

# Kis-zajú mikrohullámú vevőkészülékek

DR. KENDERESSY MIKLÓS  
Távközlési Kutató Intézet



## ÖSSZEFOGLALÁS

Kis-zajú mikrohullámú vevőkészülékekre mindig szükség volt, mióta mikrohullámú technikával foglalkozunk. Különösen aktuálissá vált ez a kórdós a műholdas hírközlés világában, ahol az adóteljesítmények korlátozva vannak, ezért a vételt javítani csak érzékenyebb vevőkészülékekkel lehet. Ez a cikk áttekintést ad arról, hogy milyen módszerekkel lehet alacsony zajhőmérsékletet biztosítani, kiemelten foglalkozik a Josephson-effektus alkalmazásával elért eredményekkel. Összehasonlításképpen azonban a super-Schottky diódával elért eredmények is ismertetve vannak. A gyakorlati megoldások ismertetésén kívül ezek összehasonlító elemzése és értékelése is megtalálható. Végül egy diagram ad áttekintést az elért eredményekről.

## Bevezetés

Egy előző cikkben [1] röviden össze van foglalva a Josephson-effektus elve és alkalmazási módja a mikrohullámú technikában. Eszerint a lazán csatolt szupervezetőkből álló Josephson átmenet jól felhasználható mikrohullámú jelek keltésére, detektálására és keverésére. Segítségével nagyon kis zajú, igen magas frekvencián működő vevőkészülékeket lehet készíteni. Ilyen vevőkészülékekre elsősorban távolsági vételek esetén van szükség, aminek egy jellegzetes példája a műholdak jeleinek vétele. A műholdakról a földre jutó teljesítménysűrűség nagyon határozottan korlátozva van, ezért a jel/zaj viszony javításánál nagyon fontos a vevőkészülék saját zajának csökkentése. A következőkben áttekintést kívánok adni arról, hogy a Josephson-effektus alkalmazásával milyen eredményeket lehet elérni és összehasonlításképpen néhány egyéb eredményről is beszámolok, melyeket Schottky diódás keverőkkel értek el.

## Vevőkészülékek zaj-szempontról kritikus áramköröi

A mikrohullámú tartományban használható nagy érzékenységu vevőkészülékek szinte kivétel nélkül szuperheterodin rendszerűek. Egy ilyen vevő elvi felépítése az 1. ábrán látható. A nagy érzékenység elérése érdekében rendkívül fontos az előerősítő, melynek kis saját zajtényezővel és nagy erősítéssel kell rendelkezni. Ilyen erősítőt tranzistorokból csak néhány GHz-ig lehet készíteni, mai alkatrészekből. E fölött parametrikus erősítőket lehet alkalmazni. Ezek egy speciális változata a Josephson átmenet felhasználásával készített parametrikus erősítő. A parametrikus erősítő szobahőmérsékle-

## DR. KENDERESSY MIKLÓS

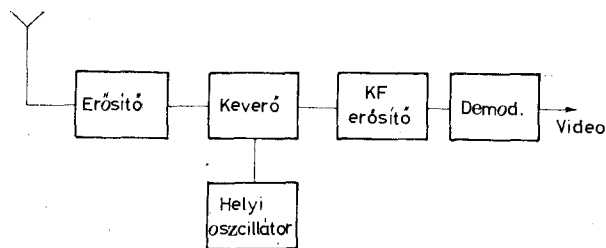
1958-ban szerzett gyengeáramú villamosmérnöki oklevelet a Budapesti Műszaki Egyetemen. Munkáját a Távközlési Kutató Intézetben kezdte, ahol jelenleg is dolgozik. Első szakterülete mikrohullámú műszerek fejlesztése volt. E témából szerzett egyetemi doktori címet 1962-ben, majd a műszaki tudományok kandidátusa címet 1967-

ben. 1969 óta foglalkozik mikrohullámú berendezések tervezésével. Ezen a téren elért eredményeiért 1978-ban Állami Díjat kapott. 1963 óta részt vesz az egyetemi oktatásban, munkásságáért c. egyetemi docensi fokozatot kapott. 1958 óta tagja a MATE-nak, jelenleg elnökségi tag és az Elektronikus Műszer Szakosztály elnöke. A Virág-Pollák díj és a Kolos Richárd díj tulajdonosa.

ten is kis saját zajjal rendelkezik, hűtött változata azonban még ennél is jobb. Nagyon jó eredményt lehet elérni a Josephson-effektus felhasználásával, amiről a későbbiekben lesz szó. Ezeket az erősítőket általában 10 GHz környékéig lehet jól használni és csak különleges módszerekkel [35] lehet magasabb frekvenciákat elérni.

10 GHz fölötti frekvenciákon az előerősítők alkalmazása egyre nehezebb, ezért a vevőkészülékek bemeneténél közvetlenül keverő következik. Ilyenkor különösen fontos, hogy a keverő saját zaja és vesztése minél kisebb legyen. Nagyon jó eredményeket lehet elérni Schottky diódás keverőkkel, különösen ha erősen hűtött környezetbe (1–20 K) helyezük őket. Még kisebb zajtényezőt lehet azonban elérni a Josephson-átmenet alkalmazásával.

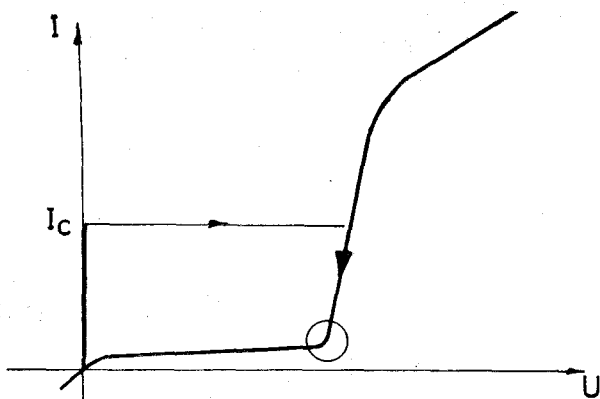
Egy Josephson-átmenet áram-feszültség karakterisztikája a 2. ábrán látható. Látható, hogy az átmeneten jelentős áram tud átfolyani úgy, hogy nem keletkezik rajta feszültség. Ez a szupervezető jelleg, mely akkor is jelentkezik, ha két szupervezető laza csatolásban van egymással (vékony szigetelő rótegván köztük). Az  $I_c$  kritikus érték



H-260-1

1. ábra. Mikrohullámú vevő tömbvázlata

Beérkezett: 1986. XI. 5. (□)



H-260-2

2. ábra. Josephson-átmenet áram-feszültség karakterisztikája

elérése után hirtelen megnő a feszültség és az átmenet normál félvezetőként kezd viselkedni. Ha viszont csökkentjük az áramot, akkor a feszültség folyamatosan csökken, de a karikával jelölt pontban igen gyors a változás. A karakterisztikának ezt az erősen nemlineáris jellegét lehet jól felhasználni keverők készítésénél. A Schottky diódákkal összehasonlítva, a meredekség változása százszor nagyobb a Josephson-átmenet esetén. Ez teszi lehetővé a kis konverziós veszteségek realizálását.

A vevőkészülék következő fokozata a helyi oszcillátor, melynek jeléből a keverő a középfrekvenciát képezi. Helyi oszcillátorként bármilyen mikrohullámú jelforrás felhasználható, mely elegendő teljesítménnyel rendelkezik és megfelelő frekvenciájú. Speciális megoldásként maga a Josephson átmenet is felhasználható. Ha ugyanis az átmeneten feszültség van, akkor az átmenetben igen nagy frekvenciájú rezgés is jön létre (ez volt Josephson megállapítása 1962-ben), melynek frekvenciája:

$$f/U = 483\,593,718 \pm 0,000 \text{ MHz/mV.}$$

Vagyis a frekvencia és a feszültség lineárisan arányos, és igen kis feszültségek esetén is már GHz nagyságú rezgés jön létre. Ennek a rezgésnek a teljesítménye igen kicsi ( $10^{-8}$  W alatt van), ezért normál keverők meghajtására általában nem elegendő. Elég viszont ez a teljesítmény egy Josephson típusú keverőnek. Ebből adódóan a Josephson-keverők két típusa létezik:

- külső helyi oszcillátorral működő keverő, ahol az oszcillátor lehet egy második Josephson-átmenet is, de más munkapontba beállítva,
- saját helyi jellel működő keverő, mikora Josephson átmenet kettős feladatot lát el: rezgést kelt és kever.

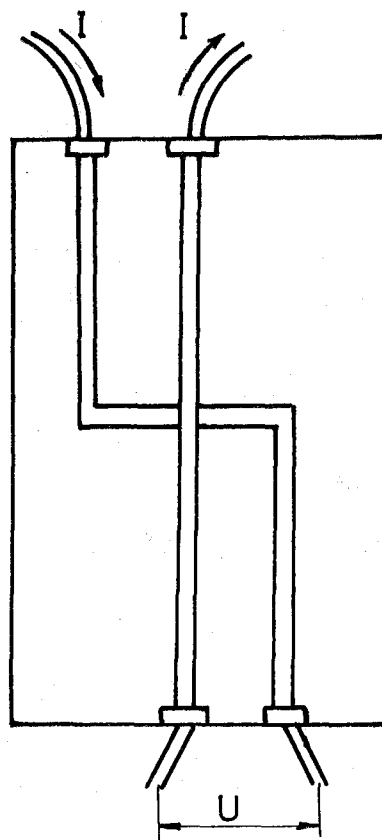
Mindkét megoldásra lehet példákat találni, de az első típus valamivel könnyebben realizálható, mert két egymástól függetlenül beállítható eszköz van.

A vevőkészülék következő fokozata a  $KF$ -erősítő. A  $KF$ -erősítők készítése általában jól ismert

feladatnak számít. A Josephson-effektus alkalmazási területén azonban olyan magas frekvenciák szokásosak, hogy az első  $KF$ -értéke is a GHz-es tartományba esik. Ilyen erősítők készítése pedig nagyon körültekintő, nehéz munkát jelent. Fokozza a nehézségeket, hogy ezeknek az erősítőknek nagyon kis zajúaknak kell lenni. A keverő vesztesége miatt ugyanis az eredő zaj növekszik. Ugyanakkor az összes erősítést a  $KF$ -ben kell megvalósítani, ami 120—140 dB lehet. Ilyen nagy erősítést csak többszöri transzponálással lehet realizálni. A legkritikusabb a bemenő fokozat, melynek frekvenciája GHz nagyságú, zajtényezője pedig a lehető legkisebb kell legyen. Ilyen fokozatokat tranzistoros erősítővel elő lehet állítani, de csak nagyon gondos munkával, ezért nehéz a  $KF$  elkészítése.

Minthogy a  $KF$ -fokozat tartalmazza az összes erősítést, ezért a demodulátor és videó fokozatok elkészítése nem jelent különösebb problémát. Leginkább a demodulátorra kell ügyelni, hogy a venni kívánt jelnek jól megfelelő típust alkalmazunk.

A következőkben röviden áttekintjük a Josephson-átmenetek készítésének alapvető technológiáit, típusait, melyekből a tényleges keverők felépülnek.



H-260-3

3. ábra. Keresztezett szupravezetők között kialakított tunnel-átmenet

### Josephson átmenetek típusai:

A Josephson-átmenet lényege két, egymással laza csatolásban levő szupravezető. A laza csatolás megvalósításának leggyakoribb módja valamilyen vékony szigetelő alkalmazása. Ez az ún. tunnel átmenet. A két szupravezető szétválasztása történhet más módon is, félvezetővel, normálvezetővel vagy igen vékony szupravezető csíkkal is. A következőkben ezeket vizsgáljuk meg röviden.

#### a) Tunnel átmenet

Tunnel-elemet vákuumpárolgatással vagy katódporlasztással lehet előállítani egy hordozó anyagon (3. ábra). Erre a célra Corning üvegek vagy Rutil a legalkalmasabbak. Az alapot először nagyon gondosan meg kell tisztítani, hogy a fémréteg jól tapadjon. Szokás szerint először négy csatlakozó pontot kell felvinni, amikkel a külső áramkörhöz lehet majd csatlakoztatni. Itt legcélszerűbb Indiumot alkalmazni, mert alacsony az olvadáspontja és jól tapad az üveghez. (A tunnel-elemekhez általában négy csatlakozó szükséges, kettő az árambevezetéshez, kettő pedig a feszültségméréshez.) A következő lépésben egy vékony csíkot kell kialakítani szupravezető anyagból. Ez lehet ón, ólom vagy nióbbium. Ezt a csíkot aztán oxidálni kell szobahőmérsékleten száraz levegőben vagy tiszta oxigénben. Magasabb hőmérséklettel gyorsítani lehet az oxidációt.

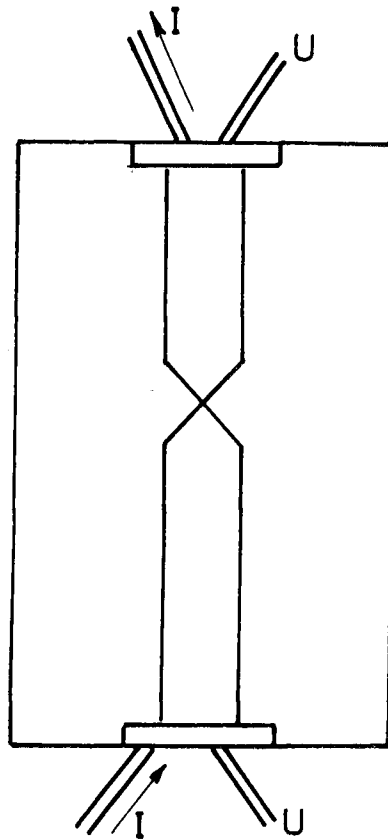
Amikor az oxidréteg már kb.  $10^{-9}$  m vastag, akkor egy újabb szupravezető csíkot kell felpárolgatni az első csíkra keresztben. Ahol a két szupravezető egymás fölött fekszik, ott alakul ki a Josephson-átmenet. Minden csík mindkét végén csatlakozik egy-egy indiumkivezetéshez. Gyakran még védőréteget is tesznek a teljes elrendezésre. Szupravezető állapotban a négy kivezetés a mérőszonda szerepét játssza. A tunnel-átmenet ellenállása szobahőmérsékleten 0,1 Ohm nagyságrendben van. Az áramelosztástól függően néha még negatív ellenállást is lehet mérni. Alacsony hőmérsékleten az ellenállás értéke  $10^{-3}$ —1 Ohm között fekszik.

Az oxidréteg helyett normálvezetőt is lehet alkalmazni. Ezt a szupravezető-normálvezető-szupravezető szendvics-szerkezetet Clarke [2] alkalmazta a kísérleteinél. A hordozó alaplemeze először egy szupravezetőt párolgatott (ólom, ón vagy indium). Erre párolgatott egy normálvezető (rendszerint réz) réteget és erre keresztbe egy újabb szupravezető csíkot. A szupravezető csíkok szélessége kb. 0,2 mm volt és  $5 \cdot 10^{-7}$  m vastagok voltak. A rézréteg vastagsága kb.  $10^{-6}$  m.

Félvezető anyagok alkalmazásáról Giaever és Zeller [3] számolt be. Ők tulajdonképpen tiszta tunnel-átmenetet csináltak, de az 1—2 mm vastag oxidréteg szélein kb. 5 nm mélységben félvezető alakult ki, pl. Kadmium-szulfid.

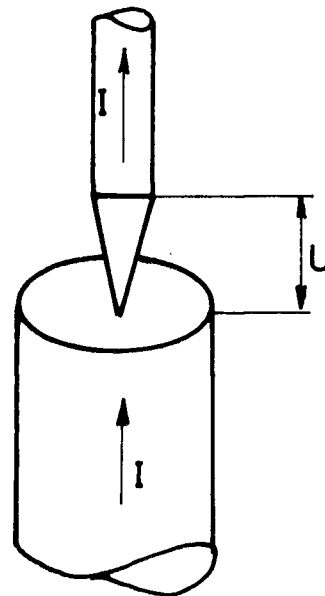
#### b) A Dayem-híd

Vékonyréteg tunnel-átmenetet Dayem [4] úgy alakított ki, hogy a szupravezetőnek különleges alakot adott (4. ábra).



H-260-4

4. ábra. Elkeskenyített vékonyréteg szupravezetőből kialakított tunnel-elrendezés (Dayem-híd)



H-260-5

5. ábra. Túérintkezős Josephson-átmenet

A szupravezető csíkok közepén egy kb.  $10^{-6}$  m vékony hidat képeztek ki. A rétegvastagság kb.  $10^{-5}$  m volt. Ilyen keskeny csíkok kialakítása nagyon nehéz a párologtató maszk szélein fellépő árnyékhatás és fényelhajlás következtében. Ezért a maszkba egy műanyagszálat helyeztek, amit a hordozóra ráragasztottak. Ezután a szál keresztben borotva-pengével elvágták és ott képződött a keskeny híd. Ezenkívül alkalmaztak elektron-sugaras trimmelő eljárást is. Egy érdekes eljárást ismertetnek Gundlach és társai [5], ahol lézergyarat alkalmaznak a maszk előállítására. Így sikerült nekik  $10^{-6}$  m széles hidat felpárologtatni.

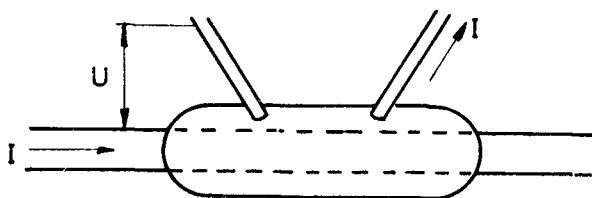
### c) A túérintkezős átmenet

Josephson-átmenetként széles körben alkalmaznak túérintkezőt (5. ábra). Ennek az az előnye, hogy a tűnyomás változtatásával a sík elektródon levő oxidréteget többé vagy kevésbé lehet átszúrni. Ezáltal állítható a szupravezetők közti gyenge csatolás mértéke, és így egy egész sereg különböző karakterisztikát elő lehet állítani. Ezek a karakterisztikák a tunnel átmenet és a Dayem-híd karakterisztikái között lehetnek. A túérintkezés azonban nagyon érzékeny a rázkódásokkal szemben. Ezt a hibát azonban megfelelő mechanikus felépítéssel és szerkezettel nagyban csökkenteni lehet. Ilyen megoldásokat ismertetnek Contaldo [7] és Kamper [6].

A túérintkezés egyik változatában egymásra keresztben fekvő oxidált drótokat használnak, melyeket egy ragasztócsepp segítségével tartanak egymással érintkezésben. Egy másik megoldásnál Clarke [8] kb. 1 mm átmérőjű ón és ólom golyókat alkalmazott, melyeket kis nyomással szorított össze. Így egy sereg pont-érintkezést lehetett előállítani. Ezekkel az átmenetekkel a távoli infravörös tartományban végzett kísérleteket.

### d) Csepp-elem

A csepp-elemet először Clarke [9] alkalmazta. Ez egy oxidált nióbbium drótból áll, melyre 1–5 mm hosszú forrasz-cseppet helyeznek el (6. ábra). Ebbe a forrasz-cseppbe két rézdrótot helyeznek el és így képezik ki a feszültség- és áram-hozzávezetések. A tunnel-átmenet a nióbbium drót és a forrasz-csepp között képződik. Ilyen módon sokféle átmenetet sikerült kialakítani, melyek 7 K alatt már szupravezetők (Warren és Bader [10]).



H-260-6

6. ábra. Csepp-elem, réz feszültségmérő szondákkal

A tunnel-elem helyét gyakran úgy képezik ki, hogy borotva-pengével bemetszik az oxidréteget. Így többszörös átmenetek is kialakíthatók egyetlen forrasz-cseppen belül.

A csepp-elem egy ún. hideg-forrasztási hely, melynek szobahőmérsékleten kb. 1 Ohm ellenállása van. A gyakorlatban a csepp-elem felét is lehet Josephson-átmenetként alkalmazni, ha szobahőmérsékleten megfelelő ellenállása van. Ezek az átmenettípusok a könnyű előállítási lehetőség miatt jól kezelhetők.

Valamennyi átmenet közül a tunnel-elem használható a legjobban, mert a legstabilabb megoldás. Kísérletek végzéséhez a tús átmenet is jó, mert könnyű előállítani, de nehéz a rendszert stabilizálni. A tú könnyen elmozdul, eltörik és akkor mindent lehet előlről kezdeni.

A következőkben áttekintést láthatunk az eddig elért eredményekről frekvencia-sávonkénti csoportosításban.

### 10 GHz alatti vevőkészülékek

A 10 GHz alatti frekvenciasávban elért legjobb eredményekről ad áttekintést az 1. táblázat. Bár

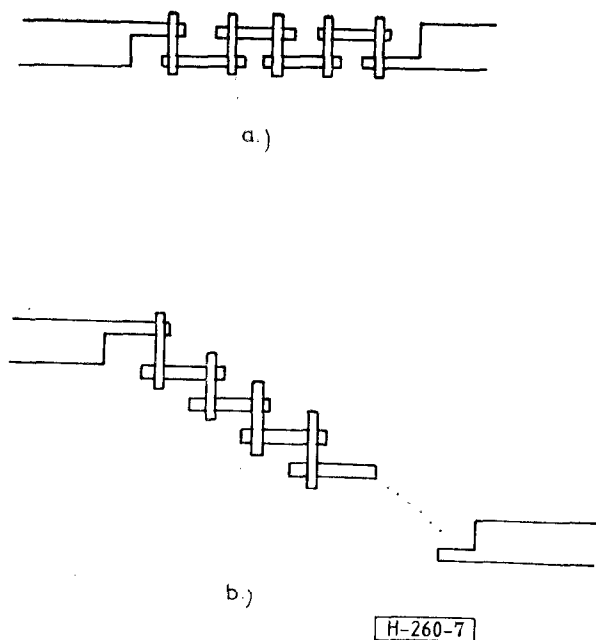
1. táblázat  
10 GHz alatti frekvenciasávban elért eredmények

Szerző	Környezeti hőmérséklet	Frekvencia GHz	Zajhőmérséklet
11 Vystavkin (1977) (paramp)	4,2 K	9	210 K
12 Wahlsten (1978) paramp	4,2 K	10	30 K
13 McColl (1977) Schottky	1,2 K	9	6 K
14 Rudner (1979)	4,2 K	9	40 K
15 Calander (1981) paramp	4,2 K	10	20 K

ezeknek a frekvenciasávja a legalacsonyabb, mégis csak viszonylag későn, 1977-ben sikerült az első eredményekről beszámolni. Ennek legfőbb oka az, hogy a Josephson-átmenet magasabb frekvencián működik, és ezért az első eredmények is ott születtek.

A legelső eredményről Vystavkin és társai [11] számolnak be a Szovjetunió Tudományos Akadémiájának Rádiótechnikai és Elektronikai Intézetéből, együttműködve a Moszkvai Állami Egyetem Fizika Tanszékével. Kísérleteikhez Nb-Ta tús átmenetet használtak. A karakterisztika negatív ellenállású szakaszát használták fel parametrikus erősítő készítésére. A pumteljesítményt is maga az átmenet állította elő. Az átmenetet magába foglaló szerelvényt folyékony héliumba mártva hűtötték le 4,2 K-re. Az így elkészített erősítő 9,37 GHz-en működött és 20 dB-t erősített. Sávszélessége 8 MHz volt és zajhőmérséklete 210 K. Ez a zajhőmérséklet lényegesen kisebb, mint amit szobahőmérsékletű parametrikus erősítőkkel el lehet érni, de lényegesen nagyobb, mint amit egy Josephson-átmenettől el lehet várni. A későbbi eredmények be is bizonyították, hogy ennél sokkal kisebb zajtényezőt is el lehet érni.

Egy évvel később Wahlsten és társai [12] már olyan parametrikus erősítőről számolnak be, mely



7. ábra. Josephson-átmenetekből alkotott sorozatok

10 GHz-en 30 K zajhőmérsékletű. Az erősítés 24 dB, a sáv szélesség pedig 15 MHz. A pumpteljesítményt egy külső Gunn-oszcillátor szolgáltatta, a teljesítmény  $-50$  dBm körüli volt. Nagyon érdekes viszont a parametrikus erősítő megvalósítási módja. Kétféle változatban 10 illetve 40 Josephson átmenet van sorbakapcsolva és ezek végül is mikrohullámú szalagvonalba vannak beiktatva. Minden elemi átmenet tunnel típusú, melyet ólom-ólom-oxid-ólom rétegek alkotnak. A rétegeket katódporlasztással vitték fel, a rétegvastagság  $0,2-0,3 \mu$ . Az átmeneteket kétféleképpen rendezték el, ami a 7. ábrán látható. Az a. ábra szerinti megoldásnál összesen 10 db átmenet van sorbakötve, melyek felülete  $30 \times 30 \mu$  és a teljes hosszúság  $0,8$  mm. A b. ábra szerinti változatnál 40 db átmenet van sorbakötve, ezek felülete  $8 \times 8 \mu$  és a teljes hosszúság  $1,8$  mm. Ezek az átmenetek a hozzávezető szalagvonalal együtt  $1 \times 1$  inch méretű Corning 7049 típusú,  $0,8$  mm vastag üveglemezen vannak kialakítva. Ezt a teljes áramkört védőtokba helyezve olyan hűtőgéphez helyezték, melynél a hőmérséklet  $1,5$  és  $10$  K között változtatható. A legjobb eredményt a  $30 \times 30 \mu$ -os átmenetekkel érték el és a környezeti hőmérséklet nem volt kritikus, úgyhogy a folyékony hélium  $4,2$  K hőmérséklete teljesen megfelel, nincs szükség a bonyolult hűtőgépre.

Három évvel később Calander-nek és társainak [15] még jobb eredményt sikerült elérni. Ők is ólom-ólomoxid-ólom felépítésű tunnel átmenetet alkalmaztak kb.  $50 \mu$  felülettel, és az átmenetet folyékony héliumba merítették ( $4,2$  K). A tunnel átmenet felhasználásával olyan parametrikus erősítőt készítettek, mely  $10$  GHz környékén működött, az erősítése  $8$  dB volt, a zajhőmérséklet pedig  $20$  K. Az erősítő érdekessége, hogy a pumpteljesítményt maga a Josephson átmenet szolgál-

tatta. Az erősítő széles sávú működése érdekében sorbakapcsolt ellenállásból és induktivitásból álló söntöt alkalmaztak, amivel egyúttal a munkaponti stabilitást is sikerült megnövelni. Érdekes megemlíteni, hogy Walhsten [12], Calander [15] és az itt nem részletezett Rudner [14] mind a svédországi Chalmers egyetem kutatói, akik a parametrikus erősítővel intenzíven foglalkoznak. Ez is a téma iránti széles körű érdeklődést bizonyítja.

Összehasonlításképpen álljanak itt McColl és társainak [13] Super Schottky diódás keveréssel elért eredményei. Az eredő zajhőmérséklet  $6$  K, ami lényegesen jobb, mint a Josephson átmenettel készített parametrikus erősítők eredő zajhőmérséklete (1. táblázat). Meg kell azonban jegyezni, hogy azt a zajhőmérsékletet  $1,2$  K hőmérsékleten érte el, és a cikk tanúsága szerint a zajhőmérséklet a környezeti hőmérséklettel lineárisan nő, tehát a folyékony hélium  $4,2$  K hőmérsékletén még mindig jobb, mint a parametrikus erősítőké. A másik fontos dolog, hogy a Schottky diódák legjobb alkalmazási területe a  $10$  GHz körüli frekvencia, a Josephson-átmenet pedig annál magasabb frekvenciákon használható igazán jól. Ez látható a következő fejezetben.

## 10–100 GHz tartományú vevők

Ebben a tartományban a Josephson átmenet alkalmazása egyértelműen jobb eredményt biztosít, mint a Schottky dióda. A Josephson átmenettel megvalósított keverők adatairól nyújt áttekintést

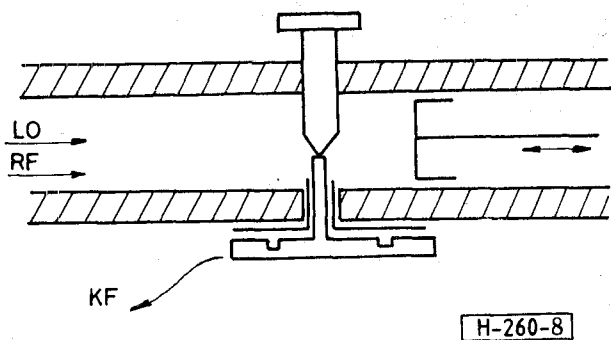
2. táblázat  
10–100 GHz frekvenciasávban működő Josephson-keverők

Szerző	Környezeti hőmérséklet	Frekvencia GHz	Zajhőmérséklet
17 Taur (1973)	8 K	36	300 K
16 Taur (1974)	1,4 K	36	54 K
18 Edrich (1976)	4,2 K	47	70 K
19 Richards (1978)	1,5 K	36	14 K
20 McGrath (1981)	1,5 K	36	15 K
21 Smith (1981)	4,2 K	36	10 K
22 Smith (1983)	4,2 K	36	33 K
23 Slusky (1981)	1,6 K	14,4	48 K
		16,8	48 K
24 Callegari (1981)	4,2 K	44	27 K
25 Rudner (1981)	1,5 K	73,5	20 K
26 Fujisawa (1984)	4,2 K	70	121 K

a 2. táblázat. A táblázatból gyors áttekintéssel két dolog állapítható meg:

- az első eredmények sokkal hamarabb megszülettek (már 1973-ban),
- az elért zajtényezők általában alacsonyabbak, mint a  $10$  GHz alatti parametrikus erősítőknél.

Az első kísérleti eredményről Taur és társai számoltak be 1973-ban [17]. Kísérleteiket  $36$  GHz-n végezték  $7 \times 3,5$  mm-es csótápvonalban. A Josephson-átmenetet Niobium tús kivitelben készítették el. Az átmenet elé hangoló csavart, mögéje pedig állítható rövidzárt építettek a tápvonalba, így



8. ábra. Taur kísérleti összeállítása (1973-ban)

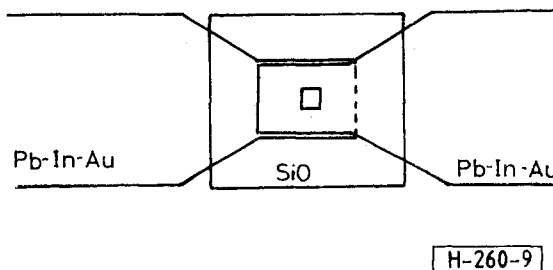
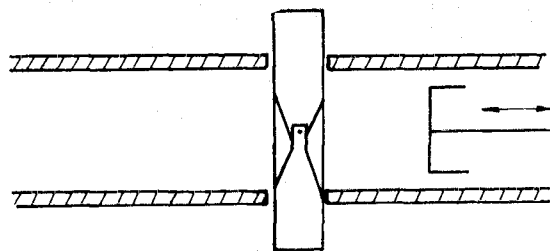
oldották meg a hangolás kérdését. A kikevert közép-frekvenciás jelet mikrohullámú fojtón keresztül vezették el, hogy a mikrohullámú jel ebbe az irányba ne szivároghasson el. Az elvi felépítést a 8. ábra mutatja. Ezzel a módszerrel több mint 100 MHz sáv szélességet tudtak elérni. Helyi oszcillatorként külső jelforrást alkalmaztak, a jelet iránycsatolón keresztül csatolták be a tápvonalba. Az egész szerelvényt 8 K-ra hűtötték és így 300 K zajhőmérsékletet sikerült elérniük. Különösen kiemelkedő eredménynek számít, hogy a keveréskor általában fellépő veszteség helyett 6 dB erősítést sikerült kimutatniuk. Ezt az erősítést ítélték a legfontosabbnak, ezért is emelték ki cikkük címeiként.

Alig egy évvel később ugyanez a szerző-hármas már új eredményről számol be [16]. Kísérleteikben két lényeges változtatást eszközöltek:

- vanádiumtűt alkalmaztak nióbium helyett,
- a szerelvényt 1,4 K-re hűtötték (8 K helyett).

Ennek a két módosításnak az eredményeképpen ugyanezzel a szerkezeti felépítéssel 54 K zajhőmérsékletet sikerült elérniük, miközben a „keverési erősítést” 17 dB-re növelték. Josephson 1962. évi elméleti számításait ezzel a megoldással lehetett első ízben igazolni. Ezért is nagyon jelentős ez a kísérlet.

Ugyanebben a 36 GHz-es sávban sokan folytattak még kutatómunkát és sok szép eredményről számoltak be cikkekben. 1978-ban Richards és társai [19] végeztek kísérleteket 7×3,5 mm-es csőtápvonalban kialakított keverővel. Kísérleteikhez vékonyréteg átmenetet használtak, amit szilícium lapkára katódporlasztással és oxidálással képeztek ki. A szilícium lapkát a csőtápvonalban az elektromos erővonalakkal párhuzamosan helyezték el. A lapka 0,3 mm vastag, 1 mm széles és 19 mm hosszú volt, és azon egyetlen átmenetet alakítottak ki. A szupravezető elektródok anyaga ólom-indium-arany ötvözet volt és ezek képezték az áramhosszvető felületeket is. A szilícium hordozóra először az egyik elektródot képezték ki 41 μ vastagságban. A lapka közepén aztán befedték azt 45 μ vastagon szilíciumoxiddal. Ennek a rétegnek a közepét eltávolították olyan méretben, mint amekkorára az átmenet felületét ki akarták képezni. Ez a felület 2×2 és 4×4 μ között változott. Végül felvitték a másik elektródot 50 μ vastagságban. A kísérleti elrendezés és az átmenet kialakítása a 9. ábrán látható. Az átmenet mögé állítható



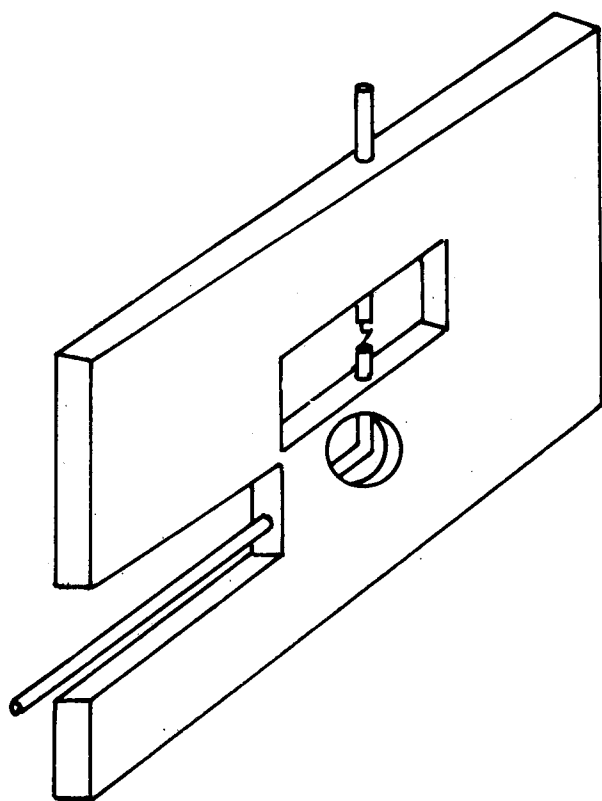
9. ábra. Richards-féle keverő elvi felépítése

rövidzárt, eléje pedig hangoló csavart helyeztek el, hogy a mikrohullámú illesztést minél jobban meg lehessen valósítani. Az egész mikrohullámú rendszert 1,5 K hőmérsékletre hűtötték le. A keverő kimenetéhez csatlakozó KF-erősítő saját zajhőmérséklete 50 K volt, frekvenciasávja pedig 30—80 MHz tartományt fogta át. A keverő zajhőmérsékletét különböző méretű átmenetek esetén mérték. A legkisebb zajt 2×2 μ méretű átmenet esetén tapasztalták: 14 K-t, ennél nagyobb átmenetek esetén a zajhőmérséklet is nőtt: 4×4 μ esetén 25 K-re. Mindenképpen jobbák ezek az eredmények, mint amit Taur el tudott érni (54 K), amiben a jobb technikai felkészültség, jobb KF-erősítő és a speciális ólom-indium-arany átmenet játszottak a fő szerepet. Még egy nagy előnye ennek a megoldásnak az, hogy a vékonyréteg átmenet sokkal stabilabb, mint a tűs, ezért a kísérleteket könnyebben lehetett elvégezni és megismételni.

Lényegileg a 36 GHz körüli keverő kísérleteket három helyen végezték, szoros együttműködésben:

- University of California, Berkeley;
- Yale University, New Haven,
- National Bureau of Standards, Boulder.

Az itt működő kutatócsoport a későbbiekben még többször publikált új eredményeket. Kísérleteikhez mindig ugyanazt a rendszert alkalmazták, amit részletesen Richards cikke ismertet [19], de annak egyes részeit változtatták és így értek el új eredményeket. Két lényeges módosítás történt, melyek mindegyike az alkalmazott anyag típusára vonatkozik. A [20] és [21] közleményben egyaránt ón, óndioxid, ón rétegekből kialakított vékonyréteg átmenetet ismertettek. Az átmenet felülete kb. 10 μm<sup>2</sup>. Az elért zajhőmérséklet hasonló nagyságú, 10—15 K. Van viszont egy lényeges eltérés az előző kísérlethez képest, és pedig az, hogy a 6—7 dB keverési veszteség helyett kb. 4 dB erősítést sikerült elérni. Ez nyilvánvalóan a másfajta anyag választásából adódik. Az ón és ólom egy-



H-260-10

10. ábra. Edrich cserélhető keverő szerelvénye

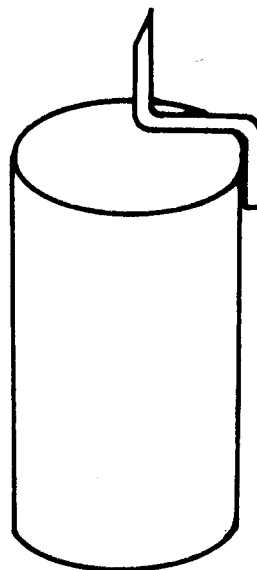
aránt jó szupravezető képességű anyag, és párologtatásuk, katódporlasztásuk is egyszerű. Ezért kényelmes ezeket felhasználni. Nagy hátrányuk viszont, hogy mindkét fém könnyen oxidálódik, ezért a belőlük készített átmenetek nem időállóak. Ezen a nehézségen igyekeznek ugyanők úgy segíteni, hogy a későbbi kísérleteiknél más anyagot: indium, indium-oxid és ólom-bizmut rétegeket alkalmaztak [22]. Némileg csökkentették az átmenet felületét is. Így az elért zajhőmérséklet is romlott, 33 K értéket mértek és eltűnt az erősítés is, kísértékű veszteséget (4 dB) tudtak kimérni. A legfrissebb publikáció alapján az látszik, hogy ezeket a kísérleteket tovább folytatják és fő céljuk különböző anyagok kipróbálása azonos mikrohullámú szerelvényben. A technológia fejlődésével várható, hogy jó minőségű és stabil átmeneteket sikerül majd előállítaniuk.

Más, magasabb frekvenciasávban is számos kísérletet végeztek a Josephson-átmenet alkalmazására. Ezek közül legkorábbi Edrich kísérlete [18] aki 47 GHz-en dolgozott. A korai időpontnak (1976) megfelelően tús átmenettel végezte kísérleteit, de azonnal úgy készítette el keverőjét, hogy a tút gyorsan lehessen cserélni. Ezért megtervezett egy befogó szerelvényt, mely a 10. ábrán látható. Egy vastag lemez közepén van a csőtápvonal méretének megfelelő kivágás. Ebbe alulról és felülől egy-egy nióbbium rúd nyúlik be. Az alsó rúd egy

koaxiális tápvonal belső vezetője, és ez a tápvonal biztosítja a középfrekvenciás jel elvezetését. A felső rúd magassága egy finomhangoló szerkezet segítségével állítható. Ezen van elhelyezve a nióbbium tús, melynek nagyított képe a 11. ábrán látható. A rúd végére 25  $\mu$  átmérőjű nióbbium huzal van forrasztva, melyet kémiai maratással kihegyeznek. A hegy 1  $\mu$  átmérőjű csúcsban végződik. Ezt kell nekinyomni az alatta levő rúdhoz, ezért kell a nagyon precíz finommeghajtás. Ennek a megoldásnak számos előnye van:

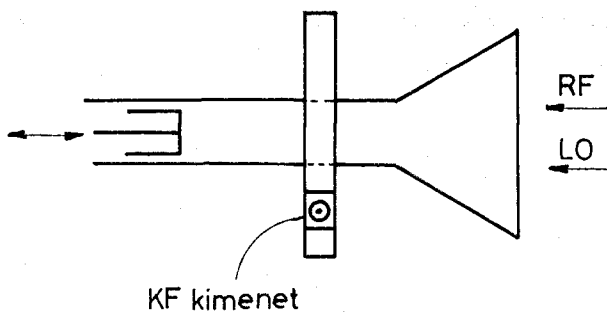
- az egész szerelvény a tápvonalrendszerből függetlenül elkészíthető, ezért többféle változatot is lehet előkészíteni;
- a tús átmenet anyaga könnyen változtatható, csak a szerelvényben levő rudak anyagát kell változtatni.
- a szerelvény a tápvonalrendszerben könnyen, gyorsan cserélhető, ezért csökkenthető a be-mérési idő.
- a tús átmenet nagy mechanikai stabilitással rendelkezik és a tápvonaltól függetlenül vizsgálható mechanikai szilárdság szempontjából. A szerelvényt hőtechnikailag is stabilizálni lehet.

Az így elkészített szerelvényt csőtápvonalba kell iktatni. Erre a célra a tápvonalrendszer úgy kell kialakítani, hogy ez a lemez-szerelvény közbeiktatható és ott szilárdan rögzíthető legyen. Az elvi elrendezést a 12. ábra mutatja. A keverő szerelvényre jobbról esik be mind a rádiófrekvenciás jel, mind a helyi oszcillátor jele. A rádiófrekvenciás jel rendszerint valamilyen antennára érkezik, ahonnan tápvonalon keresztül jut a keverőre. Ebbe a tápvonalrekeszbe lehet becsatolni egy iránycsatlón



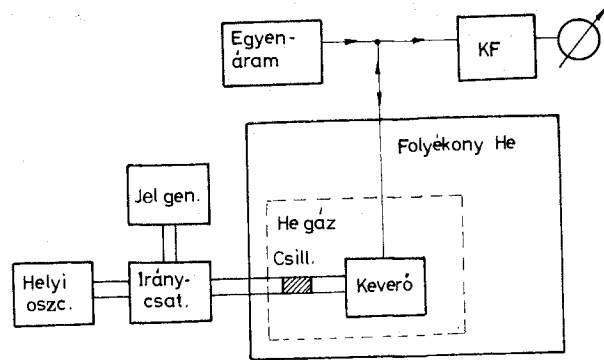
H-260-11

11. ábra. Nióbbium tús Josephson-átmenethez. A huzal átmérője 25  $\mu$ , a csúcshegy 1  $\mu$  átmérőjű



H-260-12

12. ábra. Fix keverő szerelvény helye egy mérő rendszerben



H-260-13

13. ábra. Callegari mérési összeállítása

keresztül a helyi oszcillátor jelét. A keverő mögött állítható rövidzár van, melyen a mikrohullámú illesztést lehet biztosítani. Végül az egész tápvonalrendszer folyékony héliumba van merítve (4,2 K), amely hőmérsékleten a nióbbium szupravezetővé válik. Ezzel a megoldással Edrich igen jó eredményeket ért el. A zajhőmérséklet 70 K volt 47 GHz-en és ezt az eredményt többször és biztonsággal el tudta érni, amiben nagyon nagy szerepe volt a nagy mechanikai szilárdságnak. A keverő rendszernek viszonylag nagy volt a vesztesége (12 dB), aminek egy része abból származott, hogy a keverőben levő állítható rövidzárát csak szobahőmérsékleten tudta beállítani, és nem volt rá módja, hogy a folyékony héliumba mártva utánhangolást eszközöljön.

1981-től több szerző számol be magasabb frekvencián végzett kísérletekről. Callegari és Buhrman 55 GHz-en, Rudner és társai 73,5 GHz-en, Fujisawa és társai 70 GHz-en végeztek kísérleteket. Callegari és Buhrman [24] nióbbium-nióbbium-oxid-ólombizmut anyagokból készítettket hordozóréteg szerkezetű Josephson átmenetet: vékonyréteg kvarc kizáró volt, melyre katódporlasztással vitték fel a rétegeket. Az átmenet felülete  $2 \times 4 \mu$  volt. A mikrohullámú keverő szerelvényt  $3,76 \times 1,88$  mm méretű csőtápvonalban alakították ki. A tápvonal kisebbik méretét lépcsős transzformátorral még tovább csökkentették, hogy az átmenet impedanciájához jobb illesztést kapjanak. Az átmenet mögé még állítható rövidzárát tettek, amivel a szerelvényt kismérésekben hangolni lehetett. A középfrekvenciás kimenet felé mikrohullámú fojtókat építettek be, melyek kb. 4 GHz-ig engedték ki a jeleket, a magasabb mikrohullámú jelek szivárgását megakadályozták. A tényleges középfrekvenciás jel 1–2 GHz között volt. Nagyon gondosan alakították ki a mérési összeállítást is. Ez látható a 13. ábrán. A keverő szerelvény elé egy fix csillapítót építettek be, mely szintén a hűtött térben helyezkedik el. Ezzel kettős céljuk volt. Egyrészt a szobahőmérsékletből adódó járulékos zajt csökkentették, másrészt a csillapító melegezésének mérésével pontosan mérni tudták a beeső mikrohullámú teljesítményt. A keverő szerelvény előtti csőtápvonalat vékony rozsdamentes acélból

készítették, úgyszintén a koaxiális tápvonalat is, mely a KF-jelet vezette ki. Ezzel a hővezetést csökkentették jelentősen. A keverő szerelvény és a fix csillapítót egy tartályba zárták, melyben hélium gáz volt és az egész tartályt merítették folyékony héliumba, így biztosították a 4,2 K környezeti hőmérsékletet. A keverő bemenete elé 10 dB csatlósú iránycsatolót tettek, ezen keresztül táplálták be a mérőjelet és a helyi oszcillátor jelét. A KF kimeneten keresztül juttatták be a Josephson átmenet előfeszítését biztosító egyenáramot és egy szétcsatoló áramkörtön keresztül vették ki a hasznos KF-jelet. Ez utóbbit spektrum-analizátorral mérték. Ennek a szerkezetnek az igen gondos kivitelezésével sikerült nagyon jó mérési pontosságot és nagyon jó eredményeket elérni. A legkisebb zajhőmérséklet, amit mérni tudtak, 27 K volt. Ekkor a keverőnek 6,4 dB keverési vesztesége volt. Végeztek olyan kísérletet is, amikor a keverési veszteséget akarták minimálisra csökkenteni. Így még erősítést is sikerült elérni 1,4 dB nagyságban, de akkor a zajhőmérséklet megnőtt 150 K-re, ami még mindig jó érték 55 GHz-en. Ezekben a kísérletekben a különbözően nagy pontosság, a gondosan előkészített mérés a kiemelkedő, ami meg is hozta a maga eredményét az igen kis zajhőmérsékletben.

A következő eredmény azért érdekes, mert egy svédországi kutatóhelyről származik, Chalmers University of Technology, Gothenburg. Az itt működő kutatócsoport sok érdekes eredményről számol be különböző cikkekben. Az első cikket Rudner és társai tették közzé 1981-ben [25]. A kísérletet 73,5 GHz-en végezték ólom-ólom-oxid vékonyrétegekkel, amiket üveg hordozóra vittek fel. Céljuk elsősorban a kis keverési veszteség elérése volt, és a minimális érték 2,2 dB lett. Közben mérték a zajhőmérsékletet is és igencsak jó eredményt értek el: 20 K. A zajhőmérséklet mérést azonban elég felületesen, pontatlanul végezték és saját véleményük szerint ez az érték 100 K is lehetett. Így is nagyon jó eredménynek számít. Kísérleteiket csőtápvonalban végezték és a környezeti hőmérsékletet 1,5 K-re állították be. A kis zaj ezzel is magyarázható.

Végül japán eredményről számol be Fujisawa és társainak cikke 1984-ből [26]. Kísérleteiket 70



GHz-en végezték, de a helyi oszcillátor csak 35 GHz-en működött. Ez ad vizsgálatainknak különös jelentőséget, mert felharmónikus keverésről van szó, ami általában rosszabb eredményeket szokott adni. Kísérleteikben nióbbium tús átmenetet használtak és csőtápvonalban építették fel a szerelvényt. A kísérleti összeállítás a szokásos, az átmenet mögött állítható rövidzár van, és azzal hangolják a szerelvényt. Környezeti hőmérséklet 4,2 K. Cikkekben egy kísérlet-sorozatáról számolnak be, ahol a legjobb eredmény 121 K volt, a legrosszabb 927 K. Eközben a keverési veszteség 5,7–11 dB között változott. Eredményeik azért különösen jelentősek, mert felharmónikus keverést alkalmaztak.

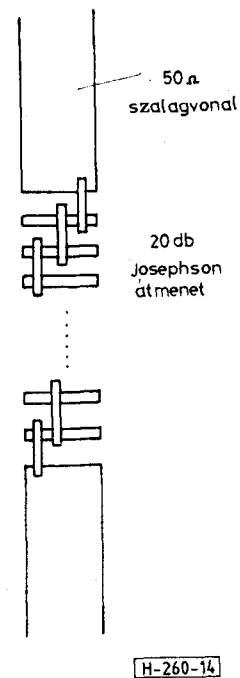
A keverőkön kívül parametrikus erősítőkkel is végeztek kísérletet, de kizárólag 35 GHz környé-

3. táblázat  
35 GHz környékén működő parametrikus erősítők

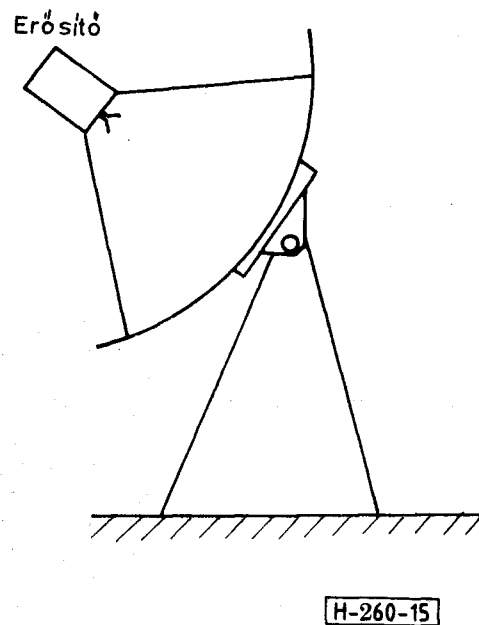
Szerző	Környezeti hőmérséklet	Frekvencia GHz	Zajhőmérséklet
27 Chiao (1976)	4,2 K	33	20 K
28 Taur (1977)	4,2 K	36	50 K
29 Goodall (1979)	4,2 K	33	60 K
30 Mygind (1979)	3 K	35	50 K
31 Levinson (1980)	4,2 K	35	400 K

kén. Az eredmények összefoglalása látható a 3. táblázatban. A kísérletekből az látszik, hogy lényegesen nehezebb kis zajhőmérsékletet biztosítani és az eredmények sem olyan jók, mint keverők esetén. A táblázatban felsorolt eredmények közül kettőt célszerű kiemelni: Chiao eredményét 1976-ból, mely a legkorábbi és legjobb eredmény és Goodall megoldását, mely átlagos zajhőmérsékletet eredményezett ugyan, de kivitele egész különleges. Mindkét erősítésnél több Josephson átmenetet alkalmaztak sorbakötve. Chiao és Parrish 33 GHz-en végezte kísérleteit [37] és Dayem híd-szerű megoldást alkalmaztak. 0,25 mm vastag kvarz hordozóra 10  $\mu$  ónréteget vittek fel és ebből marataással állították elő a vékony átmeneti réteget (ami a laza csatolást biztosítja). Az átmenet 1,2  $\mu$  széles és 0,5  $\mu$  hosszú darabból állt. Kísérleteiknél 160 db ilyen átmenetet kapcsoltak sorba egyetlen kvarc lapkán. Az átmenetek 2,8  $\mu$ -ra voltak egymástól. Ezt a lapkát aztán 10  $\times$  4 mm-es csőtápvonalba építették és ez egész szerelvényt folyékony héliumba mártották (4,2 K). Így nagyon jó eredményeket sikerült elérni. 3,4 GHz sáv szélességben 15 dB erősítést és 10–20 K zajhőmérsékletet sikerült elérni. Ez 1976-ban nagyon jó eredménynek számított. Kísérletüket megismételték úgy is, hogy csak 80 Josephson átmenetet készítettek egy kvarc lapkára, de ezeket ritkábban rakták. Az eredmények azonban nagyon hasonlóak voltak, sem javulást, sem romlást nem tapasztaltak.

Hasonló megoldást alkalmaztak Goodall és társai Svédországban, a Chalmers Universityn [29]. 20 db Josephson-átmenetet kapcsoltak sorba és ezt helyezték el mikrohullámú szalagvonal áramkörbe. Az átmeneteket ólom-ólomoxid-ólom vékonyréteg formájában 7059 típusú Corning

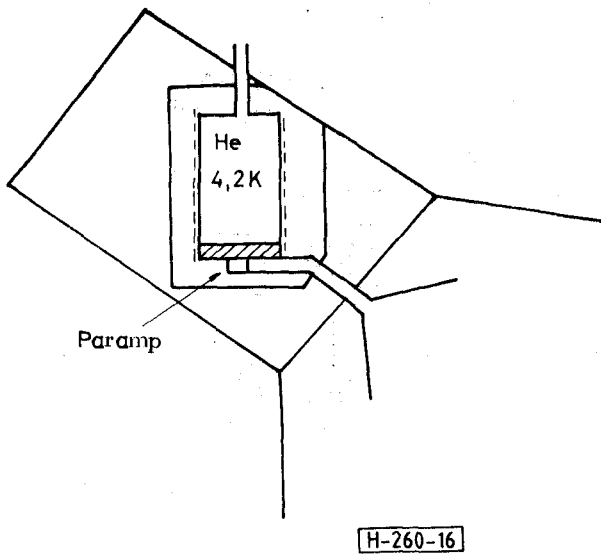


14. ábra. Sorbakapcsolt Josephson-átmenetek szalagvonalba iktatva



15. ábra. Kiszajú erősítő helye egy rádióteleszkóp antennában

üvegre katódporlasztással vitték fel. Egy-egy átmenet felülete kb. 20  $\times$  20  $\mu$  volt. Az áramkör elvi felépítése a 14. ábrán látható. Ezzel a megoldással 30,6–38,3 GHz között hangolható erősítőt tudtak készíteni, melynek erősítése 20 dB, zajhőmérséklete pedig 60 K volt. Ezt a nagyon kis zajú előerősítőt beépítették egy 25 m-es mikrohullámú parabola-antennába úgy, hogy az állandó hűtésről is tudtak gondoskodni. A beépítés részletei láthatók a 15. és 16. ábrán. Egy hőszigetelt kettősfalú edény belsejében van a folyékony hélium, mely a 4,2 K hőmér-



16. ábra. Parametrikus erősítő felépítése a 15. ábrán látható primer sugárzó belsejében

sékletet biztosítja. Ennek az aljára van jó hővezető rendszerrel felerősítve a Josephson átmenetkből felépített keverő. A venni kívánt jelek a primer sugárzó tölcser-antennáján keresztül érkeznek a keverőre, rövid úton, kis csillapítással. A kikevert középfrekvenciás jel a primer sugárzó belsejében tovább van erősítve, hogy onnan el lehessen vezetni. Az elvezetés koaxiális kábellel van megoldva a primer sugárzót tartó egyik láb mellett. Ennek a megoldásnak az a legfőbb előnye, hogy a keverő benne van az antennában, ezért a veszteségek minimálisra vannak csökkentve. Így tudták biztosítani a 60 K zajhőmérsékletet.

A Josephson átmenetes eszközökön kívül a super Schottky diódás keverőkkel is igen jó eredményeket lehet elérni. A 4. táblázatban arra látható néhány példa. A super-Schottky dióda lényegileg szupravezető állapotig lehűtött Schottky diódát jelent, melynél azonban az a minőségi változás következik be, hogy az elhanyagolható mértékű soros ellenállás mellett a kapacitás válik dominálónak. Ez szabja meg a működési frekvenciasávot is, ezért a Schottky dióda inkább az alacsonyabb sávban használható, 100 GHz felé lényegesen romlik az elérhető zajhőmérséklet. Edrich 1977-ben parametrikus erősítőt épített Schottky diódával, amit 18 K hőmérsékletre lehűtött [32]. Ezzel a megol-

4. táblázat

10–100 GHz fekvenciasávban működő Schottky-diódás keverők

Szerző	Környezeti hőmérséklet	Frekvencia GHz	Zajhőmérséklet
32 Edrich (1977)	18 K	47	100 K
33 McColl (1979)	1,2 K	30	6 K
34 Silver (1981)	1 K	31	10 K
		92	120 K
Kanter (1974)	1,4 K	95	100 K

dással 100 K zajhőmérsékletet sikerült elérni 47 GHz-en. Az erősítés 22 dB volt, ami szép eredmény. Edrich a kísérleteit 47 GHz-en végezte, mérési összeállítására erre a frekvenciára készült. Ez jó összehasonlítást tesz lehetővé egy másik publikációjával [18], ahol Josephson keverővel 70 K zajhőmérsékletet sikerült elérni. A dióda befogó szerelvény is nagyon hasonló a két esetben. Ha figyelembe vesszük, hogy a Josephson átmenet hőmérséklete 4,2 K volt, a Schottky diódás pedig 18 K, akkor ez a két zajhőmérséklet azonos eredménynek számít.

A 4. táblázatban szereplő másik két eredmény [33], [34] igen alacsony zajhőmérsékletet mutat, amihez hasonlókat csak a legjobb Josephson-keverőkkel [19–21] lehetett elérni. Ez is bizonyítja, hogy a kétféle megoldás nagyon hasonló eredményeket szolgáltat. Van azonban a super-Schottky diódának egy hátránya, az pedig az 1 K körüli környezeti hőmérséklet, amit nem lehet folyékony héliummal biztosítani, csak sokkal költségesebb, bonyolult és nagy térfogatú hűtőgépekkel. Ezenkívül a super-Schottky diódával nem lehet keverési erősítést elérni, mint Josephson-átmenet esetén, a veszteség itt 10 dB nagyságrendben van. Silver kísérleteiből [34] még azt is lehet látni, hogy a frekvencia növekedtével a Schottky dióda kapacitása egyre rontja a viszonyokat. 92 GHz-en a zajhőmérséklet 120 K és a keverési veszteség is megközelíti a 20 dB-t. Ezért 100 GHz fölött a super-Schottky dióda sem használható már, ott a Josephson átmenettel lehet még jó eredményeket elérni. Erről azonban a következő fejezetben lesz szó.

#### 100 GHz fölötti vevőkészülékek

100 GHz fölötti tartományban különösen jól használhatók a Josephson-átmenetek felhasználásával készült keverők. Az eddig elért eredményekről nyújt áttekintést az 5. táblázat. A táblázat első

5. táblázat

100 GHz fölötti frekvenciasávban elért eredmények

Szerző	Környezeti hőmérséklet	Frekvencia GHz	Zajhőmérséklet
35 Kuzmin (1979)	4,2 K	100	42 K
58 D'Addario (1984)	4,2 K	105	38 K
36 Taur (1978)	1,8 K	115	140 K
37 Dolan (1978)	1,5 K	115	100 K
38 Dolan (1981)	4,2 K	115	62 K
39 Phillips (1981)	4,2 K	115	60 K
40 Kerr (1981)	2 K	115	70 K
41 Ohta (1983)	4,2 K	115	20 K
51 Pan (1983)	4,2 K	115	20 K
42 Feldruman (1983)	4,2 K	115	70 K
43 Woody (1985)	4,5 K	115	70 K
44 Dyakov (1977)	4,2 K	127	$L=4$ dB*
45 Claassen (1978)	4,2 K	130	180 K
46 Ablyazov (1983)	4,2 K	150	150 K
39 Phillips (1981)	4,2 K	230	300 K
47 Suttén (1983)	4,2 K	230	300 K
48 Danchi (1983)	1,4 K	246	24 K
50 Edrich (1977)	4,2 K	300	220 K
48 Danchi (1983)	1,4 K	604	60 K

\*Csak a keverési veszteséget mérték, a zajhőmérsékletet nem.

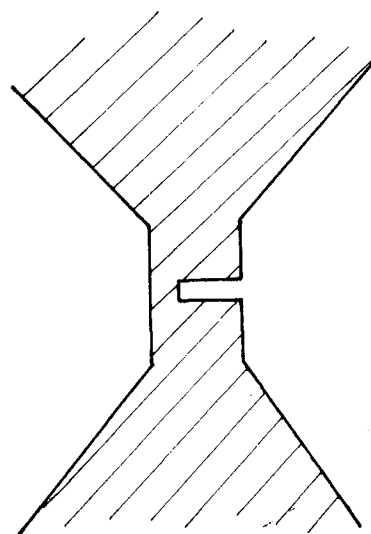
sorában egy parametrikus erősítő szerepel, amit Kuzmin és társai [35] fejlesztettek ki a Szovjet-unióban. Az elért zajhőmérséklet igen jó érték. Ezen az egy kísérleten kívül azonban az összes többi eredmény úgy született, hogy a Josephson-átmenetet keverőnek használták fel.

A táblázatból jól látható még, hogy a kísérletek zömét 100 GHz környékén végezték (115 GHz-en) és csak néhány eredmény van 300 GHz fölött. Ebből két dolgot lehet megállapítani:

- a Josephson-átmenet nagyon jól használható 115 GHz környékén, többeknek sikerült jó eredményt elérni,
- nagyon kevés laboratórium van felszerelve néhány száz GHz-es frekvenciasávra, amivel a kísérleteket egyáltalán el lehetne kezdeni.

A következőkben a 115 GHz-es kísérletekből emelünk ki néhányat, melyek különösen érdekes vagy jó eredményt mutatnak. A legelső eredményről Taur és Kerr számolnak be 1978-ban [36]. Kísérleteikhez nióbbium tűs átmenetet használtak, de a tartósság érdekében a tűt helyzetében rögzítették valamilyen ragasztószerrel, így a kísérleteket meg lehetett ismételni. Hordozóként 8260 típusú Corning üveget használtak, mert ennek hőtágulását tartották a legjobbnak. Ennek felületét 12  $\mu$  vastagon nióbbiummal vonták be és hozzászorították 18  $\mu$  vastag nióbbium huzalt, melynek végét kémiaiag kihegyezték. A tű csúcsának átmérője 0,25  $\mu$ -nál kisebb volt. A tűt úgy szorították a fóliához, hogy az átmenet ellenállása 20–30 Ohm között legyen. Az ily módon előkészített átmenetet 2,54  $\times$  1,27 mm méretű csőtápvonalba helyezték. Az átmenetnél a tápvonal magasságát 0,32 mm-re csökkentették, hogy jobb impedancia illesztést kapjanak. Az átmenet mögé állítható rövidzárt tettek, amivel a szerelvényt hangolni lehetett. A szerelvényt folyékony héliumba helyezték, de annak hőmérsékletét hűtőgéppel 1,8 K-re csökkentették. A hővezetés csökkentése érdekében a csőtápvonal egy szakaszát rozsdamentes acélból készítették, és falát levékonyították. A középfrekvencia értéke 1,4 GHz volt és különösen kiszajú *KF*-erősítőt alkalmaztak. A hozzávezető csőtápvonal és koaxiális tápvonal csillapítását gondosan kimérték és ezzel az értékkel korrigálták a mért zajhőmérsékletet. Így sikerült elérni a 140 K zajhőmérsékletet. Nemsokkal a közleményük megjelenése előtt még jobb eredményt is sikerült elérniük, 120 K zajhőmérsékletet, miközben a keverési veszteség 0 dB-re csökkent. Ennek az eredménynek a részleteit azonban nem közölték.

A következő közlemények három évvel későbből, 1981-ből származnak. Az elért zajhőmérsékletek akkor már 60–70 K értékűek. Dolan [38] és Kerr [40] ólom ötvözetből készült vékonyréteg átmenetet alkalmaztak kísérleteiknél. Az átmenetet csökkentett nagyságú csőtápvonalban (2  $\times$  0,35 mm) helyezték el. Az ólom vékonyréteget szilícium lapkára katódporlasztással vitték fel. A lapka vastagsága 0,1 mm volt, hossza 2,5 mm, szélessége pedig 0,4 mm. Az átmenet mindkét oldalán mikrohullámú fojtókat alakítottak ki a szivárgás csökkentésére és a tápvonalba állítható rövid-



H-260-17

17. ábra. Ólomból készült Dayem-híd alakja

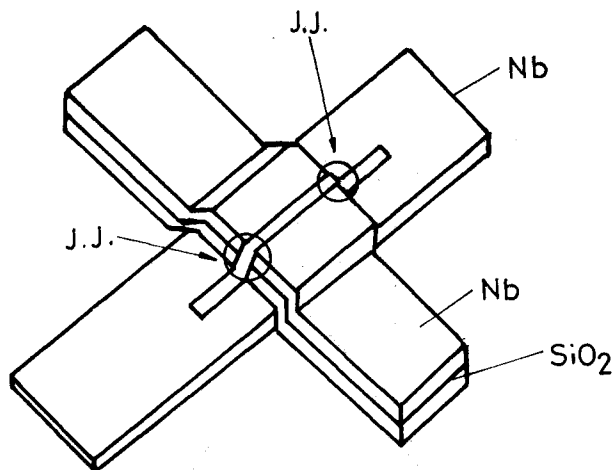
zárat építettek, amivel a szerelvényt ki lehetett hangolni. Az egész szerelvényt folyékony héliumba merítették (4,2 K). Így sikerült elérni 62 illetve 70 K zajhőmérsékletet.

Különösen érdekes Phillips és társainak kísérlete [39]. Ők Dayem hidat alkalmaztak kísérleteiknél, amit ólomból katódporlasztással állítottak elő. Az átmenet alakja a 17. ábrán látható. A középső csatoló szakasz keresztmetszete 1  $\mu\text{m}^2$ -nél kisebb volt. Szerelvényüket folyékony héliummal hűtötték 4,2 K-re. Kísérleteiket két frekvencián végezték. 115 GHz-en csökkentett magasságú négyszögletes csőtápvonalba építették a Josephson átmenetet és mögéje állítható rövidzárat tettek. Az elért legkisebb zajhőmérséklet 60 K volt. Végeztek kísérletet 230 GHz-en is, ahol többmódusú hengeres csőtápvonalat alkalmaztak. Az ekkor elért legkisebb zajhőmérséklet 300 K volt. Végeztek még kísérletet több átmenet sorbakapcsolásával is, de a hozzávezetések induktivitása miatt nem kaptak jobb eredményt.

Lényegesen jobb eredményt csak két évvel később sikerült elérni [41, 51]. Ezek közül különösen Ohta és társai [41] eredménye érdekes, mert egészen különleges módon készítették el a Josephson-átmenetet. Az átmenet szemléletes képe a 18. ábrán látható. Üveg vagy Kvarc hordozóra 10  $\mu$  széles nióbbium réteget visznek fel katódporlasztással. Erre keresztbe 1  $\mu$  vastag szilíciumdioxid szigetelő réteget képeznek ki, amit újabb nióbbium réteggel fednek le. Végül a két fém réteget összekötik mindkét oldalon 1  $\mu$  széles nióbbium csíkkal. A két fém réteg közti laza csatolást ez a vékony 1  $\mu$ -os csík képezi. Ilyen laza csatolás a fémrétegek mindkét oldalán létrejön, ezért végül is 2 db párhuzamosan kapcsolt Josephson-átmenet jött létre. Az ily módon kialakított átmenet igen stabil és jól reprodukálható. Ohta és társai a kísérleteknél 11 db ilyen átmenetet sorba kapcsoltak és ezt építették be a keverő szerelvénybe. Az egész szerel-

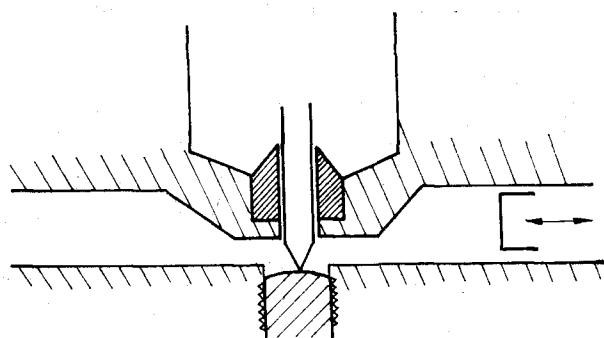
## 100 GHz fölötti super-Schottky-diódás kísérletek

Szerző	Környezeti hőmérséklet	Frekvencia GHz	Zajhőmérséklet
57 Carlson (1978)	18 K	110	540 K
55 Predmore (1984)	18 K	113	84 K
56 Keen (1979)	18 K	115	100 K
54 Kerr (1977)	18 K	150	280 K
52 Archer (1982)	18 K	230	250 K
53 Archer (1983)	18 K	270	400 K
		345	850 K



H-260-18

18. ábra. Párhuzamos Josephson átmenetek



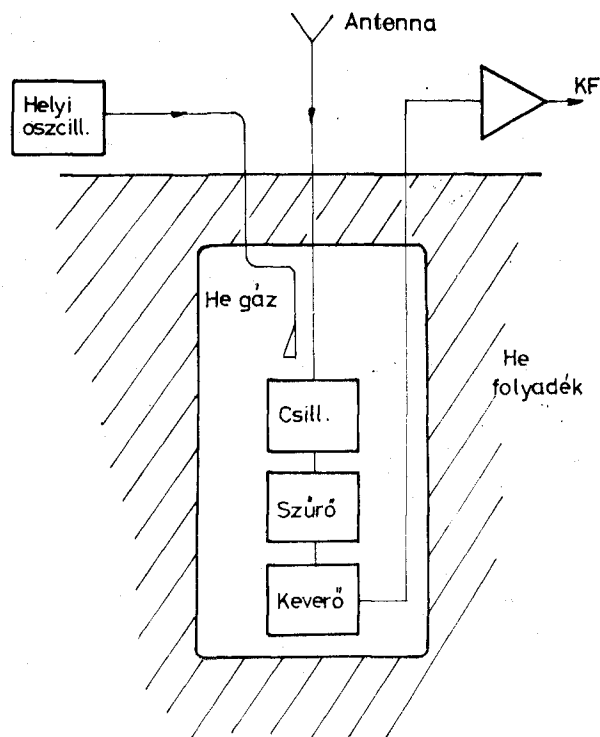
H-260-19

19. ábra. 130 GHz-es keverő szerelvény

vényt 4,2 K-re hűtötték folyékony héliumban. Így az elért legkisebb zajhőmérséklet 20 K volt, ami az eddig elért legjobb eredménynek számít a 115 GHz-es tartományban.

Ennél magasabb frekvenciasávban az első kísérletet Djakov és társai végezték [44] a Szovjetunió Tudományos Akadémiájának Rádiótechnikai Kutató Intézetében. Kísérleteiket 127 GHz-en végezték nióbbium tús átmenettel, amit folyékony héliumban hűtöttek le szupravezető állapotig. Céljuk elsősorban a kis keverési veszteség elérése volt, ezért zajhőmérsékletet nem is mértek. Az általuk elért legkisebb keverési veszteség: 4dB.

Egy évvel később Claassen és Richards [45] végezték kísérletet 130 GHz-en. Ők is nióbbium tús átmenetet használtak, amit  $2 \times 1$  mm-es csőtápvonalba építettek be. A mórószelvény felépítése a 19. ábrán látható. A csőtápvonal magassága 0,3 mm-re le van csökkentve az átmenet helyén, és a tülven szemben egy állító csavar van beépítve, mellyel a túnyomást lehet szabályozni. A nióbbium tús 0,3 mm átmérőjű huzalból készült, amit először mechanikusan kihegyeztek csiszolópapírral, azután elektrokémiai módon marattak és



H-260-20

20. ábra. Claassen mérési összeállítása

így kaptak elég vékony csúcsot. Az egész szerelvényt héliumgázba zárták és így merítették folyékony héliumba (20. ábra). Ennek a megoldásnak az volt az előnye, hogy a héliumgázt fűteni is lehetett és így a kísérleteket különböző hőmérsékleteken tudták megismételni. A nióbbium 9 K alatt szupravezető, ezért van jelentősége ennek a kísérletnek. Kísérleteiknél ezt a hőfokfüggést is vizsgálták és ebből egyértelműen meg lehetett állapítani, hogy a környezeti hőfok csökkentésével csökken a zajhőmérséklet és csökken a keverési veszteség is. Ezeket az eredményeket mutatja a következő táblázat:

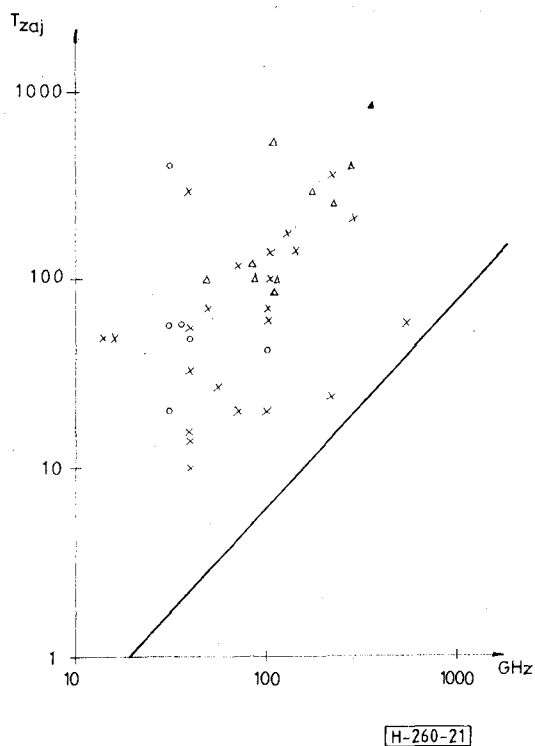
Környezeti hőmérséklet	Zajhőmérséklet	Keverési veszteség
7,5 K	460 K	10 dB
6 K	265 K	8 dB
4,2 K	180 K	3,5 dB

Lényegileg hasonló megoldást alkalmaztak Ablyazov és társai [46] a Szovjetunió Tud. Akadémiájának Alkalmazott Fizika Intézetében. Tűs nióbbium átmenetet használtak 150 GHz-es kísérleteknél, de a tű mozgató mechanizmust sokkal precízebben oldották meg. Lényeges változtatás még, hogy körkeresztmetszeti csőtápvonalat használtak a veszteségek csökkentésére. Így sem sikerült azonban lényegesen jobb eredményt elérni.

Majdnem kétszer akkora frekvencián, 230 GHz-en végzett kísérleteket Suttén 1983-ban [47]. Vizsgálataihoz 0,97 mm átmérőjű hengeres csőtápvonalat használt, melybe 0,1 mm vastag kvarc lemezt helyezett be. A lemezke szélessége mindössze 0,41 mm volt, hossza pedig 5 mm. A kvarc hordozóra ólom-indium-arany ötvözetből porlasztott fel vékony réteget, melyből Dayem-híd szerű megoldást képezett ki (17. ábra). A szerelvényt 4,2 K-re hűtve 300 K zajhőmérsékletet sikerült elérni.

Egészen kiemelkedően jó eredményt sikerült elérni Danchi és társainak [48], akik két frekvencián is végeztek kísérletet 246 GHz-en és 604 GHz-en. Munkájukban ón-ólmó vékonyréteg átmenetet használtak, és a kettő közti vékony oxidréteggel jött létre a Josephson-hatás. Az átmenet felületét igen kicsire sikerült készíteni, mintegy  $1 \mu\text{m}^2$ -re. Ezt a kicsiny felületet egy dipólantenna két szára között alakították ki és magát az antennát is a vékony kvarc hordozóra párologtatták fel. Az antennák hossza 246 GHz-en 0,45 mm volt, 604 GHz-en pedig 0,18 mm. Ezeket az antennákat sugározták be a nagyfrekvenciás jellel és helyi oszcillátorként maga a Josephson-átmenet szolgált. A kísérlet külön érdekessége, hogy sugárforrásként saját készítésű távoli infravörös (FIR) lézert használtak, amit  $\text{CO}_2$  lézerral gerjesztettek. Így tulajdonképpen ez az első olyan kísérlet, ahol optikai sugárzást mikrohullámú keverővel tudtak detektálni. Ehhez igen fontos tényező volt, hogy az ón-ólmó átmenet karakterisztikája igen meredek volt és ezáltal a saját rezgés felharmónikusaival is jó keverést lehetett elérni. Ehhez járult még az is, hogy a keverő szerkezetet a szokásosnál alacsonyabb, 1,4 K hőmérsékletre hűtötték, amihez külön hűtőgépet kellett folyamatosan üzemeltetni. A gondosan méretezett antennák szerepe is jelentős, mert igen jó csatolást biztosítottak a lézer sugara számára és mindazok eredményeképpen adódott ki az igen kis zajhőmérséklet. Végül eredményben 246 GHz-en 10 K, 404 GHz-en pedig 20 K zajhőmérsékletet sikerült elérni, ami a legújabb-kori eredmények közül jelenleg a legjobb.

A legutóbbi években sikeres kísérleteket folytattak super-Schottky diódás keverőkkel is. A 6. táblázat áttekintést ad az elért eredményekről. Ilyen eredmények eléréséhez különlegesen fejlett technológia szükséges, hogy a dióda-kapacitást nagyon kis értékre le lehessen szorítani. Mégis az elért zajhőmérsékletek lényegesen magasabbak, mint amit Josephson-átmenettel el lehet érni. Mindenesetre super-Schottky diódával is nagyon alacsony zajhőmérsékletet lehet elérni, de a leg-



21. ábra. Gyakorlatban elért zajhőmérsékletek

eredményesebben 100 GHz-környékén, vagy az alatt lehet felhasználni. A 100 GHz fölötti frekvenciasáv meghódításához még további technológiai fejlesztés szükséges.

### Összegzés

Nagy érzékenyséű vevőkészülékeket igen nehéz készíteni. Zajtényező szempontjából mindig az első fokozatok a döntők, ezeket kell különösen jól megtervezni és kivitelezni. Ez a cikk rövid áttekintést ad az elért eredményekről. A még nagyobb szemléletesség kedvéért a 21. ábra áttekintést ad felsorolt kísérletekről. \*-gal van jelölve a Josephson keverőkkel elért eredmények.  $\theta$  jelöli a Josephson parametrikus erősítőket,  $\Delta$  pedig a super Schottky diódával elért eredményeket. Az ábra alsó részén a  $kT$  elméleti határ van feltüntetve. Az ábrából az látható, hogy a mérési eredmények nagyon nagy szórást mutatnak, mert a zajhőmérséklet nagyon erősen függ a kísérleti szerelvény konstrukciójától. Nagy átlagban azonban a Josephson keverős megoldások zajhőmérséklete általában alacsonyabb, mint a super-Schottky diódás típusoknak. Különösen érvényes ez a magasabb frekvenciás tartományban, ahol a Josephson átmenet alkalmazása különösen előnyös. Természetesen nem szabad megfeledkezni arról, hogy ilyen alacsony zajhőmérsékleteket csak alacsony környezeti hőmérsékleten (általában folyékony héliumban) lehet elérni, ami kissé nehezíti a szerelvények alkalmazhatóságát.

### I R O D A L O M

- [1] Dr. Kenderessy Miklós: Josephson-effektus alkalmazása a mikrohullámú tartományban. Híradástechnika, 1985. 3. szám. pp. 110.

- [2] *J. Clarke*: Experimental comparison of the Josephson voltage-frequency relation in different superconductors. *Phys. Rev. Letters* 21 (1968) pp. 1566—1569.
- [3] *I. Giaever, H. R. Zeller*: Tunneling into and through evaporated semiconducting films. *Journ. of Vac. Sci. T.* 6 (1969) pp. 502.
- [4] *A. H. Dayem, C.C. Grimes*: Microwave emission from superconducting point contacts. *Appl. Phys. Letters* 9 (1966) pp. 47.
- [5] *K. H. Gundlach, M. Zahn, K. Okuyama, H. J. Hartfuss*: Fabrication of small Josephson tunnel junction. *Int. Conf. on SQUID, 1980, May, Berlin*
- [6] *A. Gontaldo*. *Rev. Sci. Instr.* 38 (1968) pp. 1543.
- [7] *R. A. Kamper, L. O. Mullen, D. B. Sullivan*: *Nat. Bureau of Standards, Boulder, Techn. Note* 381 (1969).
- [8] *T. D. Clark*: Experiments on coupled Josephson junctions. *Phys. Letters* 27A (1968) pp. 585.
- [9] *J. Clarke*: A superconducting galvanometer employing Josephson tunneling. *Phil. Mag.* 13 (1966) pp. 115.
- [10] *W. H. Warren, W. G. Bader*: *Rev. Sci. Instr.* 40 (1969) pp. 180.
- [11] *A. N. Vystavkin, V. N. Gubankov, L. S. Kuzmin, K. K. Likharev, V. V. Migulin, V. K. Semenov*: One-frequency parametric amplifier using self-pumped Josephson-junction. *IEEE Trans. MAG-13, No. 1.* (1977) pp. 233.
- [12] *S. Wahlsten, S. Rudner, T. Claeson*: Arrays of Josephson tunnel junctions as parametric amplifiers. *Journ. of Appl. Phys.* 49 (1978) pp. 4248.
- [13] *M. McColl, M. F. Millea, A. H. Silver, M. F. Bottjer, R. J. Pedersen, F. L. Vernon*: The super-Schottky microwave mixer. *IEEE Trans. MAG-13, No. 1.* (1977) pp. 221.
- [14] *S. Rudner, T. Claeson*: Array of semiconducting tunnel junctions as low-noise 10 GHz mixers. *Appl. Phys. Lett.* 34, No. 10. (1979) pp. 711.
- [15] *N. Calander, T. Claeson, S. Rudner*: Low-noise self-pumped Josephson tunnel junction amplifier. *Appl. Phys. Lett.* 39, No. 8. (1981) pp. 650.
- [16] *Y. Taur, J. H. Claassen, P. L. Richards*: Josephson junction as heterodyne detectors. *IEEE Trans. MTT-22, No. 12.* (1974) pp. 1005.
- [17] *Y. Taur, J. H. Claassen, P. L. Richards*: Conversion gain in a Josephson effect mixer. *Appl. Phys. Letters* 24, No. 2. (1974) pp. 101.
- [18] *J. Edrich*: A low-noise 47 GHz mixer using a permanent Josephson junction. *IEEE Trans. MTT-24, No. 11.* (1976) pp. 706.
- [19] *P. L. Richards, T. M. Shen, R. E. Harris, F. L. Lloyd*: Quasiparticle heterodyne mixing in SIS tunnel junctions. *Appl. Phys. Lett.* 34, No. 5. (1979) pp. 345.
- [20] *W. R. McGrath, P. L. Richards, A. D. Smith, H. van Kempen, R. A. Batchelor, D. E. Prober, P. Santhanam*: Large gain, negative resistance, and oscillations in superconducting quasiparticle heterodyne mixers. *Appl. Phys. Lett.* 39, No. 8. (1981) pp. 655.
- [21] *A. D. Smith, W. R. McGrath, P. L. Richard, H. van Kempen, D. Prober, P. Santhanam*: Negative resistance and conversion gain in SIS mixers. *Physica* 108B (1981) pp. 1367.
- [22] *A. D. Smith, W. R. McGrath, P. L. Richards, R. E. Harris, F. L. Lloyd, D. E. Prober, P. Santhanam*: Microwave mixing and direct detection using SIS quasiparticle tunnel junctions. *IEEE Trans. MAG-19, No. 3.* (1983) pp. 490.
- [23] *S. E. G. Slusky, R. Trambarulo, L. A. Fetter*: Observation of subharmonically pumped mixing with gain using SIS junctions. *IEEE Trans. MAG-17, No. 1.* (1981) pp. 694.
- [24] *A. C. Callegari, R. A. Buhrman*: Millimeter-wave mixing with submicron area Nb tunnel junction. *Journ. Appl. Phys.* 53, No. 2. (1982) pp. 823.
- [25] *S. Rudner, M. J. Feldman, E. Kollberg, T. Claeson*: The antenna-coupled SIS quasiparticle array mixer. *IEEE Trans. MAG-17, No. 1.* (1981) pp. 690.
- [26] *K. Fujisawa, S. Kita, Y. Ohmae, A. Yamaguchi*: Low-noise properties of unbiased even-harmonic Josephson mixers. *Journ. of Appl. Phys.* 57, No. 6. (1985) pp. 2099.
- [27] *R. Y. Chiao, P. T. Parrish*: Operation of the SUPA-RAMP at 33 GHz. *Journ. of Appl. Phys.* 47, No. 6. (1976) pp. 2639.
- [28] *Y. Taur, P. L. Richards*: Parametric amplification and oscillation at 36 GHz using a point-contact Josephson junction. *Journ. of Appl. Phys.* 48, No. 3. (1977) pp. 1321.
- Y. Taur, P. L. Richards*: A Josephson effect parametric amplifier at 36 GHz. *IEEE Trans. MAG-13, No. 1.* (1977) pp. 252.
- [29] *F. Goodall, F. Bale, S. Rudner, T. Claeson, T. F. Finnegan*: Parametric amplification in Josephson tunnel junction arrays at 33 GHz. *IEEE Trans. MAG-15, No. 1.* (1979) pp. 458.
- [30] *J. Mygind, N. F. Pedersen, O. H. Soerensen, B. Dueholm, M. T. Levinsen*: Low-noise parametric amplification at 35 GHz in a single Josephson tunnel junction. *Appl. Phys. Letters* 35, No. 1. (1979) pp. 91.
- [31] *M. T. Levinsen, N. F. Pedersen, O. H. Soerensen, B. Dueholm, J. Mygind*: Externally pumped millimeter-wave Josephson-junction parameter amplifier. *IEEE Trans. ED-27, No. 10.* (1980) pp. 1928.
- [32] *J. Edrich*: A cryogenically cooled two-channel paramp radiometer for 47 GHz. *IEEE Trans. MTT-25, No. 4.* (1977) pp. 280.
- [33] *M. McColl, M. F. Bottjer, A. B. Chase, R. J. Pedersen, A. H. Silver, J. R. Tucker*: The super-Schottky diode at 30 GHz. *IEEE Trans. MAG-15, No. 1.* (1979) pp. 468.
- [34] *A. H. Silver, R. J. Pedersen, M. McColl, R. L. Dickman, W. J. Wilson*: The millimeter wave super-Schottky diode detector. *IEEE Trans. MAG-17, No. 1.* (1981) pp. 698.
- [35] *L. S. Kuzmin, K. K. Likharev, V. V. Migulin*: Properties of parametric amplifiers using Josephson junction with external pumping. *IEEE Trans. MAG-15, No. 1.* (1979) pp. 454.
- [36] *Y. Taur, A. R. Kerr*: Low-noise Josephson mixers at 115 GHz using recyclable point contacts. *Appl. Phys. Lett.* 32, No. 11 (1978) pp. 775.
- [37] *G. J. Dolan, T. G. Phillips, D. P. Woody*: Low-noise 115 GHz mixing in superconducting oxide-barrier tunnel junctions. *Appl. Phys. Lett.* 34, No. 5. (1979) pp. 347.
- [38] *G. J. Dolan, R. A. Linke, G. Sollner, D. P. Woody, T. G. Phillips*: Superconducting tunnel junctions as mixers at 115 GHz. *IEEE Trans. MTT-29, No. 2.* (1981) pp. 87.
- [39] *T. G. Phillips, D. P. Woody, G. J. Dolan, R. E. Miller, R. A. Linke*: Dayem-Martin (SIS tunnel junction) mixers for low noise heterodyne receivers. *IEEE Trans. MAG-17, No. 1.* (1981) pp. 684.
- [40] *A. R. Kerr, S. K. Pan, M. J. Feldman, A. Davidson*: Infinite available gain in a 115 GHz SIS mixer. *Physica* 108B (1981) pp. 1369.
- [41] *H. Ohta, T. Matsui, T. Igarashi, S. Kodaira, Y. Yamada, Y. Takahashi*: „Short” weak links for 115 GHz mixers. *IEEE Trans. MAG-19, No. 3.* (1983) pp. 601.
- [42] *M. J. Feldman, S. K. Pan, A. R. Kerr, A. Davidson*: SIS mixer analysis using a scala model. *IEEE Trans. MAG-19, No. 3.* (1983) pp. 494.
- [43] *D. P. Woody, R. E. Miller, M. J. Wengler*: 85—115 GHz receivers for radio astronomy. *IEEE Trans. MTT-33, No. 2.* (1985) pp. 90.
- [44] *V. P. Dyakov, V. N. Gubankov, A. M. Spitzin, A. N. Vystavkin*: Josephson junction as F-band mixer-multiplier. *IEEE Trans. MAG-13, No. 1.* (1977) pp. 237.
- [45] *J. H. Claassen, P. L. Richards*: Point-contact Josephson mixers at 130 GHz. *Journ. of Appl. Phys.* 49, No. 7. (1978) pp. 4130.
- [46] *V. S. Ablyazon, S. A. Andreev, A. N. Vystavkin, V. N. Gubankov, V. P. Dyakov, A. I. Zhukov, A. G. Kislyakov, K. A. Rulev, M. A. Tarasov, S. Yu.*

- S. Turygin, V. I. Chernyshev*: Modulation superheterodyne radiometer for the 2-mm wave band employing a Josephson frequency converter at the input. Preprint IRE USSR Acad. Sci. 33—7889/1982.
- [47] *E. C. Sutton*: A superconducting tunnel junction receiver for 230 GHz. IEEE Trans. MTT-32. No. 7. (1983) pp. 589.
- [48] *W. C. Danchi, F. Habbal, M. Tinkham*: Photon-assisted tunneling and AC Josephson effect at 246 and 604 GHz in small-area superconducting tunnel junctions. IEEE Trans. MAG-19. No. 3. (1983) pp. 498.
- [49] *J. M. V. Verschueren, A. A. Uiterwaal, R. W. van der Heijden, P. Wyder*: Direct heterodyne detection of 245 GHz radiation using the internal narrowband oscillations of a resistive dc SQUID. Appl. Phys. Lett. 44. No. 3. (1984) pp. 349.
- [50] *J. Edrich, D. B. Sullivan, C. D. McDonald*: Results, potentials, and limitations of Josephson-mixer receivers at millimeter and long submillimeter wavelengths. IEEE Trans. MTT-25. No. 6. (1977) pp. 476.
- [51] *S. K. Pan, M. J. Feldman, A. R. Kerr*: A low-noise 115 GHz receivers using superconducting tunnel junctions. Appl. Phys. Lett. 43. (1983) pp. 786.
- [52] *J. W. Archer*: An all solid-state receiver for 210—240 GHz. IEEE Trans. MTT-30. No. 8. (1982) pp. 1247.
- [53] *J. W. Archer*: A multiple mixer cryogenic receiver for 200—350 GHz. Rev. Sci. Instrum. 54. No. 10. (1983).
- [54] *A. R. Kerr, R. J. Mattauch, J. A. Crange*: A new mixer design for 140—220 GHz. IEEE Trans. MTT-25. No. 5. (1977) pp. 399.
- [55] *C. R. Predmore, N. R. Erickson, P. F. Coldsmith, J. L. R. Marrero*: A broadband, ultra low-noise Schottky diode mixer receiver from 80 to 115 GHz. IEEE Trans. MTT-32. No. 5. (1984) pp. 498.
- [56] *N. J. Keen, W. M. Kelly, C. T. Wrixon*: Pumped Schottky diodes with noise temperatures of less than 100 K at 115 GHz. Electron. Lett. 15. No. 21. (1979) pp. 689.
- [57] *E. R. Carlson, M. V. Schneider, T. F. McMaster*: Subharmonically pumped millimeter wave mixers. IEEE Trans. MTT-26. No. 10. (1978) pp. 706.
- [58] *L. R. D'Addario*: A 90—120 GHz SIS mixer having gain and wide bandwidth. Int. Journ. of Infrared and Millimeter Waves. 5. No. 11. (1984).