

無線通信機へのSAW技術の応用

Application of SAW Technology to Radio Communication Equipment

自動車電話(セルラー無線)、ポケットベルなどに代表される移動無線では、無線機端末の小形、軽量化に対する要求が強い。SAW(Surface Acoustic Wave)デバイスは、半同軸共振器を用いた高周波フィルタ、発振器用共振器などを抜本的に小形化できる技術である。

無線機用SAWデバイスでは、電気とSAWの変換、逆変換に伴う損失は最重要課題である。これらの損失を低減することのできるフィルタ、共振器の新構成法を見いだした。さらに微細電極加工技術の開発、新圧電基板の採用によって0.1~1.0 GHz帯の無線機用小形・高性能フィルタを製品化した。また、SAWデバイスとともに他の能動素子、受動素子を単一パッケージに実装した分波器、電圧制御発振器の機能モジュールを開発した。

疋田光孝* Mitsutaka Hikita
 湯原章綱** Akitsuna Yuhara
 小田幸司*** Kōji Oda
 小林喬雄**** Takao Kobayashi
 藤原行成***** Yukinari Fujiwara

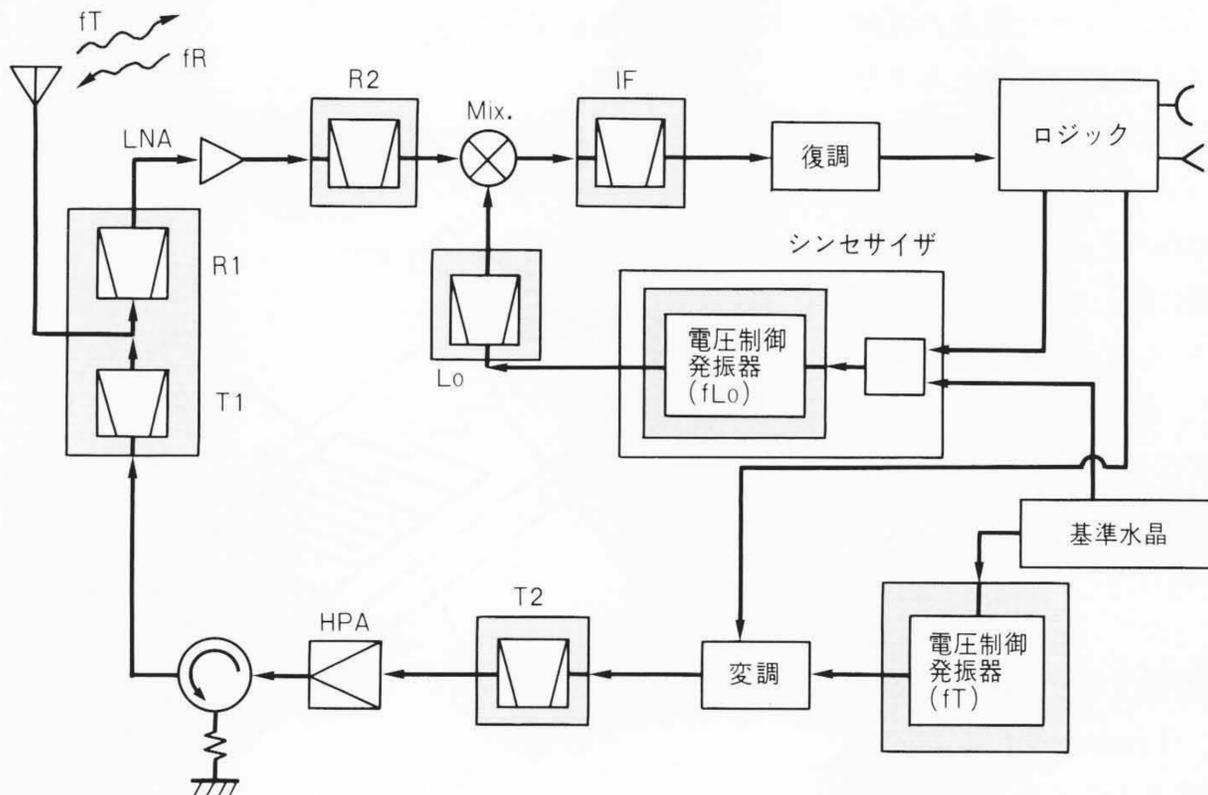
1 緒言

世界的な通信の自由化、パーソナル化に伴い個人を対象とする移動無線は著しく発展している。無線機端末は、車載形からポータブル形、さらにポケットブル形へと小形・軽量化が進んでいる。

デバイスとして送受信用高周波フィルタ、局部発振および送信信号を生成する電圧制御発振器が搭載される。これらの部品には、従来半同軸共振器が用いられたが、回路構成が本質的に立体回路となって小形化には限界があった。

無線機端末のブロック図を図1に示す。無線部には、キー

SAW(Surface Acoustic Wave：表面弾性波)デバイスは、



注：略語説明
 fT (送信周波数)
 fR (受信周波数)
 fLo (局部発振周波数)
 R1 (受信初段フィルタ)
 T1 (送信終段フィルタ)
 R2 (受信段間フィルタ)
 T2 (送信段間フィルタ)
 Lo (局部発振フィルタ)
 IF (中間周波フィルタ)
 LNA (Low Noise Amp.)
 Mix. (ミキサ)
 HPA (High Power Amp.)

図1 無線機のブロック図 ハッチング部分にSAW技術が適用可能である。

* 日立製作所 中央研究所 工学博士 ** 日立製作所 家電研究所 *** 日立製作所 横浜工場 **** 日立製作所 東海工場
 ***** 日立電子株式会社 無線機設計部

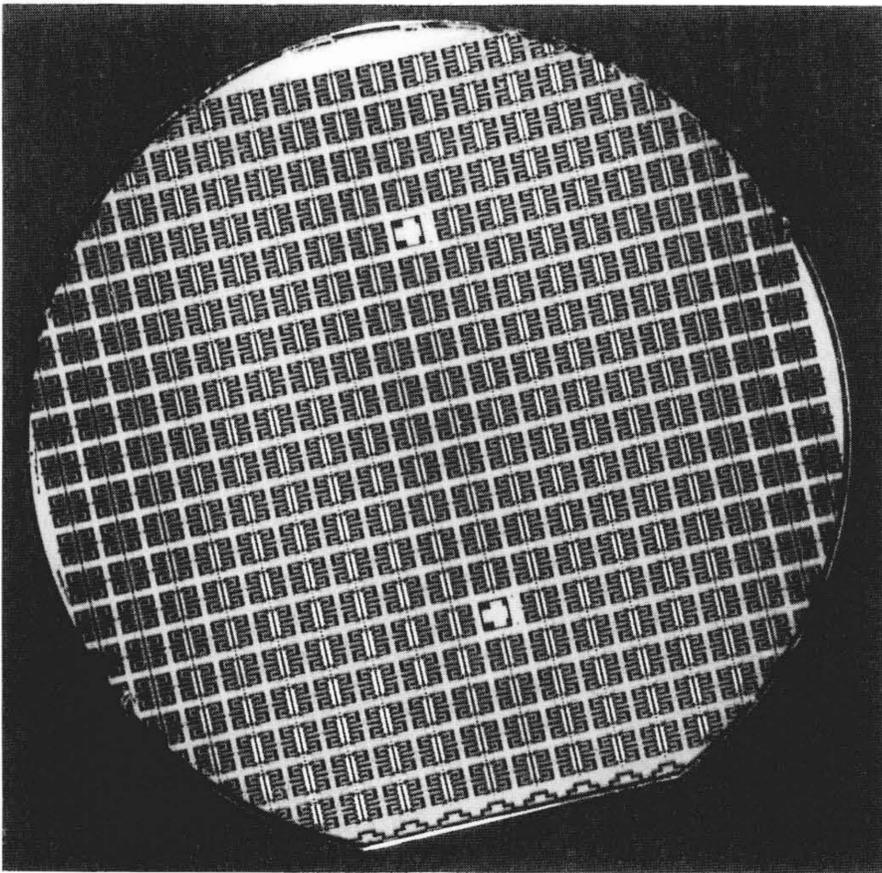


図2 ウェーハ状態のSAWデバイス 36°YX-LiTaO₃(直径3インチ)に約300個のデバイスを多面付けしている。

SAWの波長が電磁波の波長の 10^{-5} 倍ときわめて短いことを利用し、上記デバイスを抜本的に小形化するものである。一例を図2に示すように、ウェーハ状の圧電基板に半導体デバイス同様ホトリソグラフィ技術を用いて形成できるため、小形、無調整でかつ量産性に優れている。

このデバイスの最大の課題は、電気信号からSAWへ、SAWから電気信号への変換、逆変換に伴うエネルギー損失の低減である。この損失は、テレビジョンの中間周波数フィルタなどでは15~20 dBに達する。この論文では、主要開発技術として、変換損失を根本的に低減するフィルタおよび共振器の新構成法、高周波デバイスを製造するための1 μ m微細電極加工技術、デバイスの基礎である圧電結晶に関して述べる。次に、この技術によって製品化したポケットベル、自動車電話用高性能SAWフィルタに関して説明する。最後に、SAWデバイスと他の能動素子、受動素子を機能モジュール化した分波器、電圧制御発振器の試作結果について述べる。

2 主要開発技術

SAWデバイスは、基本構成を図3に示すように、圧電基板上に形成した入力IDT(Interdigital Transducer)によってSAWを励振し、対向するIDTで受信するものである。無線機に用いる高性能SAWデバイスを目標に、(1)励振、受信に伴う損失を飛躍的に低減可能な新構造、(2)量産性を考慮した微細電極加工技術、(3)圧電効果や温度特性の優れた新圧電基板を開発した。

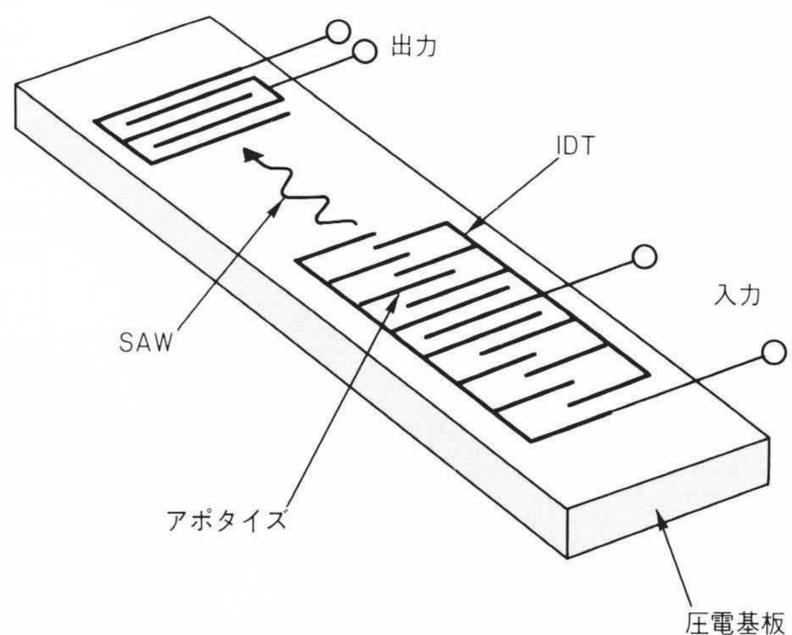
2.1 新構造のSAWデバイス

2.1.1 低損失フィルタ

従来のSAWフィルタでは、周波数特性の合成にはアポタイズと呼ばれる図3に示す入力IDTの電極指交さ幅を変化させる重み付け法を用いた。この手法では、IDT内の位置によって横断面に沿う励振SAWの振幅が異なる。すなわち、中央部で大きく、両側で小さい。このようなSAWを一様な出力IDTで受信すると、振幅の小さい部分は損失増加の要因となる。これを重み付け損失と言い、低損失化には極限まで低減する必要がある。

新開発の重み付け法を図4に示す。この手法は、IDT内の任意の横断面に沿って励振電極指の数が等しいため、振幅の一律なSAWを励振できる。また、周波数特性は従来のアポタイズとまったく等価であり、かつ重み付け損失は原理的に存在しない。これを「新位相重み付け」と名づけた¹⁾。

図3に示す構成では、入力IDTから左右に励振されるSAWの片側しか利用しないため、大きな双方向損失が存在する。この損失を低減し、かつIDTの電気特性を利用して無線機で要求される急しゅんな周波数特性を得る新構成を開発した。この構成を図5に示す。イメージ(影像)インピーダンス接続した一対のIDTを横方向に多数配置し、間に入力および出力IDTを導入することによって低損失化と急しゅんな周波数特性の両立を達成したものである。これを「イメージ接続フィルタ」と名づけた²⁾。図5を基本に、イメージインピーダンス接続したIDTに図4の新位相重み付けを導入して開発したフィルタは、800 MHz帯で損失は3.5~6 dB、帯域外減衰量は40~60 dBの高性能特性を実現できる。



注：略語説明

SAW (Surface Acoustic Wave), IDT (Interdigital Transducer)

図3 SAWデバイスの基本構成 チップサイズは2~3 mm角、SAWは基板表面に沿って伝搬する。SAWのエネルギーは、基板の深さ方向約2波長程度に集中している。

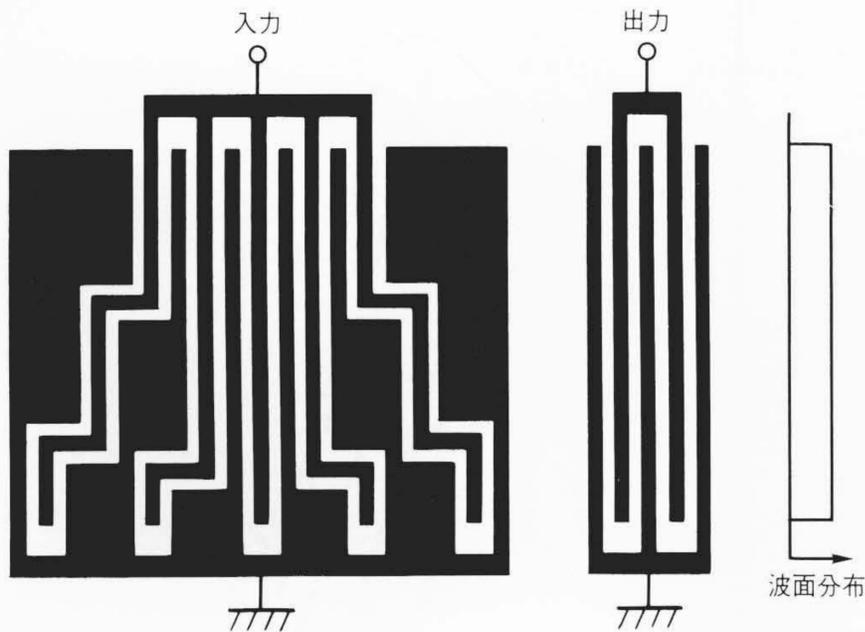


図4 新位相重み付け 重み付けIDTからは、任意の横断面に沿って振幅が等しいSAWが励振される。

図1の送信終段フィルタには、1 W程度の電力が通過するため、低損失特性に加え高い耐電力性が要求される。このようなフィルタは必ずしも帯域通過形の必要はなく、特定の周波数(例えば受信帯域)を減衰させる帯域阻止形でもよい。新開発の耐電力SAWフィルタ構成とその等価回路を図6に示す。この構成は、カスケード接続したSAW共振器と共振器がステム面との間に持つ対地容量を利用したラダー形フィルタである。IDT電極にAl系合金電極を用いることにより、800 MHz帯で出力4 W、数千時間の通電にも耐えられる。損失は1~2 dBで、送信段間フィルタとの組み合わせで送信系の仕様を満足する。

2.1.2 広帯域SAW共振器

図1の電圧制御発振器には発振の核となる共振器が必要で

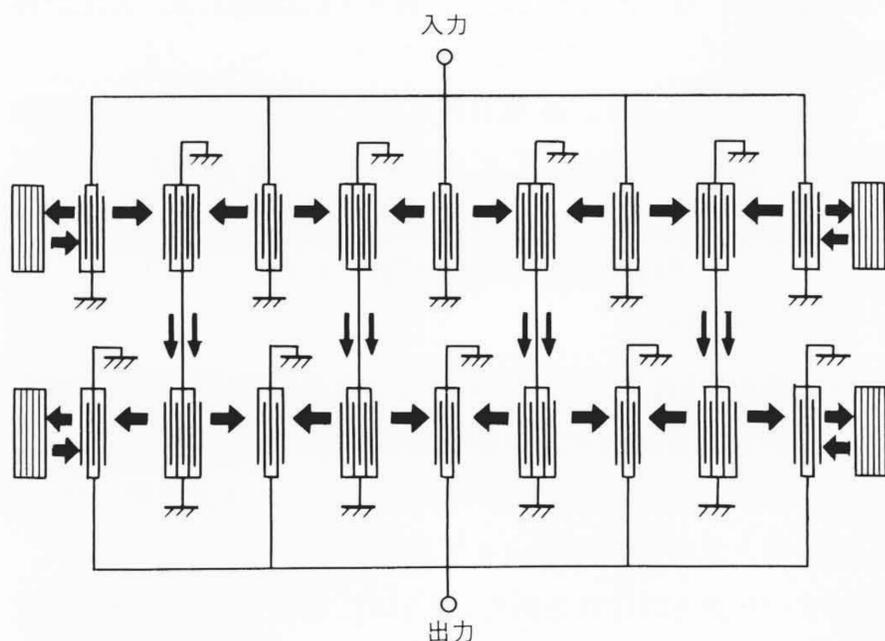
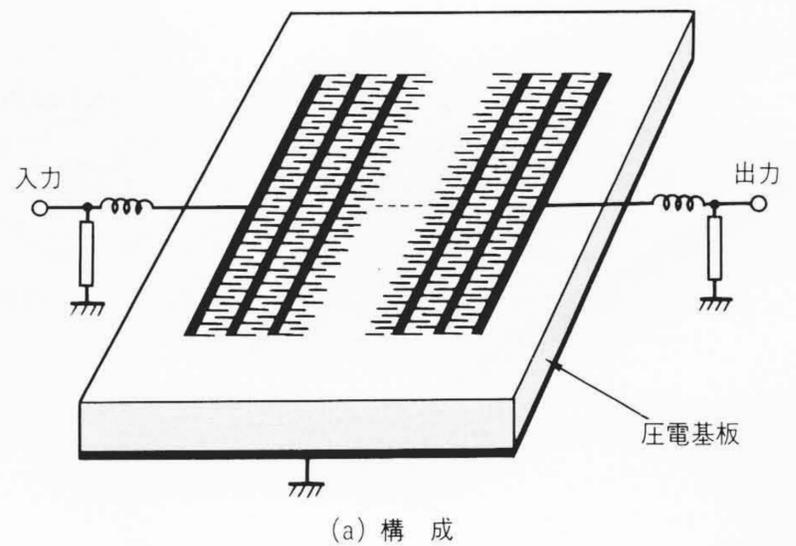
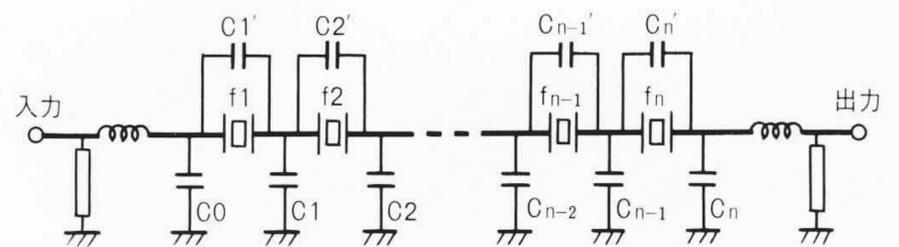


図5 イメージ接続フィルタ イメージインピーダンス接続したIDTの両側に、入力IDTおよび出力IDTが配置される。



(a) 構成



(b) 等価回路

図6 耐電力SAWフィルタ カスケード接続したSAW共振器と対地容量がラダー形のフィルタを構成する。

ある。従来のSAW共振器は、図7(a)に示すようにIDTの両側に反射器を配置して構成する。仮想的に生ずる等価反射面間に定在波が生じ、共振状態となる。しかし、等価反射面間の距離 L が非常に大きく、わずかな周波数変化で共振条件からずれるため電圧制御発振器の周波数可変幅は0.2%程度が限界であった。

新開発の広帯域共振器の構成を図7(b)に示す。この構成は、電氣的に直列接続した一対のIDTを横方向に反復し、これによって生ずる周期的な波の干渉を利用して、等価反射面間の距離が短い広帯域な共振特性を実現する。また、端部へ向かってテーパ状に励振SAWの振幅を小さくすることによって共振器中央部にエネルギーを閉じ込め、高いQ値を確保した。この構成を「テーパ反復共振器」と名づけた。この共振器を用いた電圧制御発振器は周波数可変幅2.5%以上で、汎(はん)用無線機への適用が可能である。

2.2 SAWデバイスの製造技術

SAWデバイスの製造プロセスは、図2にウェーハを示すように、すだれ状電極(IDT)を形成するパターンニング工程と、チップをパッケージに封止する組立工程から成る。特に、前者は微細なすだれ状電極を形成するため重要である。日立製作所ではEB(Electron Beam)蒸着法によって形成したAl薄膜から、コンタクトあるいはg線の $\frac{1}{10}$ 縮小露光法によるホトリソグラフィ技術と、ウェットエッチを用いたすだれ状電極を形成している。しかし、無線機用デバイスでは、使用条件によって高周波の大電力が印加される場合があり、かつ低損失で急し

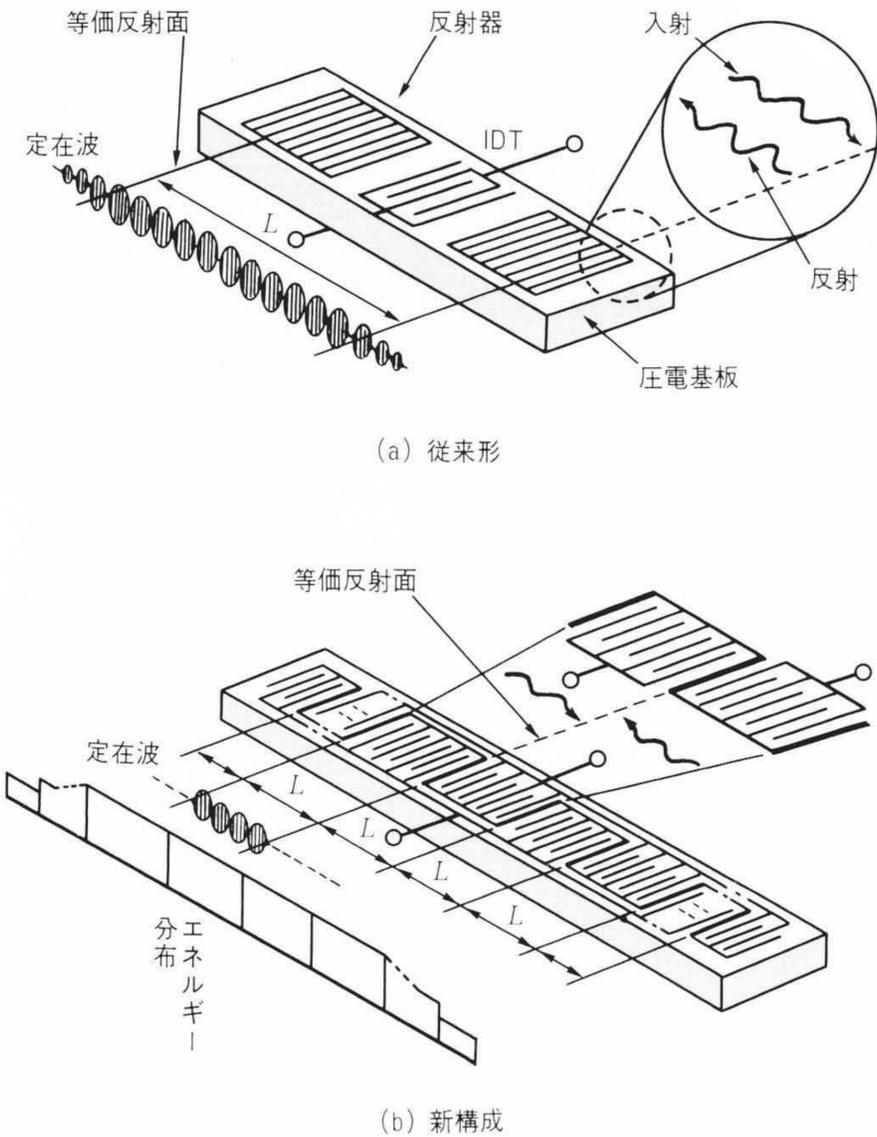


図7 従来のSAW共振器と広帯域SAW共振器 反復構造で等価反射面間を狭くし、テーパによって高いQ値を確保している。

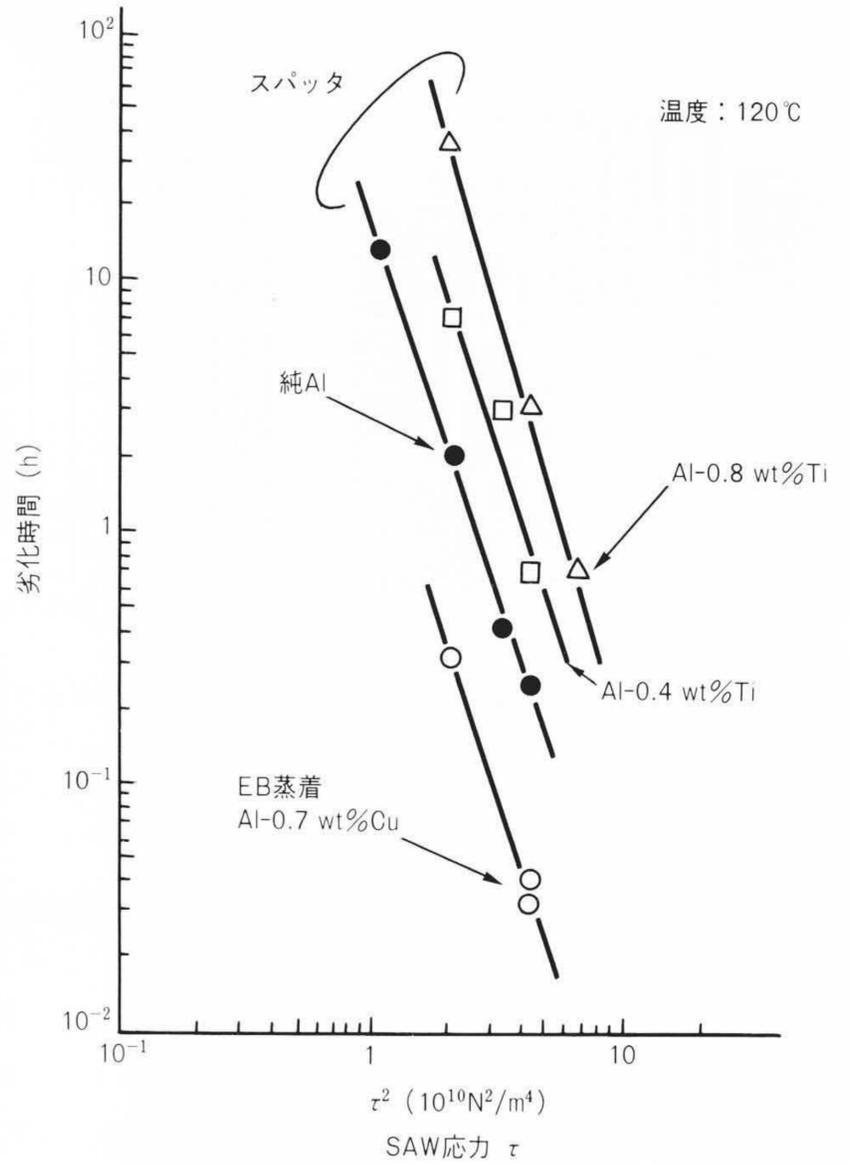
ゆんな周波数特性が要求される。このような要求にこたえるため、新たに耐電力性に優れた電極材料と、より高い精度の微細電極加工技術を開発した。

2.2.1 高耐電力電極材料

無線機用SAWデバイスのすだれ状電極は、膜厚0.1 μm 、幅約1 μm の電極指で形成される。大電力が印加されると励振SAWによって電極に大きな応力が働き、エレクトロマイグレーションと類似の電極劣化が発生する。その対策として、従来はCu添加のAl合金蒸着膜を用いてきたが、いっそうの耐電力性向上と組成の安定化を図るため、新たにスパッタ法によるTi添加Al電極を開発した³⁾。Al-Ti電極と他の電極の加速劣化試験結果を図8に示す。電力に対応する量として横軸にSAW応力の二乗を、縦軸に劣化時間をとった。Al-Cu電極に比べ、Al-Ti電極によりいっそうの耐電力性の向上が図れることがわかった。

2.2.2 高精度微細電極加工

SAWは図3に示すように、基板表面にエネルギーが集中して伝搬するため、表面に形成した電極の幅がばらつきとデバイスの周波数特性にも変動が生ずる。このため、微細電極の加工には非常に厳しい精度が要求される。精度の高いドライ加工技術として、LSIの製造に広く用いられているRIE



注：略語説明 EB (Electron Beam)

図8 電極の加速劣化試験結果 横軸は電力に対応する量としてSAW応力の二乗をとっている。従来のAl-Cu電極に比べ、Al-Ti電極によりいっそうの耐電力性の向上が図れる。

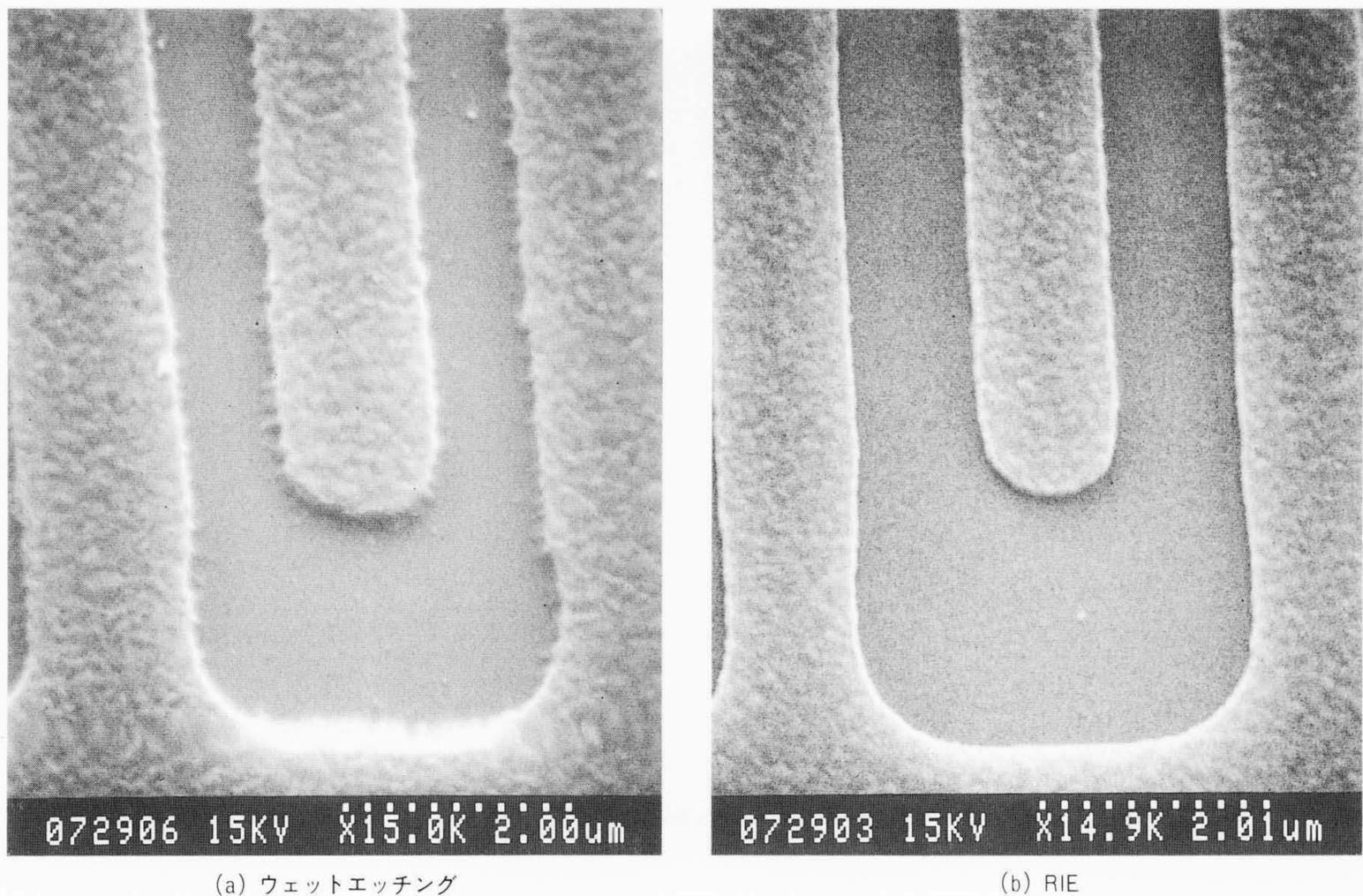
(Reactive Ion Etching)が知られている。この技術をSAWデバイスに適用し、高精度な電極形成技術を開発した⁴⁾。

従来のウェットエッチとRIEによる電極の走査電子顕微鏡写真を比較して図9に示す。RIEでは非常に精度よく電極が形成でき、また加工後の電極幅ばらつきも低減可能なことがわかった(図10)。なお、Al-Ti電極は従来のCu添加に比べRIEが容易である。

以上の技術により、耐電力性に優れた電極が高い精度で形成でき、厳しい仕様に対しても対処可能となる。また、この技術は、将来準マイクロ波帯のSAWデバイスを製造する場合、サブミクロン電極加工にも応用可能である。

2.3 新圧電基板

無線機用SAWデバイスに用いる圧電基板には圧電効果が大きく、かつ温度特性の良い基板が必要である。テレビジョン、VTR用デバイスにはレーリー波と呼ばれるSAWを用いたが、圧電効果と温度特性は両立せず無線機用には適用できない。表面すべり波と呼ばれる新しいSAWに着目し、この波が伝搬可能な36°YX-LiTaO₃⁵⁾、64°、41°YX-LiNbO₃⁶⁾を日立金属株式会社の協力を得て、無線機用途のSAW基板として開発し



注：略語説明 RIE (Reactive Ion Etching)

図9 1 μm幅電極の形成例 RIEによって裾(すそ)ひきのない精度の良い加工ができる。

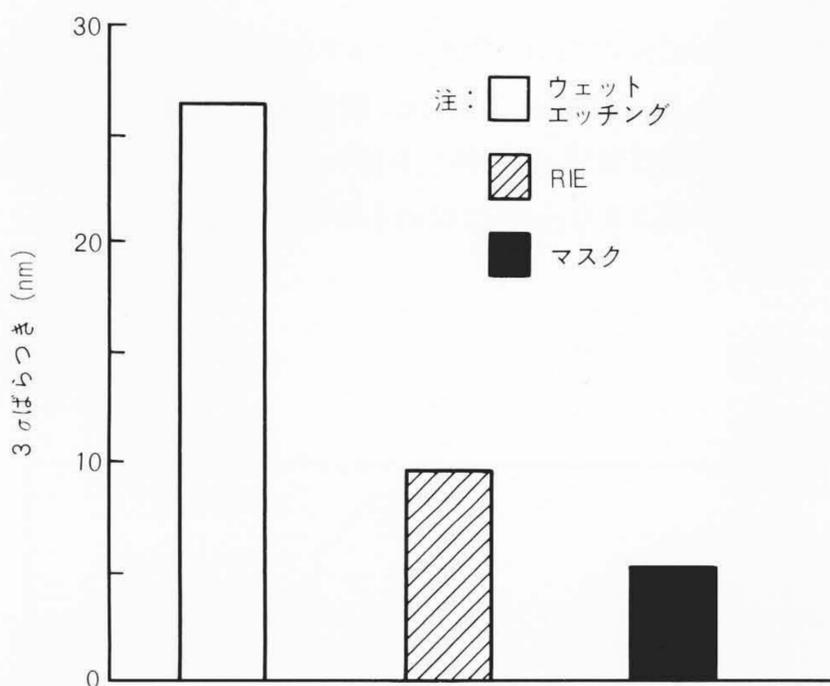


図10 1 μm幅電極のばらつき RIEにより加工後の電極幅ばらつきを低減可能である。

た。特に、 $36^\circ\text{YX-LiTaO}_3$ はテレビジョン用 LiNbO_3 に比べ圧電効果は同等で、温度特性は半分以下である。無線機用デバイスには上記の3基板を採用している。

3 移動無線機用SAWフィルタ

移動無線機用途のSAWフィルタとして、0.1~1GHzの周

波数範囲にわたり、各種フィルタを製品化した。代表的なものとして、ポケットベル用、自動車(携帯)電話用に製品化したSAWフィルタについて以下に述べる。

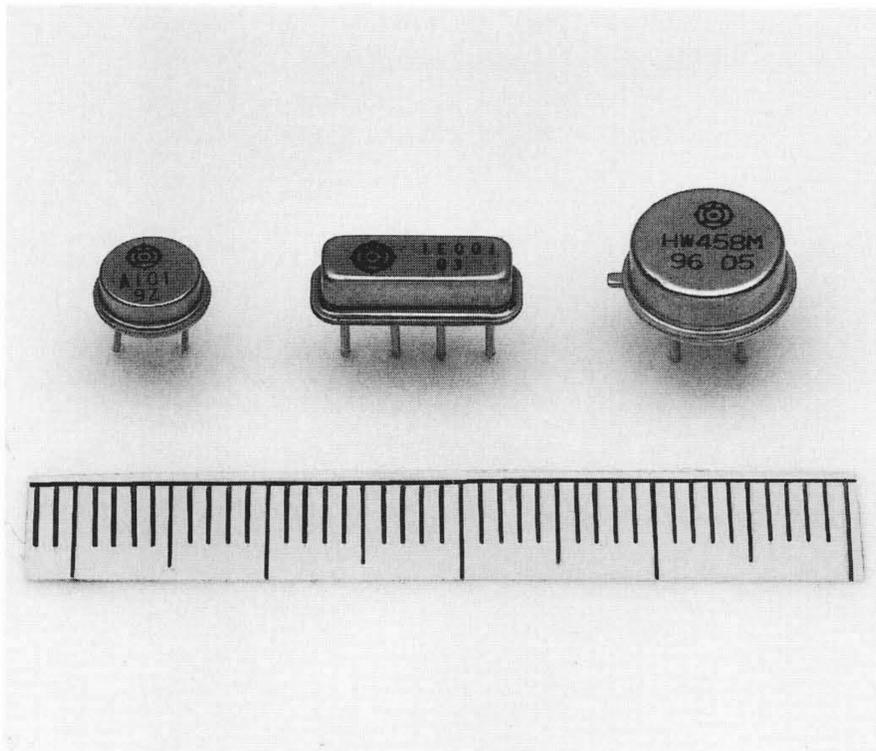
これらのフィルタは、図5のイメージ接続フィルタを基本形に図4の新位相重み付けを導入し、さらに高度な計算機シミュレーション技術を駆使して開発した。広帯域で低損失、しかも高い帯域外減衰量を持つことを特長とするフィルタで、図11(a)に示す超小形パッケージに実装し、無線機端末の小形化に貢献している。今後は、同図(b)に示す面実装タイプのパッケージをラインアップに加え、いっそうの性能向上と小形化を推進する。

3.1 ポケットベル用SAWフィルタ

ポケットベル用のSAWフィルタとしては、システムの仕様によって広帯域タイプと狭帯域タイプの2種類が要求される。ここでは、最近、主流となりつつある広帯域タイプの製品の代表例について述べる。

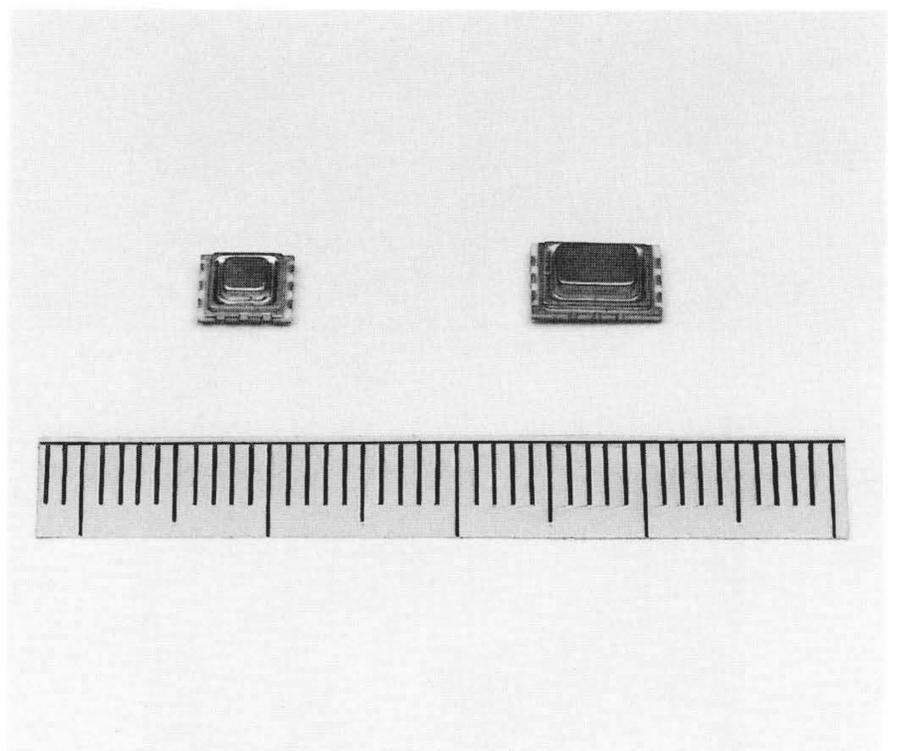
国内向け280 MHz帯SAWフィルタ(HWIE001)を図12(a)に示す。中心周波数281 MHz、帯域幅6 MHz、損失3.5 dB、帯域外減衰量55 dBの特性を持ち、F-11パッケージ(幅4.5 mm×奥行き11.0 mm×高さ3.3 mm)に収め小形化を実現した。

米国向けの450 MHz帯SAWフィルタ(HW458 M)を図12(b)に示す。中心周波数458 MHz、帯域幅10 MHz、損失4.0



(a) SAWフィルタ外観(左から, TO-47, F-11, TO-39)

注: 略語説明 SMD (Surface Mounted Device : 表面実装デバイス)



(b) SAWフィルタ外観(左から, 小形SMD, 中形SMD)

図11 移動無線機用SAWフィルタの外観 (a)は現在製品化しているSAWフィルタの外観写真を, (b)は開発中のSMDタイプの外観写真を示す。

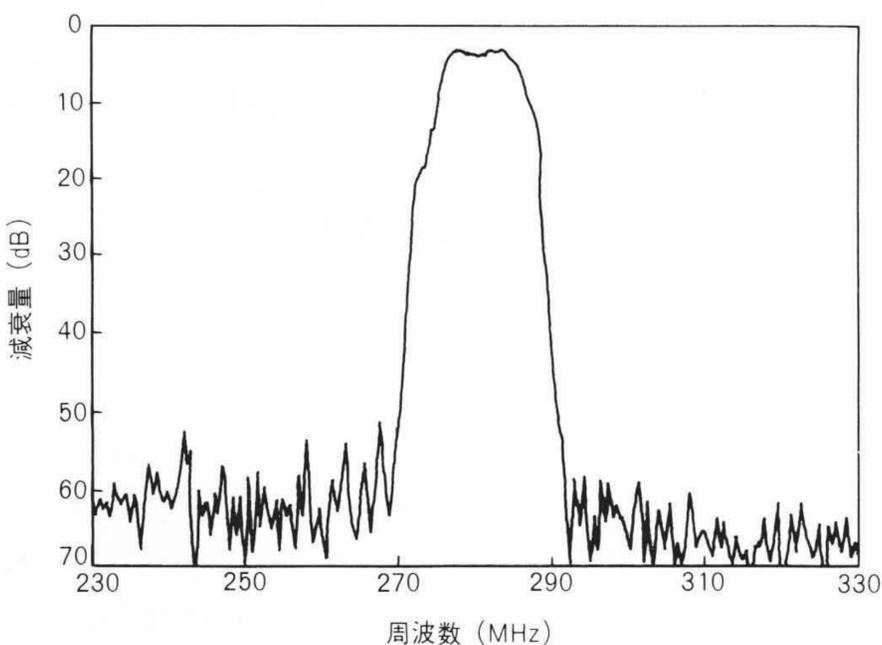
dB, 帯域外減衰量50 dBの特性を持ち, TO-39パッケージで(直径9.0 mm×高さ3.1 mm)に収め小形化を実現した。

3.2 自動車(携帯)電話用SAWフィルタ

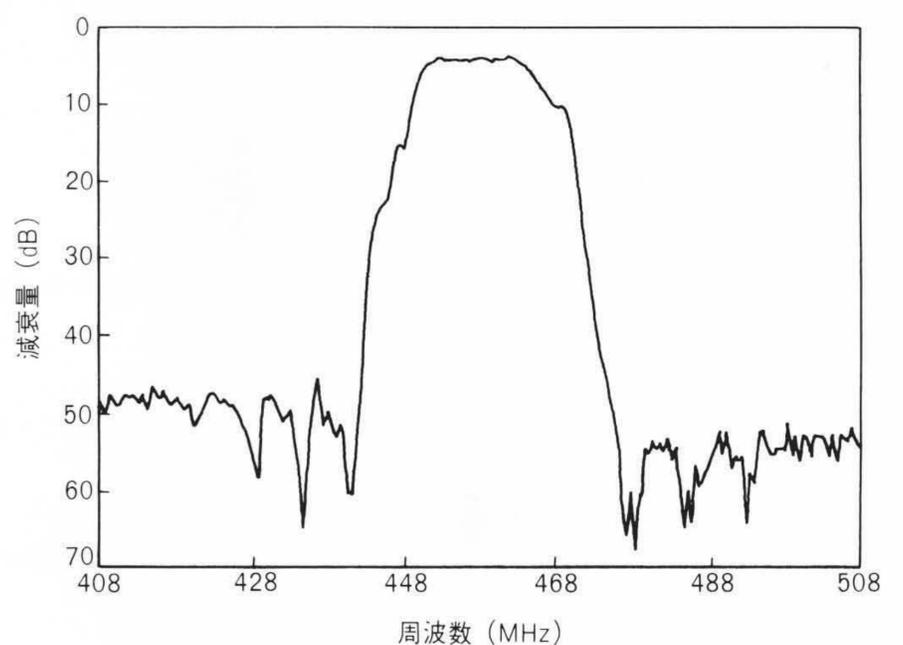
世界各国の方式〔国内, 米国E-AMPS (Extended Advanced Mobile Phone Service), 英国E-TACS (Extended Total Access Communication System), 西ドイツC450, 欧州大陸NMT (Nordic Mobile Telephone)-450, NMT-900ほか〕に対して, 高周波回路部の送受信段間フィルタをそれぞれ製品化し, ラインアップをとりそろえた。以下に代表例を述べる。

西ドイツC450用の送信段間フィルタ(HW454 M)を図13(a)に示す。中心周波数453.5 MHz, 帯域幅4.4 MHz, 損失4.0 dB, 帯域外減衰量60 dBの特性を持ち, TO-39に収め小形化を実現した。

英国E-TACS用の送信段間フィルタ(HWA101)を図13(b)に示す。中心周波数888.5 MHz, 帯域幅33 MHz, 損失4.5 dB, 帯域外減衰量50 dBの特性を持ち, TO-47パッケージ(直径6.2 mm×高さ2.0 mm)に収め小形化を実現した。

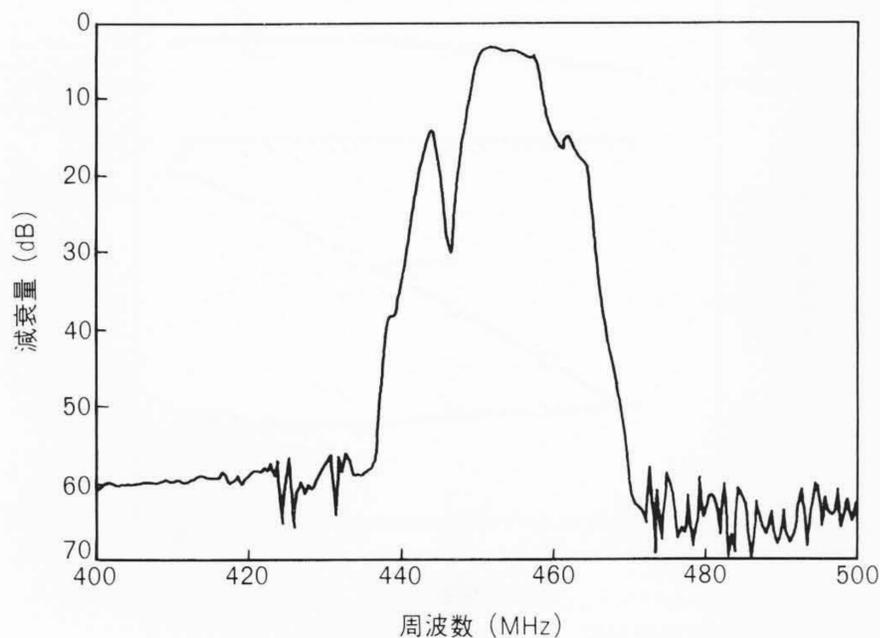


(a) 国内向けHWIE001 SAWフィルタ周波数特性

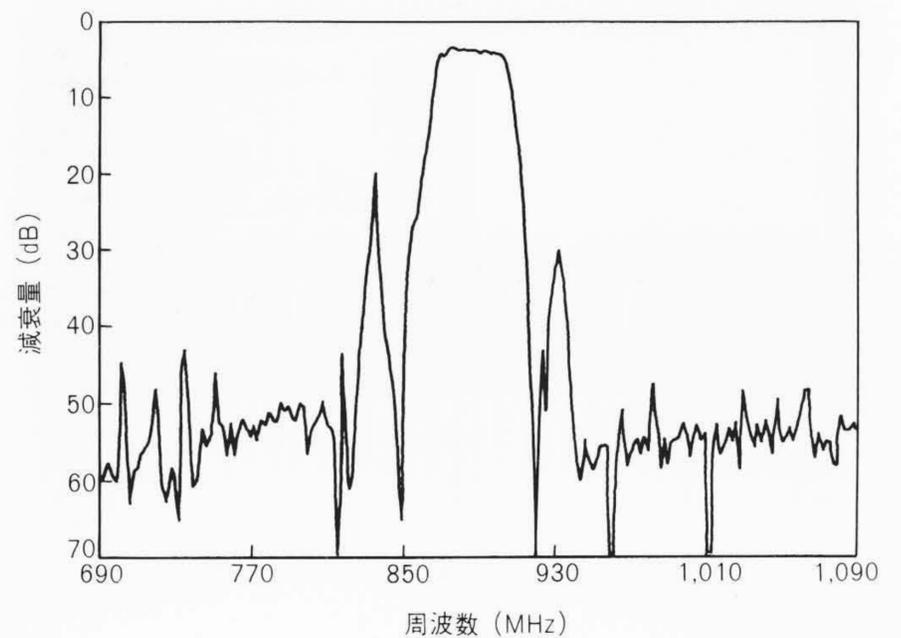


(b) 海外向けHW458M SAWフィルタ周波数特性

図12 ポケットベル用SAWフィルタの周波数特性 国内, 海外向けとして製品化しているポケットベル用SAWフィルタの代表例の周波数特性を示す。



(a) 西ドイツC450用HW454M SAWフィルタ周波数特性



(b) 英国E-TACS用HWA101 SAWフィルタ周波数特性

図13 自動車(携帯)電話用SAWフィルタの周波数特性 世界各国向けに製品展開しているSAWフィルタの代表例として、西ドイツ向けと英国向けの送信段間フィルタの周波数特性を示す。

4 SAW機能モジュール

SAWデバイスの将来形態は、小形のメリットを最大限生かし、使い勝手を考慮して他の能動素子、受動素子と一体化した機能モジュールの方向が考えられる。第1段階として分波器と電圧制御発振器モジュールを開発した。

4.1 分波器モジュール

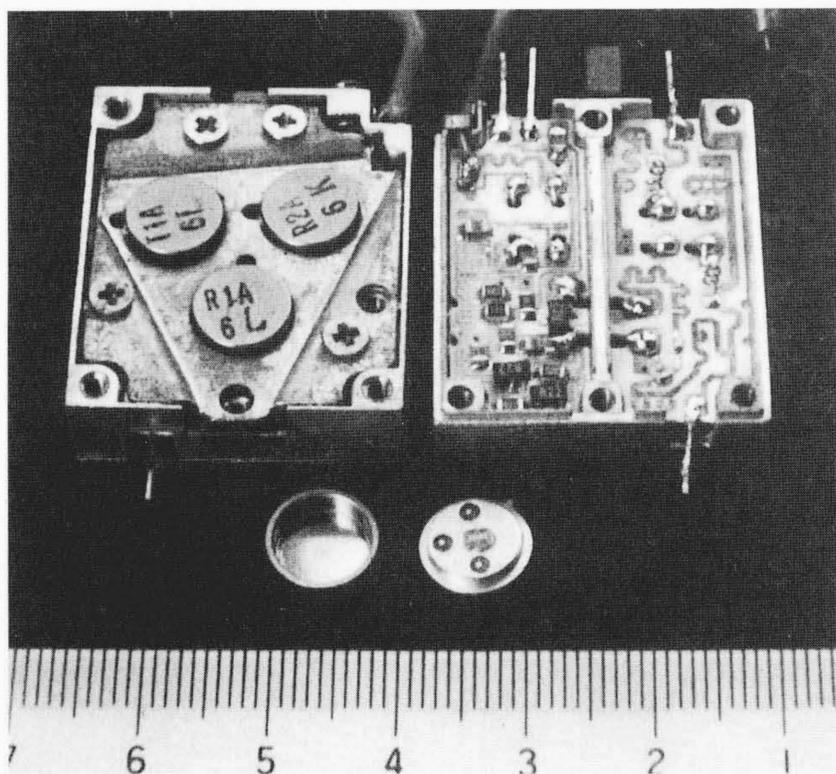
図1の送信終段フィルタ、受信初段フィルタ、受信段間フィルタおよび受信低雑音増幅器を内蔵するSAW分波器モジュールを開発した。外観を図14(a)に示す。送信終段フィルタには1W程度の電力が通過するため、図6の耐電力SAWフィル

タを用いた。受信初段、受信段間フィルタには、3章同様図5のイメージ接続フィルタを基本形に、図4の新位相重み付けを導入して実現した。

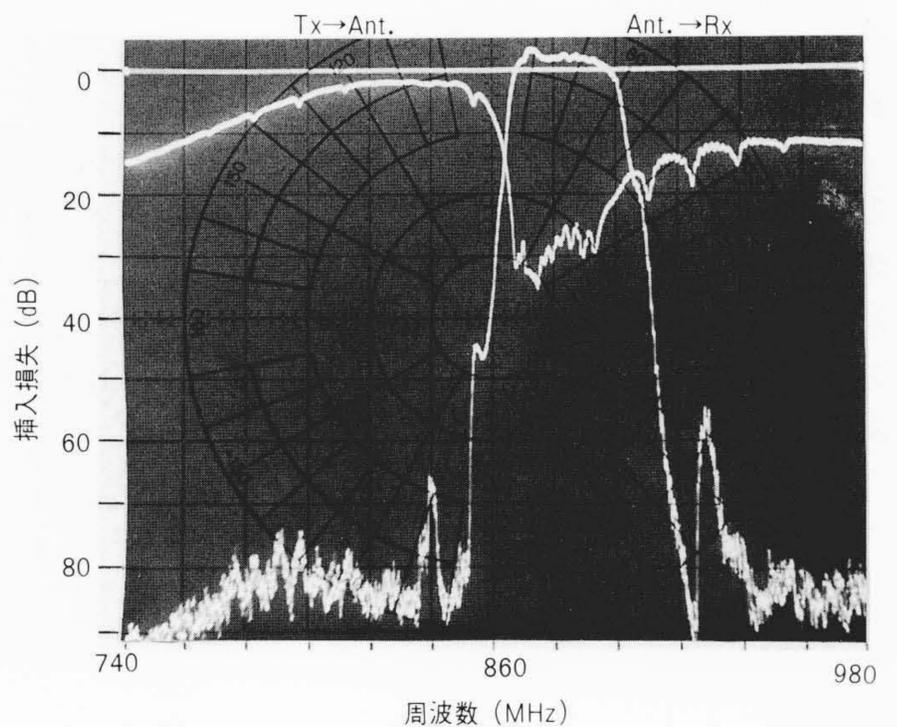
モジュールの周波数特性を図14(b)に示す。この特性は送信段間フィルタとの組み合わせで米国EIA (Electronic Industries Associations)仕様を満足する。

4.2 SAW電圧制御発振器モジュール

図7のテーパ反復共振器を用い、帰還増幅器、バッファ増幅器なども内蔵する電圧制御発振器モジュールを開発した。外観を図15(a)に示す。SAW共振器は、振動、モジュールの金属壁の影響をほとんど受けない。したがって、きわめて薄形



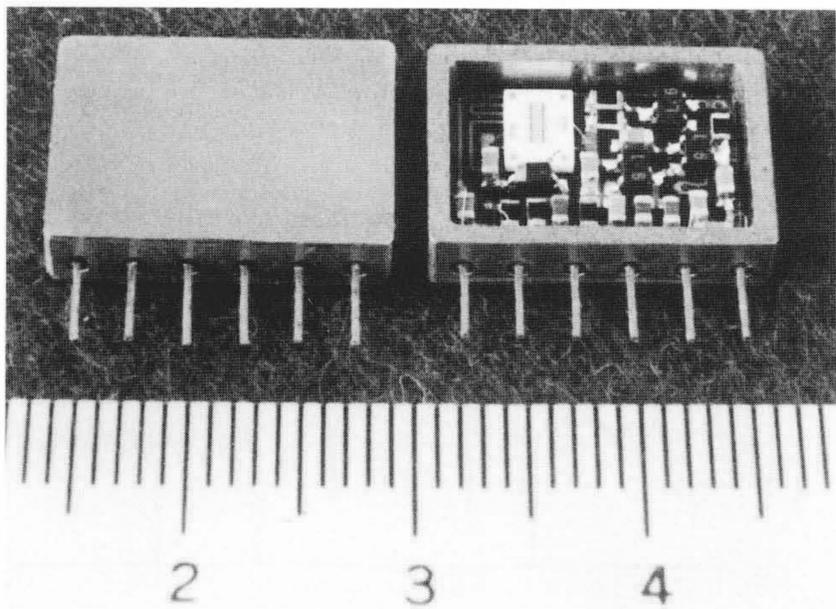
(a) 外観



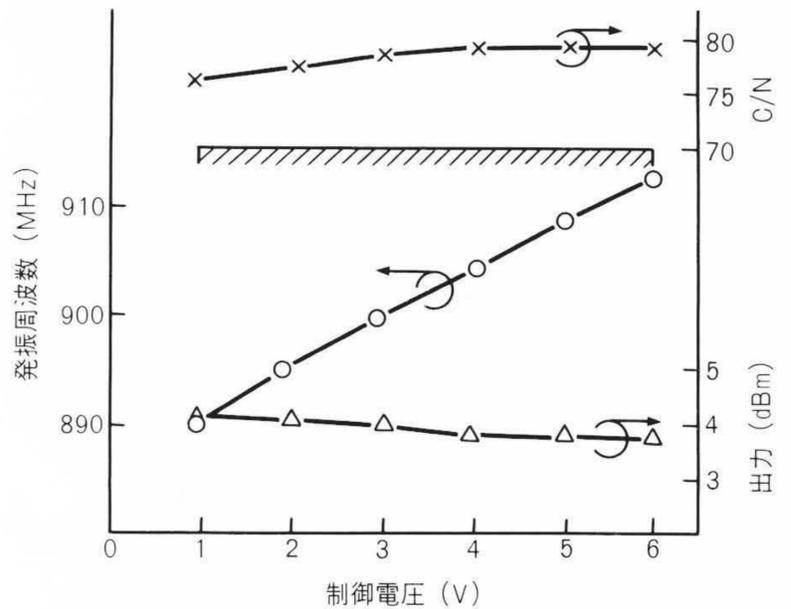
注：略語説明 Tx (送信機), Rx (受信機), Ant. (アンテナ)

(b) 周波数特性

図14 SAW分波器モジュール 送信終段、受信初段、受信段間SAWフィルタおよび受信低雑音増幅器を内蔵している。



(a) 外観



注：略語説明 C/N (Carrier/Noise)

(b) 特性

図15 SAW電圧制御発振器モジュール SAW共振器，帰還増幅器およびバッファ増幅器などを内蔵している。

の小形パッケージに実装でき，世界最小値(0.7 cc)で業界初の縦形シングルインライン構造を実現した。モジュールの特性を同図(b)に示す。この特性は防災無線，MCA (Multi Channel Access) などの汎用無線携帯端末の仕様を満足する。

5 結 言

移動無線通信は21世紀に向けて通信の新形態を構築しつつある。固定通信と異なり無線機端末の小形・軽量化が市場価値を決定する。SAWデバイスは，小形化に最も寄与するデバイスと言われながら性能面で課題が多く，大幅な採用には至らなかった。最重要課題であるフィルタの低損失化，共振器の広帯域化にブレークスルーを見だし，微細電極加工技術の開発，新圧電基板の採用により，ポケットベル，自動電話用などのSAWフィルタを製品化した。また，SAWデバイスとともに他の能動素子，受動素子を単一パッケージに内蔵する機能モジュールを開発した。

今後は，SAWデバイス単体のいっそうの性能向上を図るとともに，チップ実装，さらに他の能動素子，受動素子との一体化などで高周波部の大規模なモジュール化を検討する。また，システムのデジタル化，準マイクロ波化に対応した新デバイスの開発，プロセス技術の確立および新圧電基板の探索を行う。

参考文献

- 1) M. Hikita, et al. : 800-MHz High-Performance SAW Filter Using New Resonant Configuration, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol.MTT-33, p.510(1985)
- 2) M. Hikita, et al. : SAW Integrated Modules for 800-MHz Cellular Radio Portable Telephones with New Frequency Allocations, IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec. Freq. Contr., Vol.UFFC-36, p.531(1989)
- 3) 湯原，外：高周波SAWデバイスの耐電力微細Al系電極とドライエッチングの適用，日本学術振興会弾性波素子技術第150委員会第21回研究会資料，p.35(1990-1)
- 4) N. Hosaka, et al. : A study of Al-Alloy Electrodes for High Power SAW Filters, Proc. 8th Symp. Ultrasonics Electronics, Tokyo 1987 : Jpn. J. Appl. Phys. 27, Suppl. 27-1, p.175(1988)
- 5) K. Nakamura, et al. : SH-type and Rayleigh-type Surface Wave on Roted Y-cut LiTaO₃, in IEEE Ultrasonics Symp. Proc., p.819(1977)
- 6) K. Yamanouchi, et al. : Propagation and Amplification of Rayleigh Waves and Piezoelectric Leaky Waves in LiNbO₃, J. Appl. Phys., Vol.43, p.856(1972)