményű Stirling ciklusú hélium-cseppfolyósító gép vákuumrendszer nélkül

mindennapi alkalmazáskörébe, s ezt az új eredményt a mélyhűtőgépek közvetlen összekapcsolásával az ultravákuum-kryosztátokkal érhetjük el.

I R O D A L O M

- [1] Claude G.: C. R. Acad. Sci. Paris. 134, 1568, 1902.; Liquid Nitrogen, Oxigen. Paris, 1926.
- [2] Dawson J. P.: Prediction of cryopumping speeds in space simulation chambers. I. Spacecraft. vol. 3, n° 2, 1966.
- [3] Chubb J. N.: The performance and application of liquid helium cooled cryopumps. Symposium on engineering problems in thermo-nuclear research. Frascati, Italy may. 1966.
- [4] Thibault J., J., Roussel et Nanoboff: Le Cryopompage. Technique Du Vide, 1966.
- [5] Thibault J. J., Roussel J., Nanoboff A., Didier P.: Precise measurement of coefficient of a gas on a liquid helium cooled surface. Société L'Air Liquide, Centre d'Etudes Cryogéniques 38. — Sessenage. France, 1966.
- [6] Redhead P. A.: The desorption spectrometer as an analytic tool in ultrahigh vacuum investigation. Vacuum Symposium Transaction. 1959.
- [7] Weinhold J.: Cryogenerators for very low-temperatures, application of cryogenics. Philips in sciences and industry. 13/14, 1967.
- [8] Wang E. A., Collins Jr. and Haygood J. D.: General cryopumping study. Plenum Press Inc. New York, vol. 7. 1962.
- [9] Budincevits A.: Ultravákuum-rendszerek. Finommechanika, Budapest. 1965. január.
- [10] Budincevits A.: Vákuumfizika a híradástechnikában. Híradástechnika. XXVIII. évf. 8., 1977.
- [11] Köhler J. W.: The Gas Refrigerating Machine And Its. Position In Cryogenic Technique. Philips Technise Rew. 1955.
- [12] Köhler J. W.: The Stirling-cycle application of cryogenic temperature. Philips Research Laboratorie. Einhoven, 1965.