OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	高周波ダイヤモンド弾性表面波デバイスに関する研究
Author(s)	鹿田, 真一
Citation	大阪大学, 2004, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2837
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

高周波ダイヤモンド弾性表面波デバイス
に関する研究

２００４年

鹿田真一

目次

第１章　序論

１-１．通信システムとＳＡＷデバイス　1
（１）光通信
（２）無線通信
（３）発振器
１-２．弾性表面波とＳＡＷデバイス材料　4
（１）弾性表面波
（２）弾性表面波デバイス
（３）弾性表面波に用いる材料
１-３．ダイヤモンド系ＳＡＷデバイスの意義　11
１-４．本論文の構成　12
参考文献　13

第２章　ダイヤモンドＳＡＷ特性のシミュレーション

２-１．はじめに　14
２-２．理論とシミュレーション内容　14
（１）理論
（２）シミュレーション内容
２-３．ZnO／ダイヤモンド　18
２-４．SiO_2／ZnO／ダイヤモンドによる温度補償　20
２-５．その他材料系の計算　23
（１）AlN／ダイヤモンド
（２）$LiNbO_3$／ダイヤモンド
（３）$LiTaO_3$／ダイヤモンド
（４）SiO_2／$LiNbO_3$／ダイヤモンド
（５）単結晶$LiNbO_3$／ダイヤモンド
２-６．材料系の比較検討　36
２-７．層構造ＳＡＷの速度分散性　38
２-８．まとめ　42
参考文献　43

第３章　ダイヤモンドＳＡＷデバイスの作製

３-１．はじめに　45
３-２．ダイヤモンド／Siウェハの合成と研磨　45
（１）合成及び研磨方法の検討
（２）ダイヤモンドウェハの伝搬損失低減
３-３．ZnOの成膜　58
（１）c軸配向性
（２）異常成長低減

３-４．高周波ＳＡＷデバイスの作製プロセス　67
（１）プロセスフロー
（２）櫛形電極形成
３-５．まとめ　77
参考文献　78

第４章　ダイヤモンドＳＡＷデバイスの特性評価

４-１．はじめに　80
４-２．基本特性の評価　80
４-３．温度特性の評価　81
４-４．耐電力特性の評価　88
４-５．伝搬損失の評価　95
４-６．信頼性の評価　97
４-７．まとめ　100
参考文献　101

第５章　通信デバイスへの応用

５-１．はじめに　103
５-２．光通信用フィルタへの応用　106
（１）タイミング抽出フィルタ
（２）光通信用光受信モジュールへの適応
５-３．無線通信用フィルタ及び発振器用共振器への応用　114
（１）無線通信用狭帯域フィルタ
（２）発振器用共振器
５-４．まとめ　121
参考文献　122

第６章　結論　123

付録　126

研究業績リスト　135

謝辞　145

第１章　序論

最近通信の世界は、まさに様代わりしようとしている。光ファイバを用いた通信が幹線だけでなくオフィスまで入り、携帯電話に代表される無線通信は固定通信を駆逐しそうな勢いである。通信機器の小型、大容量、高速化、高周波化が激しく、標準化がそれを追いかけるような形で技術が進んでいる。こうした技術の進展を支えるのが各種デバイスである。LSIを中心にディスクリートデバイス、フィルタに代表される周波数制御デバイス、クロックデバイス、表示デバイスなどである。周波数制御デバイスも、体積が大きいデバイスの代表である誘電体フィルタから弾性表面波デバイス（ＳＡW-Surface Acoustic Wave）に置換が進んでいる。しかし、そのＳＡWデバイスでも高周波化では従来の水晶、$LiTaO_3$など周波数の限界に差しかかってきている。このため様々な工夫がなされてはいるが、全く新しい材料の出現が強く望まれてきている。本研究は、新たにダイヤモンドの高い弾性率を応用して、高周波ＳＡWデバイスを実現すべく、基礎から検討を行い、様々な分野でデバイスを実用化するに至った一連の研究に関するものである。まず本章では、本研究の背景として通信分野の状況、ＳＡWデバイスの状況などについて述べ、本研究でダイヤモンドＳＡWデバイスを取り上げる目的を明らかにする。

１-１.通信システムとＳＡWデバイス

（１）光通信

最近の通信状況の激変が、光ファイバによる通信網に依存する事はいうまでもない。現在全国の主要都市に敷設が終了し、デジタルＩＳＤＮ網も漸く生活に浸透してきた。しかしせいぜい64Kbpsをベースとした通信網であり、画像伝送などはまだ容量的に困難である。高度画像伝送やリアルタイム処理に用いられるのが、末端まで光ファイバを用いる広帯域デジタル通信網であり、伝送の基本に世界統一標準の新ハイアラキであるＳＤＨ規格を採用しあらゆる機器、サービスを統合できるようになっている。このシステムでは155.52Mbpsを基本レートとする622.08Mbps　から10Gbpsに至る高速ハイアラキが設定されている［1］。これらの通信ハイアラキを図１-１に示す。最近では各大学、オフィスで155.52Mbpsの高速の構内ＬＡＮが敷設されつつある。最近は光ファイバを有効に用いる技術が進展し、1.55μm帯を少しずつ波長を変えて多重化し、一本のファイバに8倍とか32倍の伝送を可能にする波長分割多重方式が採用されつつある。各オフィスや家庭に光ファイバが入る頃には、大容量の基幹伝送系が不可欠であり、2.5Gbpsや10Gbpsのような現在基幹系となっている高速系も端末に近いところまで広がるであろう。

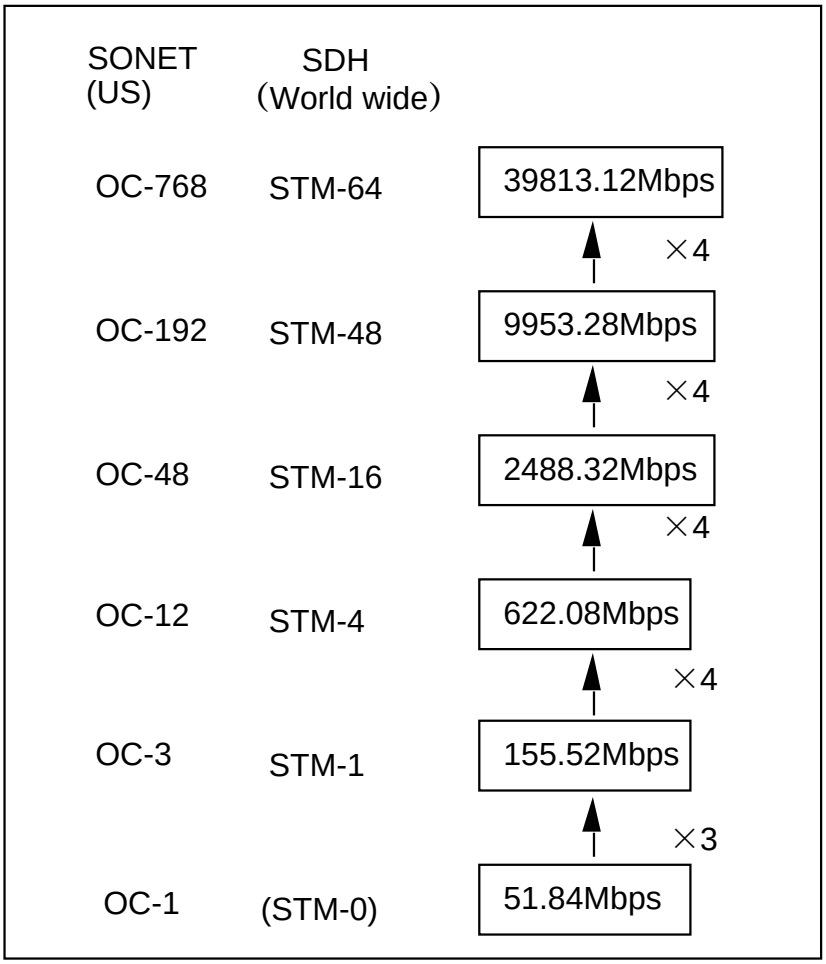


図１-１．光通信の世界規格（ＳＤＨ）及び米規格（ＳＯＮＥＴ）のハイアラキ

詳細は応用の章で後述するが、こうした光の分野でＳＡＷデバイスは、受信用にはタイミング抽出回路の中で用いられる。上記伝送レートに対応して2.5GHzから10GHzの高周波域でのＳＡＷフィルタが期待されている。また送信側には、クロックとしてジッタを除去したきれいな信号が要求されており、そのジッタのフィルタに、高周波ＳＡＷ共振器をベースとした電圧制御ＳＡＷ発振器（ＶＣＳＯ）が期待される。特に10Gbpsや40Gbpsシステム用に2.5GHzなどの高速クロックが必要になる。

（２）無線通信

近年大容量データ伝送や移動体通信に対するニーズから、周波数は限られた天然資源であるというように認識されつつある。これに対応するため、通信の世界標準化や周波数移転、周波数有効利用が進みつつある。移動体通信ではこれまで第二世代として世界各国で独自システムが採用されており、第三世代は国際ローミングに対応してＷＣＤＭＡ（Wideband Code Division Multiple Access）という世界の標準化が進んでいる［1］。この分野のＳＡＷデバイスとしては2から6GHzの高周波における

RFフィルタやデュプレクサが期待されている。特に送信側では増幅後の高電力信号を通過させるため、高い耐電力性が必要である。ダイヤモンドがこの用途に適している事は４章で詳述する。これ以外にも、知的交通システムでも高周波域を用いた様々なシステムが考えられている。例えば高速道路の料金無線徴収は、世界共通で5.8GHz帯が利用されている。同じ5GHz帯を使用する予定の新システムＤＳＲＣ（Dedicated Short Range Communicaiton）では様々なサービス提供が検討されている。ＯＡ関連でも、無線ＬＡＮなどでこの5.2から5.8GHzのあたりの周波数利用が進みつつある。ミリ波も、Ka帯から76GHz帯まで広く用いられつつあり、ＬＭＤＳ（Local Multipoint Distribution System）というラストワンマイルの大容量通信、車両衝突防止などが考えられている。これらのシステムではRF域からダウンコンバートしてベースバンドに落とすまでの第一IFフィルタとして1から2GHzが使用される事が多い。IFフィルタでは通過帯域の整形が求められる事が多く、波形整形が設計で可能なＳＡＷフィルタが求められる。図１-２に通信機器におけるＳＡＷデバイスの使用例を図示する。分波器、RFフィルタ、IFフィルタなど多数のＳＡＷデバイスが使用されている事がわかる。

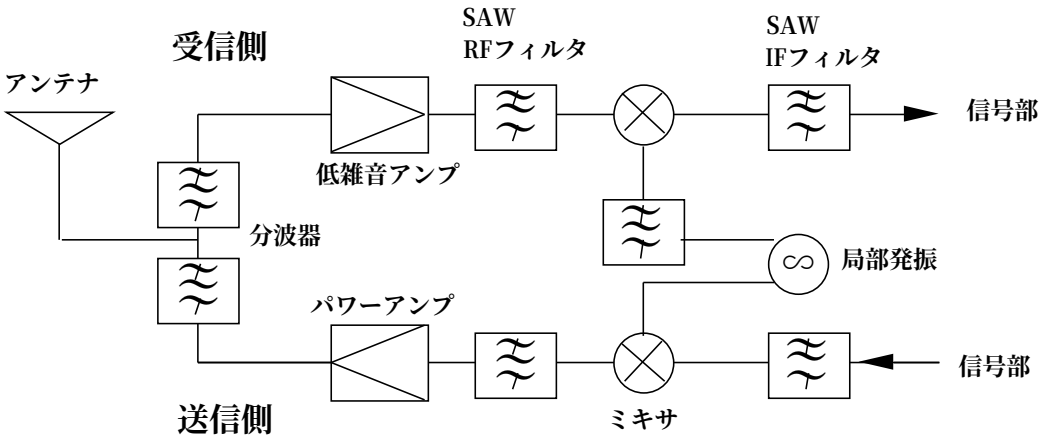


図１-２.通信機器におけるＳＡＷデバイスの使用例

（３）発振器

上記光及び無線通信機器の高周波化に伴い、クロック系も当然高速化しており、数十MHzの水晶発振器から逓倍を繰り返す方式は様々な限界を迎えている［2］。６章に詳述するが、逓倍そのものによる位相雑音の増加、電力やサイズの増大、また逓倍ICに起因するジッタの発生など多くの問題がある。これを克服するために極限まで水晶振動子を薄膜化する技術が開発されているが、600MHzレベルで限界となっている。このため、高性能のＳＡＷ発振器（SAW　Oscillator）や電圧制御ＳＡＷ発振器ＶＣＳＯが要求されており、逓倍後の高周波ＳＡＷフィルタや、ＳＡＷを含む回路で直接高周波を発振する方式への期待がかかる。

１-２.弾性表面波とＳＡＷデバイス材料

（１）弾性表面波

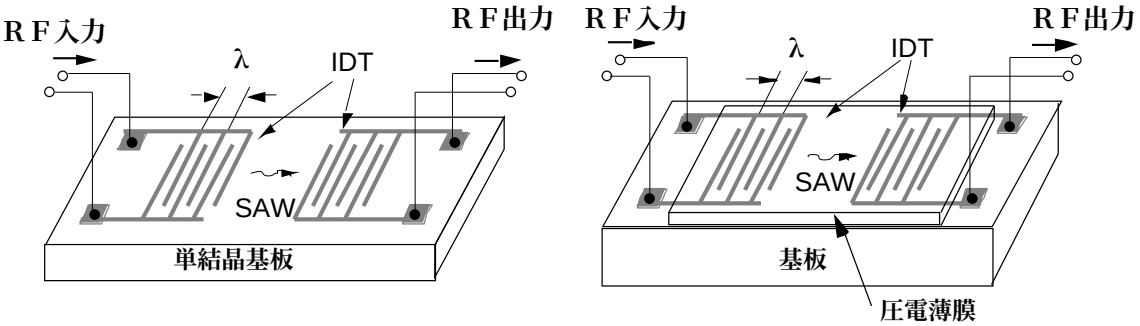
次に本研究の対象とするＳＡＷデバイスについて概観する。固体表面を伝搬する音波を総称して弾性表面波といい、それを利用したデバイスをＳＡＷデバイスという。誘電体デバイス、セラミックフィルタなどと同様に通信の基本デバイスとして多用されている。TV用のフィルタを始めとして、通信機器の発振器、送受信モジュールに用いるRFフィルタ、IFフィルタ、レーダー遅延線などの用途に用いられている［3,4,5］。弾性表面波の中では、地震波で古くから研究されているレイリー（Rayleigh）波が最もよく利用されている。その波の変位の例を図１-３に示すが、表面から１波長以内の深さにほぼ９０％のエネルギーが集中しており、表面から遠ざかるにつれてその振幅が指数関数的に減少する。その他様々な弾性波が存在するが、例えば、その中で最もよく利用されているリーキー波は伝播中にエネルギーをロスする弾性表面波である。薄膜積層の場合は、レーリー波以外にその高次モードであるセザワ波などが存在する。これらの波で実際に使用されているのは、殆どレーリー波が主であったが、最近漸くリーキー波やセザワ波などが用いられるようになってきた。

この弾性表面波を用いて、周波数制御デバイスとして実用化されているものが、弾性表面波デバイスである。この節ではデバイスの概要を簡単に説明し、現在使用されている材料系について概観する。

図１-３.レイリー波の変位の例

（２）弾性表面波デバイス

図１-４に示す原理図のように、圧電体の表面に櫛形電極（IDT：Interdigital Transducer）を設け、高周波電界を加えると、圧電効果を介して弾性表面波が励振される。　これを再度高周波信号に変換し、特定の周波数を選別する、高周波→弾性表面波→高周波　の変換デバイスである。弾性表面波に変換しなかった電磁波がワイヤ間などで放射される”直達波”と呼ばれる電磁波をカットするためにメタルキャップで実装される。



（ａ）単結晶ＳＡＷデバイス　　（ｂ）積層型ＳＡＷデバイス

図１-４.単結晶及び積層型ＳＡＷデバイスの概念図

ＳＡＷデバイスの特徴としては、下記が挙げられる。

ａ）小型で表面実装可能。

ｂ）高い周波数帯に対応可能。

ｃ）IDT設計で特性が決まり、個々のデバイスは調整の必要がない。

ｄ）半導体プロセスを用いるので量産性に優れる。

ｅ）基板の片面を固定可能。振動に強い。

これに対して、欠点としては、

Ａ）挿入損失が大きい。

Ｂ）帯域が限定される。

Ｃ）耐電力性に劣る。

などであり、用途に応じて使い分けられる。ＳＡＷデバイスは、設計やプロセスの改善によってこれら挿入損失、広帯域、耐電力性などの欠点も克服し、周波数デバイスの中心的役割を担っており、高周波化などで更なる飛躍が期待されている。

ＳＡＷデバイスを数学的に表現すると図１-５のようになる。入力電極のエンベロープ関数Hを持って波が伝播するので、Hのフーリエ変換したものが、出力される。

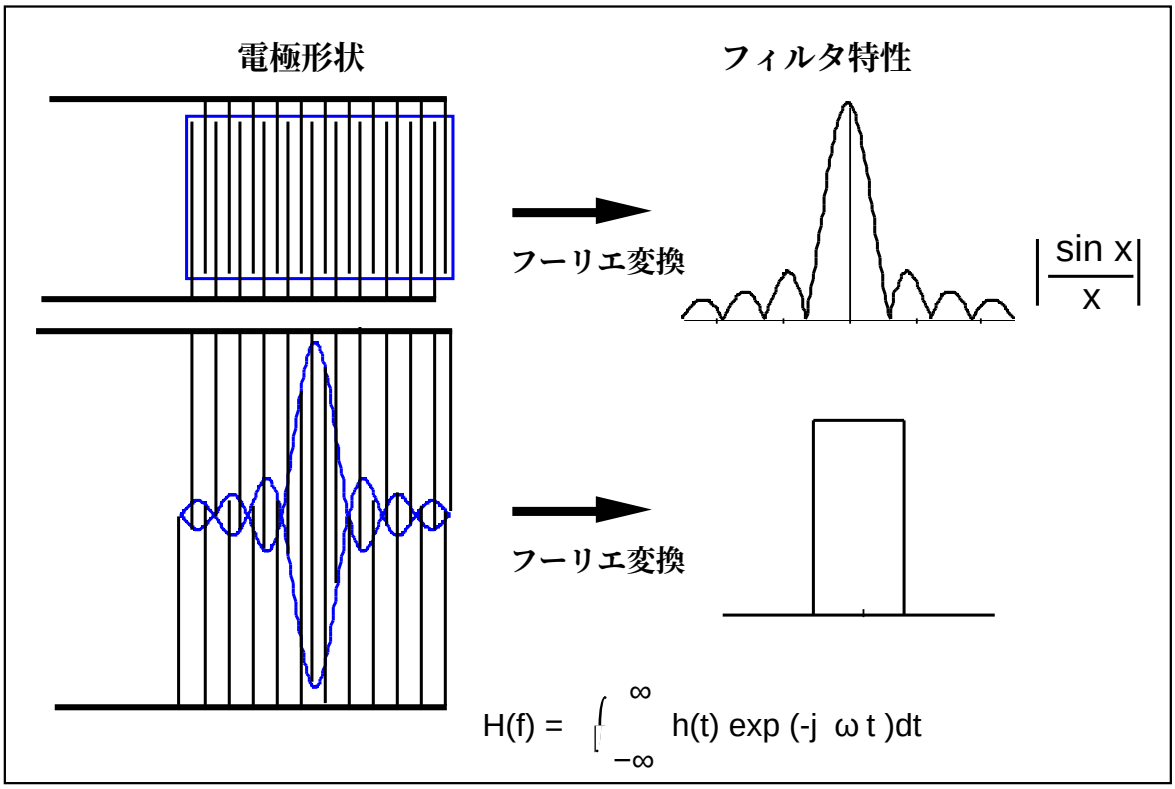
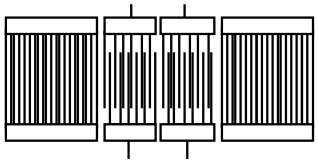
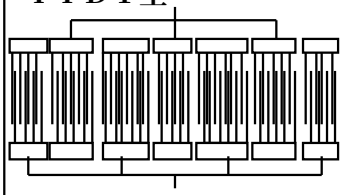
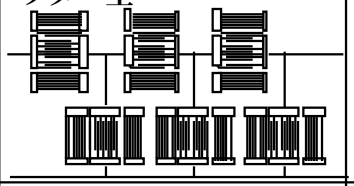
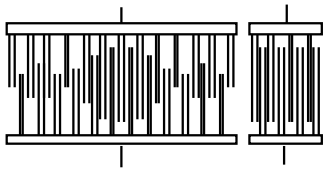
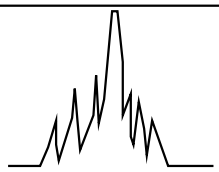
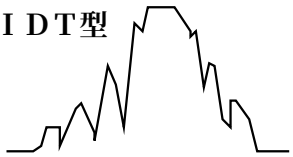
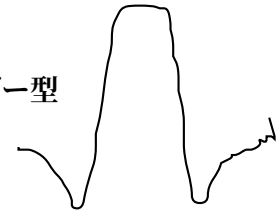
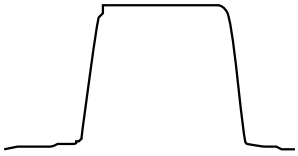


図１-５．ＳＡＷデバイスの数学的表現

またＳＡＷデバイス設計の基本形を表１-１に示す。この中で、波形整形フィルタはトランスバーサル型といい、このフーリエ変換デバイスの特性を十二分に活かしたものである。即ち必要な周波数特性を時間軸上で逆フーリエ展開し、それを電極形状のエンベロープとすることにより所望の周波数特性を得る設計方法である。他の周波数制御デバイスでは原理上不可能な設計であり、設計の自由度が極めて高くなる特徴がある。共振器型は後述する共振子の設計をフィルタに用いるもので、トランスバーサル形で外に捨てたエネルギを反射器によって内部に閉じ込める事で、低損失を狙う設計手法である。電極対数が多くなるので帯域幅が狭くなる欠点があるが、狭帯域用途には多用される。多電極型（ＩＩＤＴ型 - Interdigitated　IDT）もこれをさらに発展させたもので、入出力を交互にする事によって、エネルギーロスを極力減らす事により、低損失を実現すると共に、帯域を広げたものである。ラダー型は、ＳＡＷ共振子を直列、並列に配置して、多段の梯子構成としてつくり、帯域を広げた特性を出す事が可能で、移動体機器に使われている。従来から誘電体デバイス等では知られた方法であるが、富士通［6,7］によってＳＡＷに採用されてから、またたく間に広がり、携帯電話のRFフィルタはほとんどこの設計が用いられていると言っても過言ではない。

表１-１．代表的なＳＡＷデバイス電極設計法の比較

	狭帯域フィルタ	広帯域フィルタ	波形整形フィルタ
電極構成	電極、反射器 	ＩＩＤＴ型  ラダー型 	重み付け電極 
特徴	鋭いピーク特性	低損失、広帯域	任意の周波数特性
周波数特性		ＩＩＤＴ型  ラダー型 	
主な用途例	光通信 共振器	携帯電話ＲＦ	ＩＦフィルタ 交通、無線ＬＡＮ、衛星

次にＳＡＷ共振子である。１ポート共振子は、入出力電極の両側に反射器を設け、外側に向かって伝搬する表面波を反射させてエネルギーを利用する。損失が少なく、高Ｑの共振特性が得られる工夫をした設計である。前述のように、複数の共振子を結合させて、フイルタ特性を得ることもできる。　これに対し、２ポート共振子は、電極を入力、出力に分けて、より高い周波数帯の発振回路に適合するように工夫したもので、これも前述のようにフィルタとしても利用する事が可能である。

ＳＡＷデバイスの用途は広く、家電機器、ＯＡ機器・情報端末及び周辺機器、カーエレクトロニクス制御機器、通信機器、光通信機器、移動体通信（基地局、端末機器）、マイクロ・衛星通信機器、知的交通システム機器のような分野が挙げられ、ほぼすべての電子分野と言っても過言ではない。

（３）弾性表面波に用いる材料

弾性表面波に用いる材料は、それ自身が圧電材料である単結晶材料群と、圧電薄膜を別の基板に積層する積層材料群に大別される［3,4,5］。

ａ）単結晶材料

水晶はじめ多くの酸化物が圧電性を有するため、数多くの材料があるが、実用化されているのは限られたいくつかの材料のみである。単結晶では、結晶のカット面、伝播方向により、速度や電気機械結合係数など弾性表面波の特性が大きく異なるため、同一結晶でもカット角や伝播方向が重要である。

水晶（SiO_2）は三方晶系の単結晶で、天然に存在する極めて安定な物質である。水晶を正確な寸法で切り出したものは、固有の振動をもっており、温度特性、周波数特性に優れる事はもとより、物理化学的に安定でエージング特性に優れる事から、発振器や、ＳＡＷデバイスとして広く用いられており、電子機器には必ず搭載されていると言っても過言ではない。１次温度特性が零であり、２次特性、場合によっては３次特性も得られるほど温度変動が少ない。動作温度範囲で200ppm程度しか変動しない特性は共振器や、狭帯域デバイスのように周波数変動を出来るだけ避けたい用途に重宝されている。水晶は温度特性に優れる一方、電気機械結合係数は小さい。このため広帯域デバイスが困難であり、移動体通信など広帯域が必要な用途でRFフィルタに用いられる事はなく、もっぱら共振器型設計を用いて、狭帯域フィルタや共振器に用いられる。水晶に似た材料としてはリチウムボレート（$Li_2B_4O_7$）がある。タンタル酸リチウム（$LiTaO_3$）、ニオブ酸リチウム（$LiNbO_3$）は数多くある酸化物材料の中で、ＳＡＷデバイスに最も多用される結晶である。三方晶系に属する結晶であり、半導体結晶と同様のチョクラルスキー法により、融液から回転引き上げにより成長されている。これらの材料の特徴は、水晶と比べて電気機械結合係数が高い事であり、移動体通信機器のRFフィルタ、分波器など広帯域用途に用いられる。温度特性は悪く、例えば$LiNbO_3$に至っては70ppm/℃程度と大きい。これは-40から85℃で9000ppmも周波数がずれる事を意味しており、広帯域フィルタにしか適用されない事を意味している。これら材料では高い位相速度を持つリーキー波が使われる事が多くなっている。

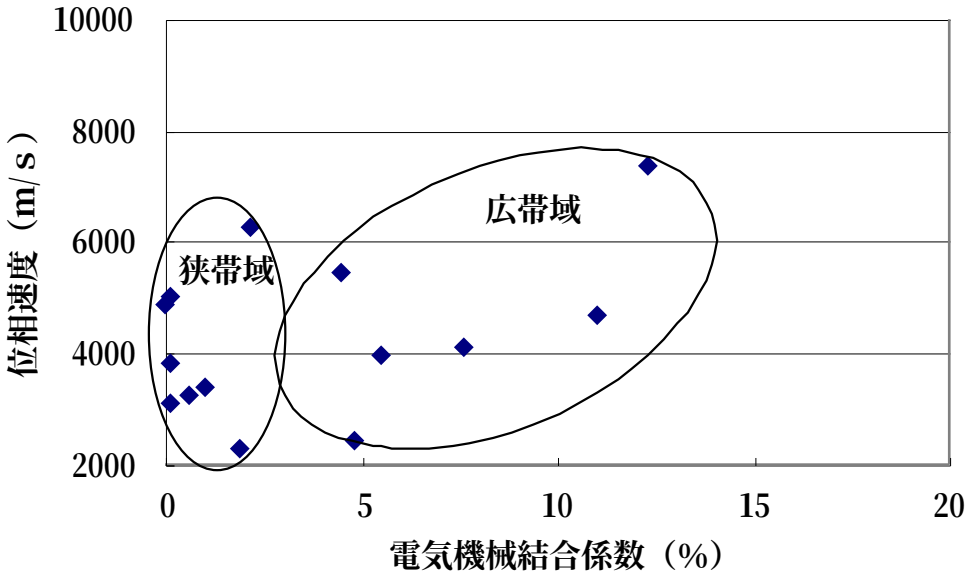
ｂ）積層材料

積層にする事の意義は、単結晶材料で得られない特性、例えば高周波実現のための高速度基板との積層、温度係数低減のためのSiO_2膜の積層などである。

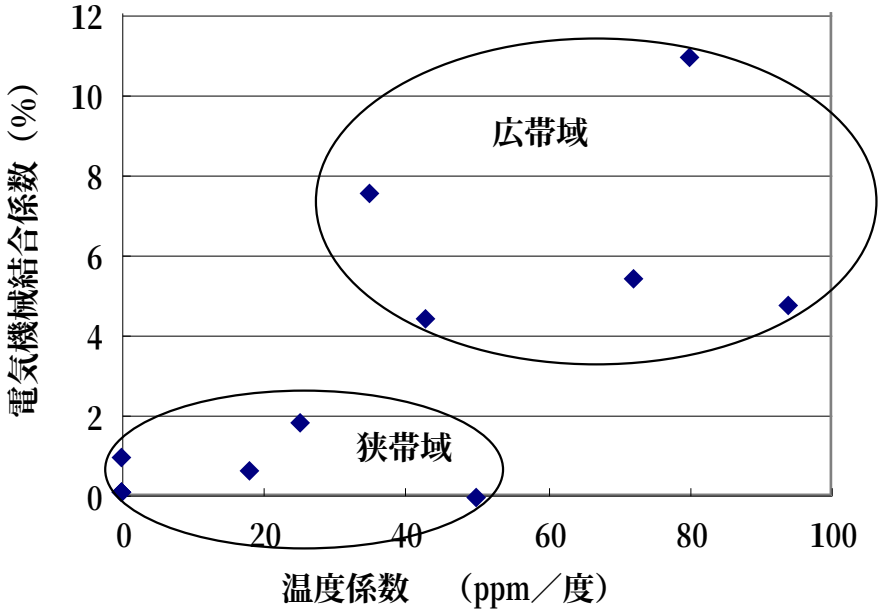
ZnO／ガラスがTV用IFフィルタとして実用化されている他、ZnO／サファイア［8］が移動体通信用RFフィルタなどで2GHz帯で使用されている。サファイアR面では、

ZnOが、（11-20）ZnO／／（01-12）サファイアR面　の方位でエピタキシャル成長するという特徴があるため、ｃ軸配向膜に較べて良質のZnOを成膜する事が可能である。

以上、通常に使用されている材料群を表１-２にまとめる。また図１-６にパラメータでプロットしたものを記載する。



（ａ）従来ＳＡＷ材料系位相速度と電気機械結合係数



（ｂ）従来ＳＡＷ材料系の電気機械結合係数と温度係数

図１-６．従来ＳＡＷ材料系のパラメータ

殆どの材料は位相速度は5000m/sまででである。例外として狭帯域用として水晶のSH波の5088m/sがあるが、２次温度特性が悪く、用途が限定されている。また広帯域用ではLiNbO3の第二リーキー波の7400m/sがあるが、温度特性が悪く殆ど使用されていない。なお、本研究で使用する右手系のオイラー角の取り方を図１-７に示す。

表１-２.従来のＳＡW材料系のパラメータ

	カット・方向	位相速度 m/s	K^2 %	温度特性 ppm / deg	波
Quartz	28 ~ 42YX	3158	0.14	0	Rayleigh
	-7.5YX	3948	0.11	0	Leaky
	36Y-Z	5088	0.11	0	SH
$LiTaO_3$	X-112Y	3287	0.64	18	Rayleigh
	36Y-X	4160	7.6	35	Leaky
		6300	2.2		2nd Leaky
$LiNbO_3$	128Y-X	3992	5.5	72	Rayleigh
	Y-Z	3488	4.8	94	Rayleigh
	64Y-X	4742	11	80	Leaky
		7400	12.3		2nd Leaky
$Li_2B_4O_7$	45X-Z	3440	1.0	0	Rayleigh
	45X-90Z	4915	0.14	50	BG
ZnO/glass		2360	1.9	25	Rayleigh
ZnO/sapphire		5500	4.5	43	Rayleigh

図１-７.本研究でのオイラー角の取り方

１-３.ダイヤモンド系ＳＡＷデバイスの意義

本研究では、これらの材料に対して、ダイヤモンドの適応がどういう意義をもつかについて述べる。前項で見たように、近年の通信の高周波化は目覚ましいものがあり、そのような高周波化にＳＡＷデバイスではどのように対処しようとしているかについて述べる。

ＳＡＷフィルタの中心周波数f_0は、弾性表面波速度Vと櫛型電極周期λを用いて、

$$f_0 = V / \lambda \qquad (1-1)$$

で表される。　従って高周波の実現には、微細加工か、高音速波を用いるかの２通りのアプローチが存在する。これまでは単純に前者の、微細加工を追及する線で高周波化が進められてきたが［9］、ハーフミクロンを越す領域での線幅制御、線幅が細くなる事による劣化、特に高電力に対する劣化が顕著になってきている。

後者の高速度化の手段としては、下記の３つが挙げられる。

１）高速度圧電材料を用いる［10］

２）漏洩波などの高速度の波を用いる［11］

３）高速度基板の上に圧電薄膜を形成する［12］［13］［14］

前述の$LiTaO_3$のリーキー波は２）の例であり、ZnO／サファイアは３）の例である。ダイヤモンドの適応は３）の高速度基板に属する。物質中最高の弾性定数を有する材料はダイヤモンドであり、圧電薄膜を積層しても10,000m/s以上を実現できる唯一の材料として期待される。これは通常のＳＡＷ材料の２～３倍にも及ぶ。これがまさしく本研究を行おうとする目的である。ダイヤモンドを用いたＳＡＷデバイスに関しては、Yamanouchiら［14］のAlN及びZnOをダイヤモンドに積層した系の位相速度と電気機会結合係数を計算した先駆的研究がある。本研究もその報告と同時期から検討を進めており、それをさらに発展させた独自の研究である。

一方、実用を考慮した場合、材料の選択は、通信に用いる帯域幅に大きく依存する。材料定数としては電気機械結合係数と温度係数である。ここで電気機械結合係数K^2は電気からＳＡＷに変換する効率である。

帯域幅は、大雑把に下記の（１-２）式で、見積もられる事が知られている。［15］

$$f_0 / \Delta f = \pi / 4 K^2 N \qquad (1-2)$$

ここで、Δｆは3dB帯域幅、Nは電極対数である。

前述のように、水晶のように電気機械結合係数が小さく、温度係数のよい材料は狭帯域用途、$LiTaO_3$のように電気機械結合係数が大きく、温度係数の大きな材料は広帯域用途に用いられている。ダイヤモンドをＳＡＷフィルタに用いる場合も、いろいろな圧電薄膜を積層した場合に、電気機械結合係数と温度係数がどういう数値を

示すかを求めねば、実際に使用できるか否かはわからない。

本研究では、高い位相速度が期待出来るダイヤモンドが、圧電薄膜を積層していかなる材料特性を示すかについて、またそれらが成膜可能であるかについて研究を行った。

１-４.本論文の構成

本論文の構成について、概要を示す。

２章では、ZnO、AlN、$LiTaO_3$、$LiNbO_3$の圧電薄膜と温度補償用のSiO_2をダイヤモンド上に積層した場合に、電気機械結合係数、温度係数がどのような数値を取り、有益な材料系となり得るか、について検討する。また積層構造に伴う速度分散性について検討し、狭帯域デバイス用に積極的に利用できる事について述べる。

３章では、まず基板となるダイヤモンドウェハの作製について、ＳＡＷデバイスに有用なダイヤモンド材料を研究した内容について記述する。また２章で有益と見られた材料系の中からSiO_2／ZnO／ダイヤモンド構造ＳＡＷデバイスの作製について、特に圧電薄膜ZnOの成膜に焦点を当てて述べる。

４章では、得られたSiO_2／ZnO／ダイヤモンドＳＡＷデバイスの、電気機械結合係数、温度係数など基本パラメータの評価及び、驚異的な耐電力性を達成した内容について述べる。

５章では、実際にデバイスを、光通信、無線通信用の狭帯域フィルタ及び汎用の共振器として開発し、実用化した内容について述べる。

６章で、２章から５章において得られた研究成果をまとめる。

最後に、付録に２章で取り扱う理論の詳細を記述する。

１章　参考文献

［1］ 移動通信ハンドブック、　斎藤、立川編集　オーム社平成７年

［2］ O.Ishii and H.Iwama,
Int'l Symp.Acoustic Wave Devices for Future Mobile Communication Systems,
Proc., 73 (2001)

［3］ 弾性表面波素子技術ハンドブック
日本学術振興会弾性表面波素子技術150委員会編　オーム社平成３年

［4］ 弾性表面波工学
電子情報通信学会編　（株）コロナ社　昭和58年

［5］ 超音波便覧　超音波便覧編集委員会　　丸善（株）平成11年

［6］ 佐藤、伊形、宮下、松田、西原、　　電子情報通信学会大会　Ｊ76Ａ（1993）

［7］ Y.Satoh, O.Ikata, T.Miyashita, and H.Omori,
Int'l Symp.Acoustic Wave Devices for Future Mobile Communication Systems,
Proc., 125 (2001)

［8］ J.Koike, Jpn.J.Appl.Phys., 34,2678 (1995)

［9］ K. Asai, A. Isobe, T. Tada, and M. Hikita,
Proc. IEICE Spring Meeting Japan, A-378 (1995)

［10］ T. Sato and H. Abe, IEEE Ultrasonics Conference Proc., (1994)

［11］ S. Tonami, A. Nishikata, and Y. Shimizu, Jpn. J. Appl. Phys., 34,2664 (1995)

［12］ J. Koike,K. Shimoe, and H. Ieki, Jpn. J. Appl. Phys.,32,2337 (1993)

［13］ T. Kobayashi, 15th Symp. Ultrasonic and Electronics, Japan Proc., 187 (1994)

［14］ K. Yamanouchi, IEEE Ultrasonics Symposium Proc.351 (1989)

［15］ C. Campbell, Surface Acoustic Wave Devices and Their Signal Processing
Applications, Academic Press (1989)

第２章　ダイヤモンドＳＡＷ特性のシミュレーション

２-１．はじめに

ＳＡＷ材料の基本特性として最も重要なのは、伝搬速度、電気機械結合係数である。前述のとおり、伝搬速度が大きいほど素子の高周波化に有利である。一般に積層構造を伝搬するＳＡＷには速度の異なる複数のモードが存在する。電気機械結合係数は、電気信号が表面弾性波のエネルギーに変換される際の変換効率の指標であり、これが小さ過ぎると実用にならないし、特に広帯域なフィルタへの応用にはより大きな値が必要とされ、新しい材料系の検討も継続されている［1,2,3］。積層構造においては、伝搬速度や電気機械結合係数は層の厚さ（正確には波長に対する層厚の比）の関数になるため、この依存性を把握することがまず重要である。

本章では、CAMPBELL&JONESの手法を用いて、ダイヤモンドをベースとした積層ＳＡＷ材料系の各種パラメータを求めた結果について詳述する。

ここで取り上げた圧電材料として、まずZnOについては、基板を選ばずｃ軸配向することやエピタキシャル成長の良質の膜が得られる点で実現性の高さに注目した［4,5,6］。その他はAlN、$LiTaO_3$、$LiNbO_3$の３種類である。AlNは２元系で成膜が比較的容易であると考えられ、実現性も比較的高いという観点から選択した［7］。後者の$LiTaO_3$、$LiNbO_3$の２つは、３元系で成膜は難しいと思われるが［8,9］、電気機械結合係数が高いために選択した。いずれも成膜を前提に、ｃ軸配向膜を仮定した。第１章で述べた現有材料に関する電気機械結合係数と温度係数のマップを、ダイヤモンドの材料系で良好な温度係数や電気機械結合係数のバライティを有する材料系を持つ事で、カバーできれば、現在のＳＡＷ材料群が高周波で実現できることになる。

２-２．理論とシミュレーション内容

（１）理論

従来知られている水晶、$LiTaO_3$などのＳＡＷ材料はそれ自身が圧電単結晶であり、本研究で扱う圧電薄膜／ダイヤモンドの積層構造では、ＳＡＷ伝搬の取扱い理論も従来のものから積層構造対応に展開する必要がある。具体的には、積層構造ＳＡＷの基板となるダイヤモンド、圧電薄膜、温度補償膜、櫛形電極、グランド電極などを考慮する必要がある。また計算においては、上記の電極配置、膜厚、圧電薄膜の配向性を考慮する必要がある。さらに圧電薄膜が単結晶である事を想定する場合、基板のカット、伝搬方向など多くのパラメータを考慮する必要がある。

詳細は付録に記すが、理論の概要を簡単に記述する。まずＳＡＷの伝搬は６種類の構成方程式より決定される。６種類の構成方程式は２種類の圧電方程式、２種類

のマクスウェル方程式、運動方程式、及び歪みと変位の関係式からなり、これらを境界条件を満足する条件下で連立させる事により求められる。
なお境界条件は層構造の場合には、各層間で粒子変位（u）、応力（T）、電束密度の法線成分（D）、及びポテンシャル（φ）が連続であるという条件が新たに加わる。
例えば、ZnO／ダイヤモンド構造の場合、以下の条件が加わる事になる。

$$u_i^{dia} = u_i^{ZnO}, \quad T_{i3}^{dia} = T_{i3}^{ZnO}, \quad D_i^{dia} = D_i^{ZnO}, \quad \varphi^{dia} = \varphi^{ZnO} \qquad (2\text{-}1)$$

ＳＡＷ伝搬の解析に本研究では、よく知られたCAMPBELL ＆ JONES法を用いた。この手法は構成方程式の一般解として変位、及びポテンシャルを次の関数で近似する手法である。

$$u_i = A_i \exp(jkbx_3) \exp\left[jk\left(vt - x_1\right)\right] \qquad (2\text{-}2)$$

$$\varphi = A_4 \exp(jkbx_3) \exp\left[jk\left(vt - x_1\right)\right] \qquad (2\text{-}3)$$

層構造の場合、例えば、ZnO／ダイヤモンド構造を例に取ると、変位、及びポテンシャルの一般解は次式で近似して求めた。

$$u_i^{Dia} = A_i^{Dia} \exp(jkb_{Dia} x_3) \exp(jk(vt - x_1)) \qquad (2\text{-}4)$$

$$\Phi_i^{Dia} = A_i^{Dia} \exp(jkb_{Dia} x_3) \exp(jk(vt - x_1)) \qquad (2\text{-}5)$$

$$u_i^{ZnO} = A_i^{ZnO} \exp(jkb_{ZnO} x_3) \exp(jk(vt - x_1)) \qquad (2\text{-}6)$$

$$\Phi_i^{ZnO} = A_i^{ZnO} \exp(jkb_{ZnO} x_3) \exp(jk(vt - x_1)) \qquad (2\text{-}7)$$

計算の詳細については、付録に記述した。
また電気機械結合係数、温度係数などの定義も付録に記述した。

（２）シミュレーション内容

実際に計算した材料系は下記である。
（ａ）ZnO／ダイヤモンド
（ｂ）AlN／ダイヤモンド
（ｃ）$LiTaO_3$／ダイヤモンド
（ｄ）$LiNbO_3$／ダイヤモンド

計算に用いた仮定は下記である。

１）構造

圧電薄膜(001)／ダイヤモンド(001)[100]

３章で詳述するが、ｃ軸配向膜が得られやすいため、圧電薄膜(001)と設定した。ダイヤモンドについては、等方性が高く、計算ではダイヤモンド(001)[100]で代表した。

２）電極配置

ＩＤＴ／圧電薄膜／ダイヤモンドと圧電薄膜／IDT／ダイヤモンド

通常のＳＡＷから考えると前者が考えやすいが、IDTが中間にある後者の方が高い電気機械結合係数が出やすいと考え、計算を実施した。

この２つの構造を図２-１に図示しておく。

３）圧電薄膜層の厚み

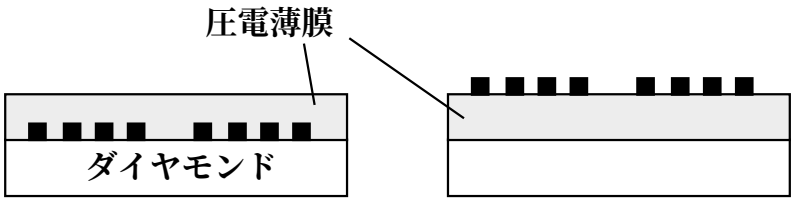
規格化された膜厚として、$kh_{圧電薄膜}$（k=2π／波長、$h_{圧電薄膜}$＝圧電薄膜層の厚み）を導入した。実際の計算は概ね　$kh_{圧電薄膜}$＝0～4とした。

４）波の種類：

レーリー波、及びその高次モード（セザワ波）

基本波を０次モードとし、高次モードを１次、２次モードまで計算した。

これらの波の関係は、例えば１次を利用する場合には、他は全てスプリアス波（不要波）となる事を考える必要がある。即ち、有望な波の選択には、利用波以外の電気機械結合係数は小さい方がよいといった事を考慮する必要がある。



（ａ）圧電薄膜／IDT／ダイヤモンド　　（ｂ）IDT／圧電薄膜／ダイヤモンド

図２-１　計算に用いた電極配置図

なお、計算に用いた材料定数を表２-１にまとめる。

表２-１.計算に用いた各種材料の物性定数

		Si	ダイヤモンド	ZnO	AlN	$LiTaO_3$	$LiNbO_3$	SiO_2
弾性定数 $\times 10^{11}$ N/m^2	C_{11}	1.66	10.8	2.10	3.45	2.298	2.030	0.785
	C_{13}	0.639	1.25	1.05	1.20	0.812	0.752	0.161
	C_{33}	1.66	10.8	2.11	3.95	2.798	2.424	0.785
	C_{44}	0.796	5.76	0.423	1.18	0.968	0.595	0.312
圧電定数 C/m^2	e_{15}	——	——	-0.48	-0.48	2.72	3.76	3.76
	e_{31}	——	——	-0.58	-0.58	-0.38	0.23	0.23
	e_{33}	——	——	1.55	1.55	1.09	1.33	1.33
比誘電率	ε_{11}	11.8	5.70	8.55	8.0	42.6	44.3	3.75
	ε_{33}	11.8	5.70	10.2	12.0	42.8	27.9	3.75
質量密度 $\times 10^3$ kg/m^3	ρ	2.33	3.51	5.67	3.26	7.45	4.64	2.21

通常、圧電材料は比較的大きな温度係数を有するが、圧電薄膜とダイヤモンドの積層構造も同様の事が予想される。温度が変化した時に周波数が変動する事はできれば避けたい現象であるため、温度係数の異なる材料を積層してキャンセルする事が考えられる。このように温度補償をして、零温度係数に近いものを求めるために、ダイヤモンド及び上記圧電材料と反対の温度係数を有するSiO_2を選択した［10,11］。まずこの計算については、ZnOと上記計算の結果高い電気機械結合係数の得られた$LiNbO_3$について実施した。即ち、計算したのは下記の２つの材料系である。

Ａ）SiO_2／ZnO／ダイヤモンド

Ｂ）SiO_2／$LiNbO_3$／ダイヤモンド

以上は圧電薄膜をスパッタリングやCVDなどで成膜でする事を念頭においている。最近のウェハ張り合わせ技術の進展を考えると［12］、単結晶圧電材料をダイヤモンドに張り合わせてそれを研磨し薄膜にして、単結晶薄膜／ダイヤモンドという構造も可能である事をがわかる。上記で魅力的材料系とわかった$LiNbO_3$に関して、単結晶$LiNbO_3$／ダイヤモンド系の場合の様々な結晶面に対して計算を行った。これについでも順次述べる。

２-３． ZnO／ダイヤモンド

２-２に述べた計算によって、ZnO／ダイヤモンド系について計算を行った[13,14]。なおこれは前述の山之内らの報告でも一部計算されている［15］。図２-２に、位相速度のkhZnO依存性の計算結果を示す。まず０次基本波と、高次モード（セザワ波）として、１次、２次、３次波が現れる。いずれも伝搬速度はkhZnOが小さくなるほど大きくなるが、これはｋｈｚｎｏが小さくなるほど、ＳＡＷの伝搬に対してダイヤモンドの寄与する度合いが大きくなるからである。なお、高次モードは、いずれもkhZnOの小さいところでは10,000m/s以上の大きな値を示していることが分かる。これらの値は従来材料の2～3倍の値である。これらの大きな伝搬速度はダイヤモンドが物質中最高の高弾性を有していることに由来する。

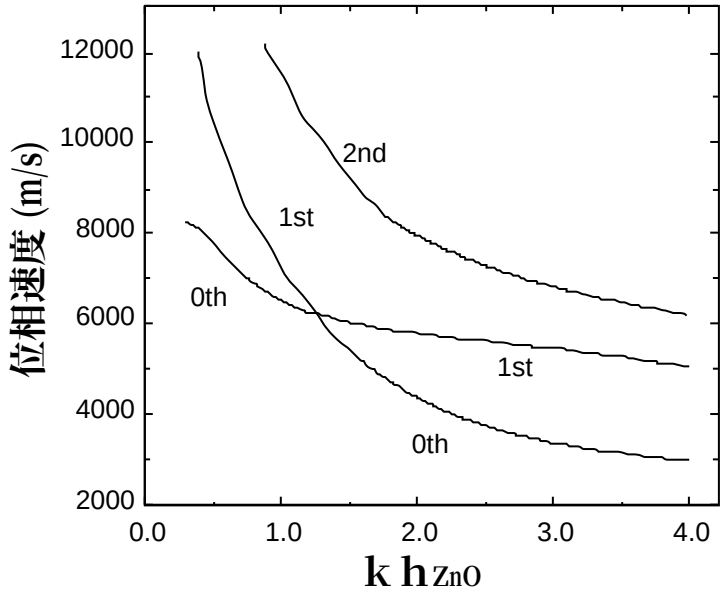
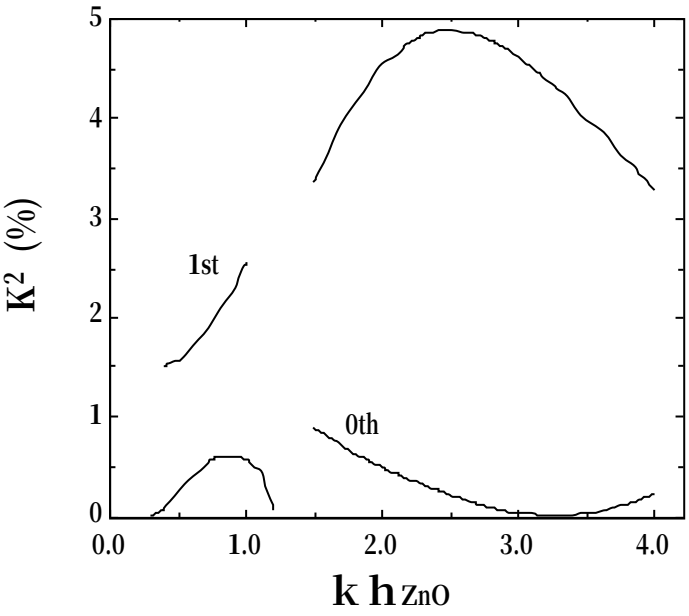


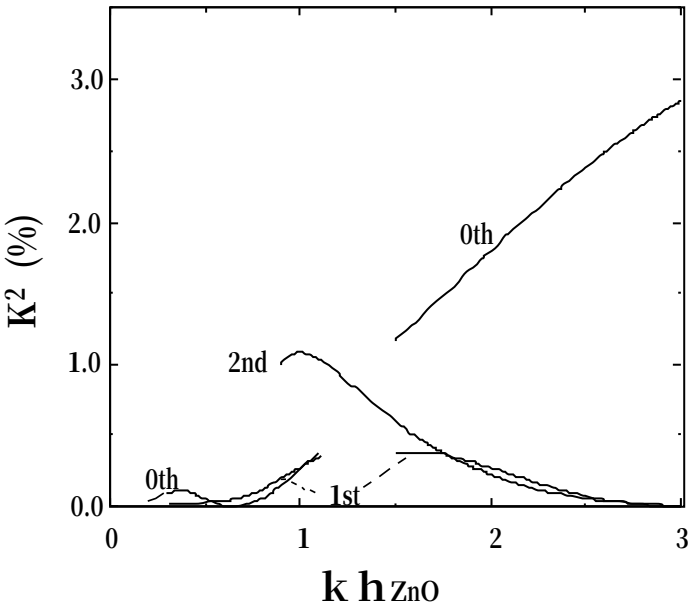
図２-２． ZnO／ダイヤモンドの位相速度の規格化ZnO膜厚依存性

次に、図２-３（ａ）にZnO／IDT／ダイヤモンドの、図２-３（ｂ）にIDT／ZnO／ダイヤモンドの２とおりの電極配置における電気機械結合係数のkhZnO依存性を示す。

まずZnO／IDT／ダイヤモンドに関しては、１次の電気機械結合係数がkhZnO =2.5付近で4.9%と高いことがわかる。ただ残念ながらここでは位相速度が5,600m/sと小さく、従来材料と比較しての優位性はない。むしろ位相速度が10,000m/s確保できるkhZnO=0.5付近で1.5%確保できるところが強みがあると考えられる。ここでは１次を利用する場合にスプリアスとなる０次の電気機械結合係数が小さいことも有利である。



（ａ）ZnO／IDT／ダイヤ



（ｂ）IDT／ZnO／ダイヤ

図２-３．ZnO／ダイヤモンドの２つの構造の電気機械結合係数の ZnO規格化膜厚依存性

次にIDT／ZnO／ダイヤモンドに関しては、khZnOの大きいところで０次の電気機械結合係数が高いが、上記と同様に位相速度でのメリットが活かせない。むしろ

kh_{ZnO}=1.0で、２次波で11,000m/sと1.1%確保できるところが魅力がある。上記と同様、今度は０次、１次の電気機械結合係数が小さくスプリアスとなりにくい特徴がある。

以上より、ZnO／ダイヤモンド系で高速度かつ高電気機械結合係数の観点から注目されるところは表２-２のようである。特にIDT／ZnO／ダイヤモンド構造の方は、ZnOの成膜も容易であることが類推され、期待される。

表２-２．注目されるZnO／ダイヤモンドＳＡＷの波と特性

構造	モード	kh_{ZnO}	位相速度 m/s	K^2 %
ZnO／IDT／ダイヤ	１次	0.5	10,000	1.5
IDT／ZnO／ダイヤ	２次	1.0	11,000	1.1

これらの波は高周波で狭～中帯域の用途に有効であると言える。なお、実際のデバイスにおいては、波の伝搬損失、スプリアス、狭帯域化など多くのことを考慮せねばならず、あくまでこれらは波の候補ということにすぎない。なお構造やモードの違いに関しては、シミュレーションでは上記パラメータ以上のことはわからないため、実際のデバイスで試作してからの選択ということになる。

２-４．SiO_2膜の積層による温度補償

以上の２-３の計算より、実験的に実現性の高いと思われるZnO／ダイヤモンド系で、10,000m/sの位相速度と比較的高い電気機械結合係数が得られることがわかった。電気機械結合係数は水晶より１桁近く高いので、零温度係数が実現できれば極めて魅力的な材料になることが推測される。本項では、ZnO／ダイヤモンド系にSiO_2を積層して温度補償した場合について検討する［16,17］。

まず始めにSiO_2を積層して温度補償できるかの目安をkh_{ZnO}を変えて計算した例を図２-４に示す。SiO_2の膜厚を増やしていくと、温度補償を行ない、零に到達し、逆転する。これはZnOの膜厚を変えても同様であり、いずれも温度補償し、１次温度係数を零にできることがわかる。当然のことながら、ZnO膜厚が大きくなると補償に要するSiO_2膜厚は大きくなる。

上記の結果を元に、実際にデバイス実現の構造として期待できるIDT／ZnO／ダイヤモンド構造について、検討をおこなった。SiO_2積層により位相速度が低下することなどを考慮し検討を行い、位相速度10,000m/sを確保できる構造の最適化を行い、kh_{ZnO}=0.8と設定した。その時の１次温度係数のSiO_2依存性を図２-５に示す。

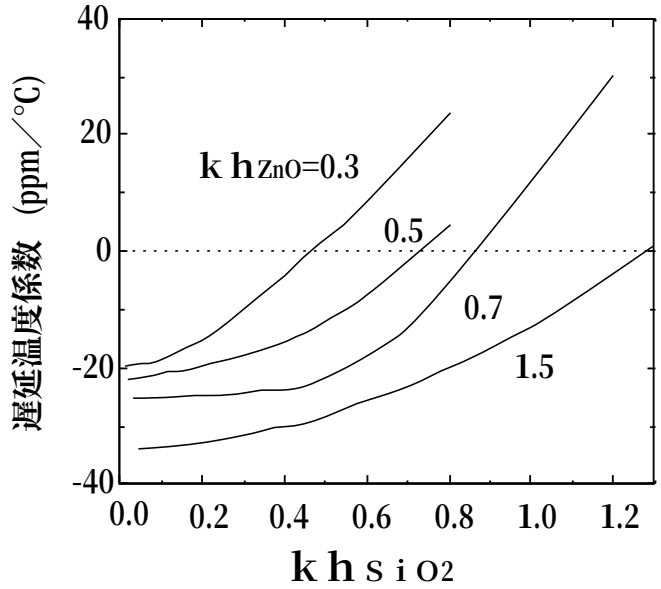


図２-４． SiO_2積層によるZnO／ダイヤモンド系ＳＡＷの温度補償
（ｋｈZnOが0.3、0.5、0.7、1.5の場合）

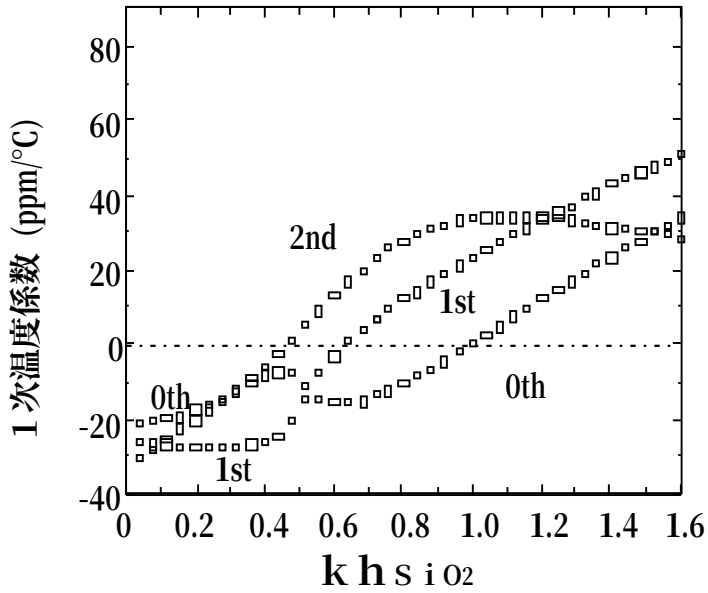
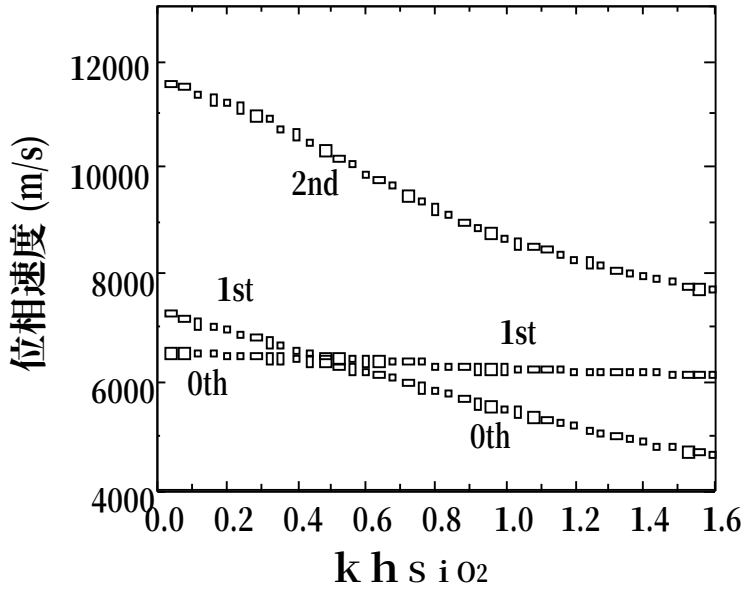


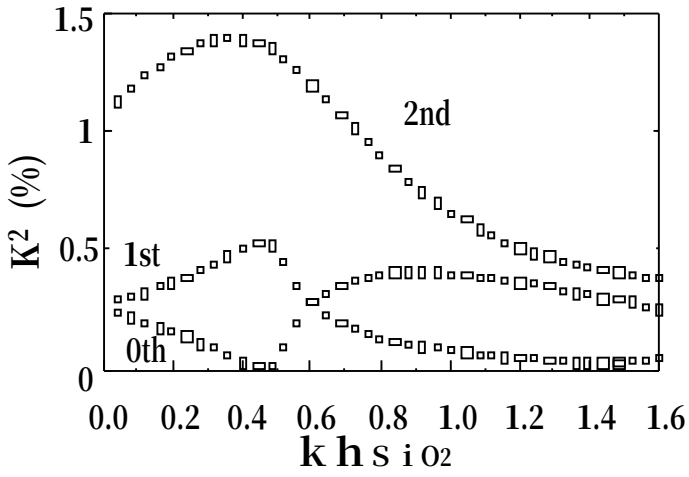
図２-５． SiO_2／ZnO／ダイヤモンド系の温度係数
（kh_{ZnO}=0.8）

また、位相速度、電気機械結合係数のSiO_2依存性を図２-６に示す。

２次モードでの温度補償が最も薄膜で実現しkh_{SiO_2}=0.48で１次温度係数=0となる。この時、位相速度は1,000m/s以上も低下するが、依然10,400m/sの高速を保つ。また電気機械結合係数は1.4%が期待できることがわかる。表２-３に注目されるSiO_2／ZnO／ダイヤモンド構造のＳＡＷパラメータを示す。



（a）位相速度



（b）電気機械結合係数

図２-６． SiO_2／ZnO／ダイヤモンド系の位相速度と電気機械結合係数

（kh_{ZnO}=0.8）

以上により、SiO_2／IDT／ZnO／ダイヤモンド構造は、パラメータとしては高周波、零温度係数で、かつ水晶よりはるかに高い電気機械結合係数を有し、狭帯域高周波ＳＡＷ材料用として期待できることがわかった。いわば水晶の高周波版ということが期待される。

表２-３． 注目されるSiO_2／ZnO／ダイヤモンド構造ＳＡＷの波と特性

構造	モード	kh_{ZnO}	kh_{SiO_2}	位相速度 m/s	K^2%	温度係数 ppm/℃
SiO_2／IDT／ZnO／ダイヤ	２次	0.8	0.48	10,400	1.4	0

２-５.その他材料系の計算

このようにSiO_2／ZnO／ダイヤモンド系が狭帯域用に極めて有効とわかった。ここではそれ以外の材料の可能性として、AlN、$LiTaO_3$、$LiNbO_3$の３種類のｃ軸配向膜をダイヤモンド上に配置した材料系を検討した結果について述べる［18,19,20］。ここで計算上のことであるが、$LiTaO_3$、$LiNbO_3$は点郡3mの結晶であるが、多結晶のｃ軸配向膜として考えると異方性が１つなくなり、弾性定数テンソルの一つc_{14}と圧電定数テンソルの一つe_{22}をいずれも零とおくことができ、AlNと同じ点郡6mmの結晶と同等の扱いになる。特に広帯域用に適する高い電気機械結合係数の探索に注目して計算を進めた。後述のように$LiNbO_3$／ダイヤモンド系が高い位相速度と高い電気機械結合係数を同時に示す、高周波広帯域向きの素晴らしい材料系であることがわかったので、SiO_2積層による温度補償を行ったSiO_2／$LiNbO_3$／ダイヤモンド系、そしてさらに高い電気機械結合係数を目指して単結晶$LiNbO_3$／ダイヤモンド系についての検討も行った。

（１）AlN／ダイヤモンド

図２-７に伝搬速度のkh_{AlN}依存性の計算結果を示す。この系もZnOと同様に、積層構造特有の多くの高次モードが現れ、いずれも10,000m/s以上の大きな値を示していることが分かる。０次モード波も10,000m/sを越しておりAlNの高速度が寄与していると考えられる。２次波に至ってはkh_{AlN}の大きいところでも10,000m/sを越している。

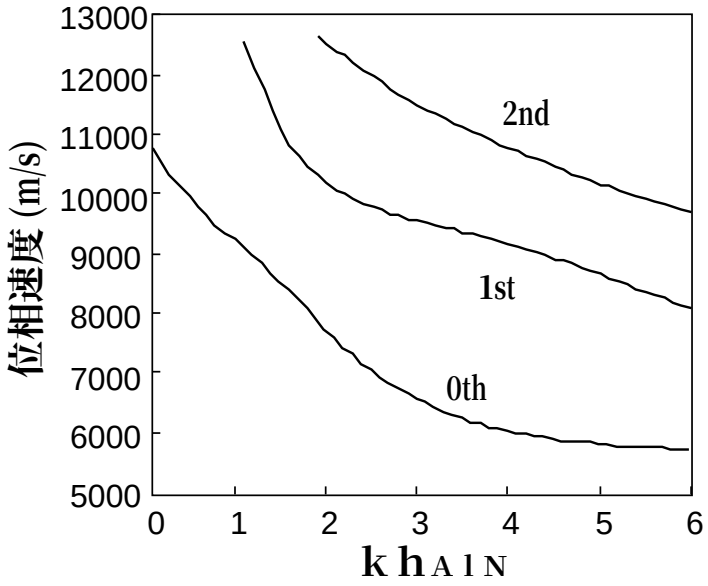
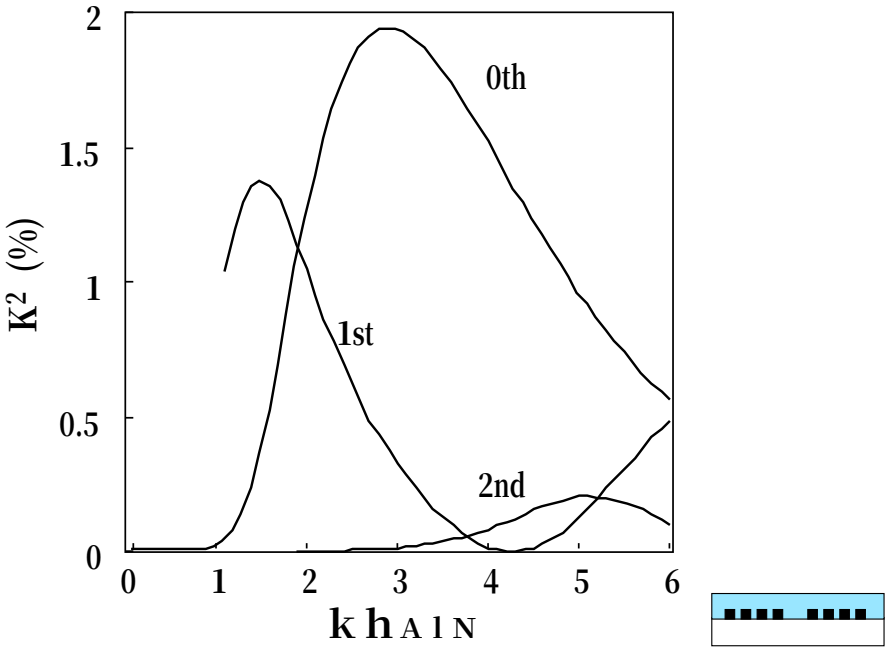
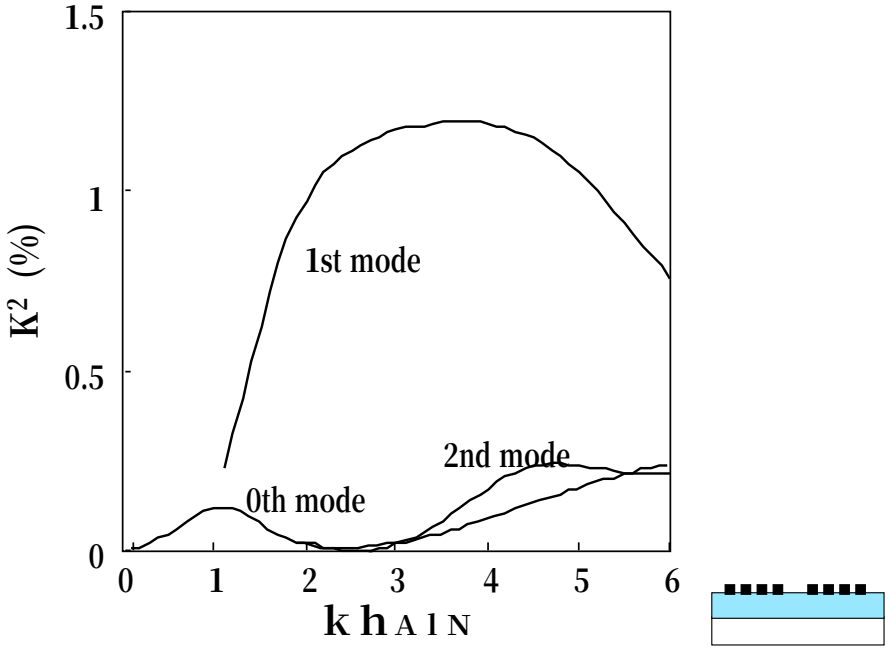


図２-７． AlN／ダイヤモンド系の位相速度のAlN規格化膜厚依存性

次に図２-８（ａ）にAlN／IDT／ダイヤモンド構造、（ｂ）にIDT／AlN／ダイヤモンド構造の２通りの電極配置における、電気機械結合係数のkhAlN依存性を示す。



（ａ）AlN／IDT／ダイヤ



（ｂ）IDT／AlN／ダイヤ

図２-８．AlN／ダイヤモンド系の電気機械結合係数のAlN規格化膜厚依存性

AlN／IDT／ダイヤモンド構造のケースでは、０次モードと１次モードが１～２%の比較的大きな電気機械結合係数を示す領域がある。これに対し、IDT／AlN／ダイヤモンド構造では１%以上の値を示すのは１次モードのみである。図２-７の伝播速度の結果と合わせて検討すると、高速度かつ高結合係数の観点から注目されるところは表２-４のようである。

表２-４.注目されるAlN／ダイヤモンドＳＡＷの波と特性

構造	モード	kh_{AlN}	位相速度 m/s	K^2 %
AlN／IDT／ダイヤ	０次	2.8	6,700	1.95
AlN／IDT／ダイヤ	１次	1.5	11,100	1.4
IDT／AlN／ダイヤ	１次	3.5	9,400	1.2

以上より、AlN系もZnO系と同様、高周波で狭～中帯域の用途に有効であると言える。

ただ、ｃ軸配向AlN成膜がZnO成膜ほど容易ではないことを考えると、この程度の電気機械結合係数では、ZnOに比べて大きなメリットはないと考えられる。

（２）$LiNbO_3$／ダイヤモンド

次にK^2の大きな材料として知られる$LiNbO_3$を積層した場合について検討した。図２-９に位相速度のkh_{LNO}依存性を示す。この場合もやはり高次モードが現れるが、いずれも10,000m/s以上の大きな値を示すことが確認された。

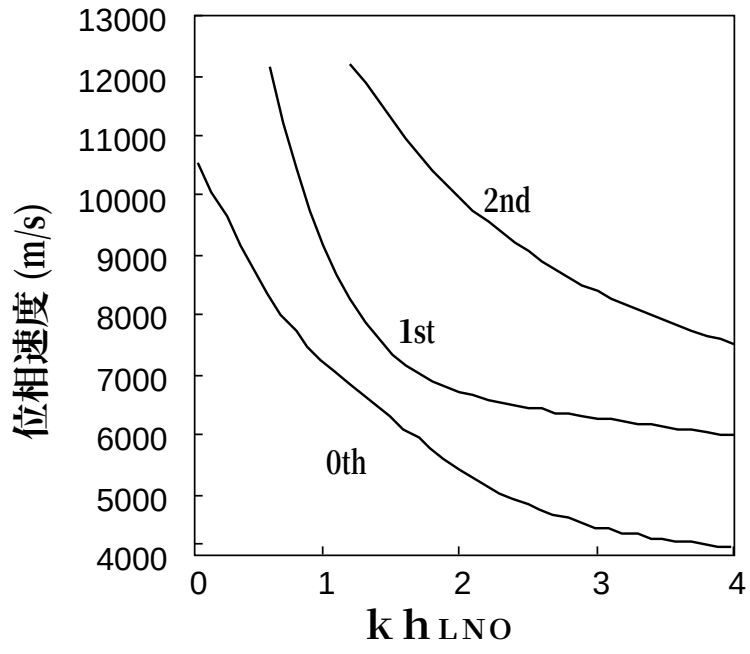
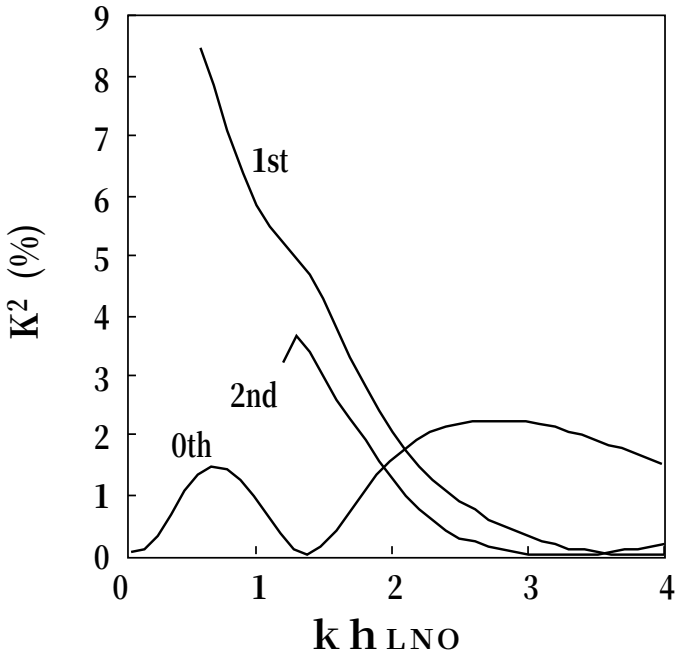
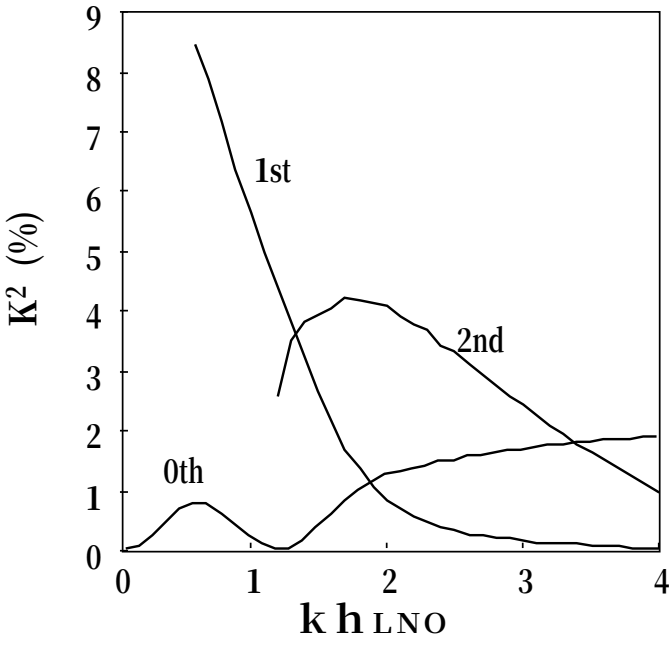


図２-９． $LiNbO_3$／ダイヤモンド系の位相速度の$LiNbO_3$規格化膜厚依存性

また、伝搬速度はkh_{LNO}が小さくなるほど大きくなるという傾向も前記のZnO、AlNのケースと同様である。次に、図２-１０（ａ）に$LiNbO_3$／IDT／ダイヤモンド、（ｂ）にはIDT／$LiNbO_3$／ダイヤモンドの２通りの電極配置における、電気機械結合係数のkh_{LNO}依存性を示す。



（ａ）$LiNbO_3$／IDT／ダイヤ



（ｂ）IDT／$LiNbO_3$／ダイヤ

図２-１０．　$LiNbO_3$／ダイヤモンド系の２つの構造の電気機械結合係数の$LiNbO_3$規格化膜厚依存性

両方のケース共、１次モードに着目すると8.5%にも及ぶ大きな電気機械結合係数を有することがわかる。また他のモードでも1～4%の実用レベルの値を有している。図２-９の位相速度の結果と合わせて検討すると、１次モードの高い電気機械結合係数のところで、位相速度も高いという、２つの特性を同時に満足させることが可能であり、kh_{LNO}=0.6付近において、伝搬速度12,100m/sかつK^2=8.5%という従来に例を見ない優れた特性を有することが分かった。ZnOやAlN系ではこれらがトレードオフの関係にあったことを考えると、幸運な材料系であり、これは高周波で広帯域な用途に極めて有望な波であると言える。

表２-４に注目される$LiNbO_3$／ダイヤモンド系ＳＡＷの波を記載する。$LiNbO_3$／IDT／ダイヤモンドもIDT／$LiNbO_3$／ダイヤモンドと同様のパラメータを有するが、実用上意味がないので割愛した。

表２-４.注目される$LiNbO_3$／ダイヤモンドＳＡＷの波と特性

構造	モード	kh_{LNO}	位相速度 m/s	K^2 %
IDT／$LiNbO_3$／ダイヤ	１次	0.6	12,100	8.5

（３）$LiTaO_3$／ダイヤモンド

図２-１１に位相速度のkh_{LTO}依存性を示す。この場合もやはり多くの高次モードが現れるが、いずれも10,000m/s以上の大きな値を示すことが確認された。また、伝搬速度はkh_{LTO}が小さくなるほど大きくなるという傾向も前記の材料系と同様である。

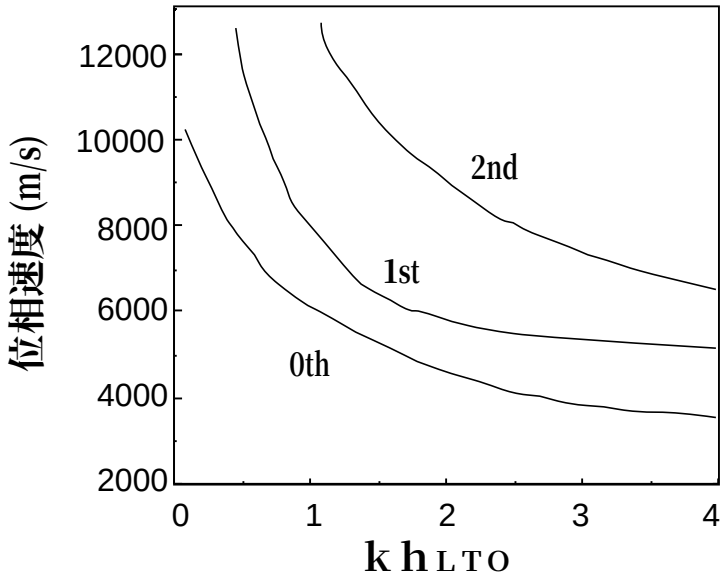


図２-１１． $LiTaO_3$／ダイヤモンド系の位相速度の$LiTaO_3$規格化膜厚依存性

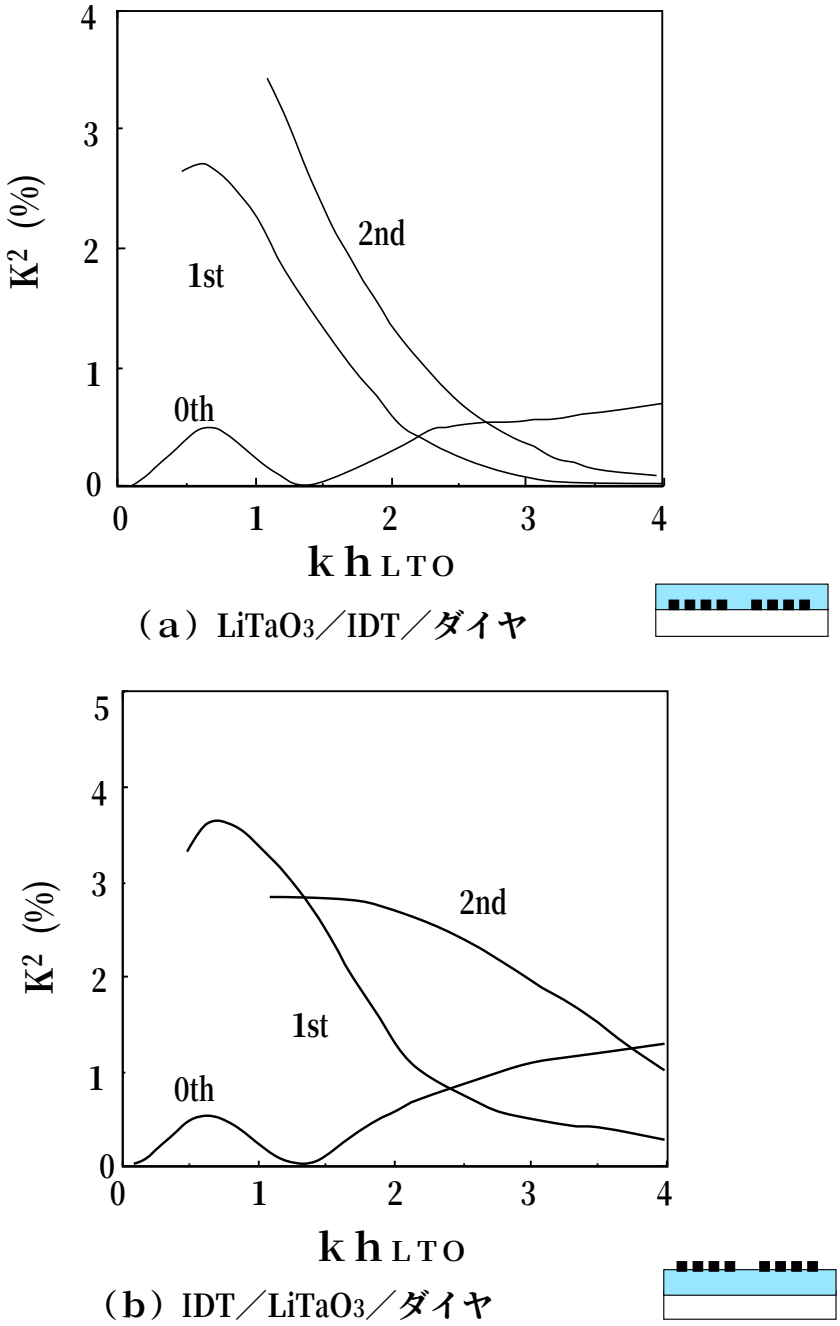


図２-１２．　LiTaO3／ダイヤモンド系の２つの構造の電気機械結合係数の LiTaO3規格化膜厚依存性

次に、図２-１２（ａ）にLiTaO3／IDT／ダイヤモンド、（ｂ）にはIDT／LiTaO3／ダイヤモンドの２通りの電極配置における、電気機械結合係数のkhLTO依存性を示す。LiTaO3／IDT／ダイヤモンドでは、最高値として１次で２.７％、２次で３.５％を示す。各々位相速度が10,400m/sと12,200m/sであるので、高速度、高電気機械結合係数と言える。IDT／LiTaO3／ダイヤモンドでは、位相速度10,000m/sのところで、１次モードが3.7%を示す。この材料系も高周波で広帯域な用途に有望な波であると言える。

ただ、（２）で見た$LiNbO_3$／ダイヤモンド系が素晴らしいＳＡＷのパラメータを示すため、見劣りする。表２-５に注目される波の特性を記す。

表２-５.注目される$LiTaO_3$／ダイヤモンドＳＡＷの波と特性

構造	モード	kh_{LTO}	位相速度 m/s	K^2　%
$LiTaO_3$／IDT／ダイヤ	１次	0.6	10,400	2.7
$LiTaO_3$／IDT／ダイヤ	２次	1.1	12,200	3.5
IDT／$LiTaO_3$／ダイヤ	１次	0.7	10,000	3.7

（４）SiO_2／$LiNbO_3$／ダイヤモンド

以上（１）から（３）で検討したように、この中で$LiNbO_3$／ダイヤモンド系は、位相速度12,100m/sと電気機械結合係数 8.5%を有し、高周波広帯域材料として有効であることがわかった。しかしこの構造は、数十ppm／°Cの温度特性を有するものである。RFフィルタなどの用途には、一般的にはこれで問題ないが、広帯域といえども厳しい温度特性が要求される事もある。ここではZnOの計算と同様、SiO_2をさらに積層する事によって、温度特性をキャンセルしたSiO_2／$LiNbO_3$／ダイヤモンド構造についてシミュレーションを実施した。計算は$LiNbO_3$のkh_{LNO}を0.4、0.6、0.8、1.0について実施し、SiO_2層のkh_{SiO_2}は0～1.6で変化させた計算をおこなった。

図２-１３に、その中で最も位相速度が高く、電気機械結合係数も高いkh_{LNO}=0.4の時の温度係数を示す。

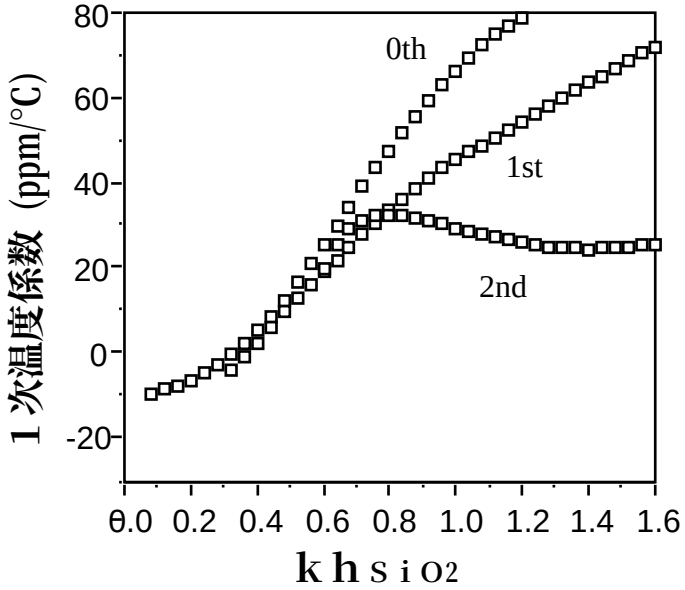
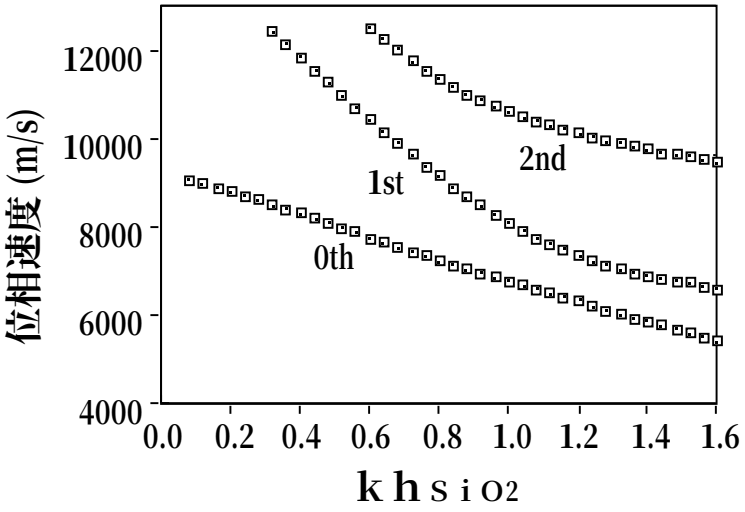
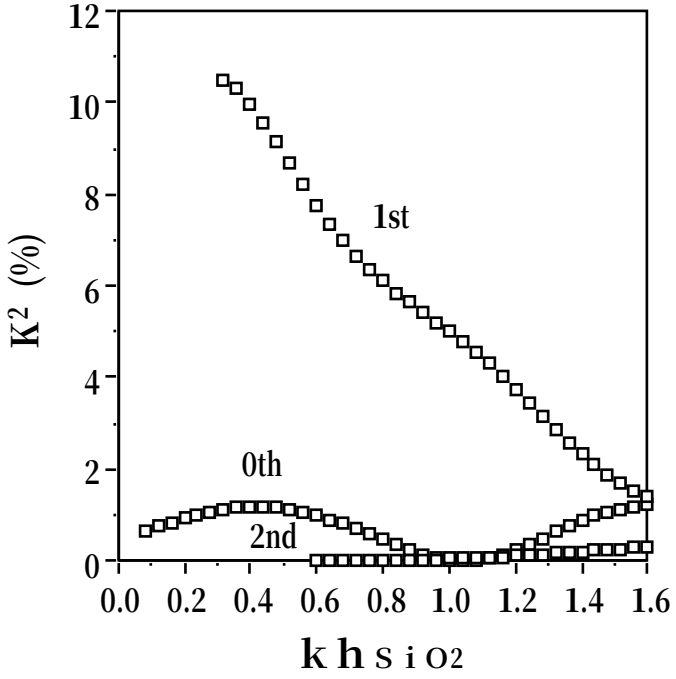


図２-１３．　SiO_2／$LiNbO_3$／ダイヤモンドの温度係数のSiO_2膜厚依存性（kh_{LNO}=0.4）



（a）位相速度



（b）電気機械結合係数

図２-１４． SiO_2／IDT／$LiNbO_3$／ダイヤモンド系
の位相速度と電気機械結合係数 （kh_{LNO}=0.4の場合）

またその時の位相速度と電気機械結合係数を、図２-１４に示す。

広帯域用途を念頭に、温度係数を-10～10ppm/℃で考えると総合的に、高速度かつ高結合係数かつ低温度係数の観点から表２-６のところが最も注目される。

表２-６．注目されるSiO_2／$LiNbO_3$／ダイヤモンド構造のＳＡＷの波と特性

構造	モード	kh_{LNO}	khs_{SiO_2}	位相速度 m/s	K^2%	温度係数 ppm/℃
SiO_2／IDT／$LiNbO_3$／ダイヤ	１次	0.4	0.3～0.5	11,000～12,500	8.5～10.1	-10～10

このなかでも、さらに零温度係数を持つ条件を、表２-７に示す。この構造においては伝播速度、電気機械結合係数、零温度係数の極めて優れたオールマイテイの特性が可能であることが判明した。

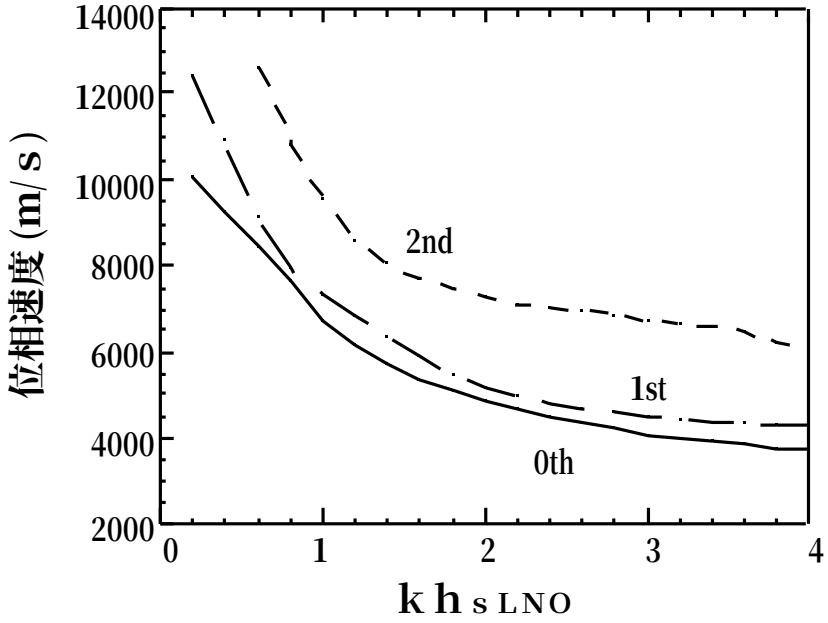
表２-７．零温度係数を有するSiO_2／$LiNbO_3$／ダイヤモンド構造のＳＡＷの波と特性

構造	モード	kh_{LNO}	khs_{SiO_2}	位相速度 m/s	K^2%	温度係数 ppm/℃
SiO_2／IDT／$LiNbO_3$／ダイヤ	１次	0.4	0.37	12,100	10.1	0

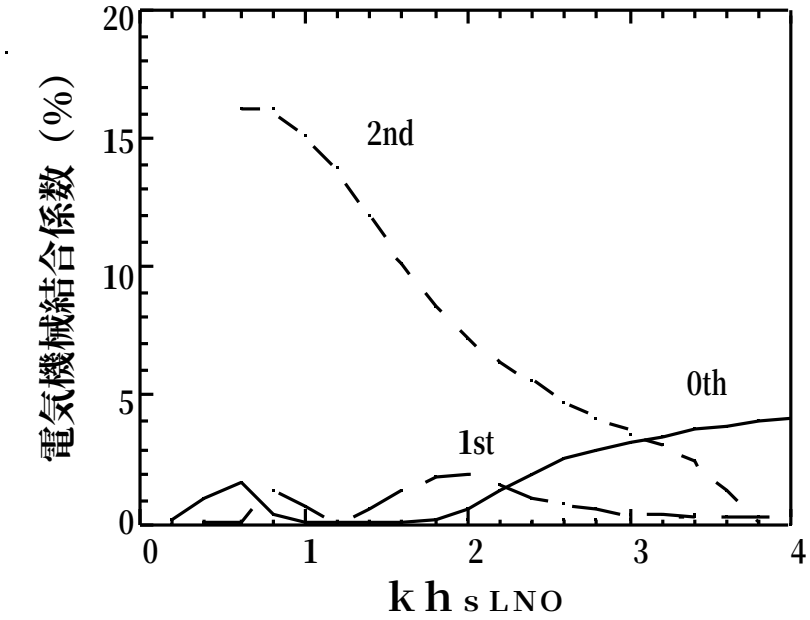
（５）単結晶$LiNbO_3$／ダイヤモンド

これまで見たように、ｃ軸配向の$LiNbO_3$をダイヤモンド上に成膜できれば、高周波で広帯域用の材料系が得られることがわかった。$LiNbO_3$をｃ軸配向でなく、単結晶であれば、さらに大きな電気機械結合係数が得られることは容易に推測できる。現実には単結晶をダイヤモンドと張り合わせて、さらに研磨する必要があり、実現は難しいと思われるが、最近の張り合わせ技術のＳＡＷにおける例を見ていると、将来実現する可能性もある。そこで、ここではこれまでの検討の延長として、シミュレーションを実施した。ここではグランド（GRと略記）電極の入った構造も考え、IDT／単結晶$LiNbO_3$／ダイヤモンド構造とIDT／単結晶$LiNbO_3$／GR／ダイヤモンドについて検討した。

単結晶の場合、ｃ軸配向と違いカットする結晶の角度で異なるため、膨大な計算が必要になる。　単結晶$LiNbO_3$の規格化膜厚khs_{LNO}は0～4、オイラー角φ、θ、ψを10度きざみで計算し、予め電気機械結合係数の高い条件を求めた。それがIDT／単結晶$LiNbO_3$／GR／ダイヤモンド構造のφ=30°、θ=80°、ψ=60°であり、その位相速度と電気機械結合係数を図２-１５に示す。２次モード波は12,000m/sレベルの高い位相速度を示し、また15%を越す驚異的に大きな電気機械結合係数を有することがわかる。



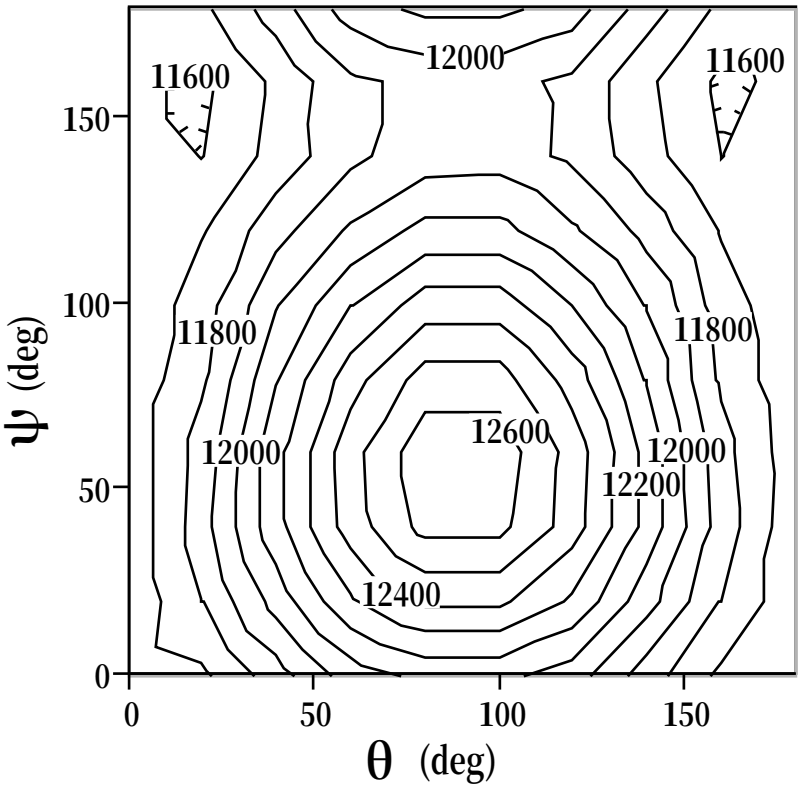
（a）位相速度



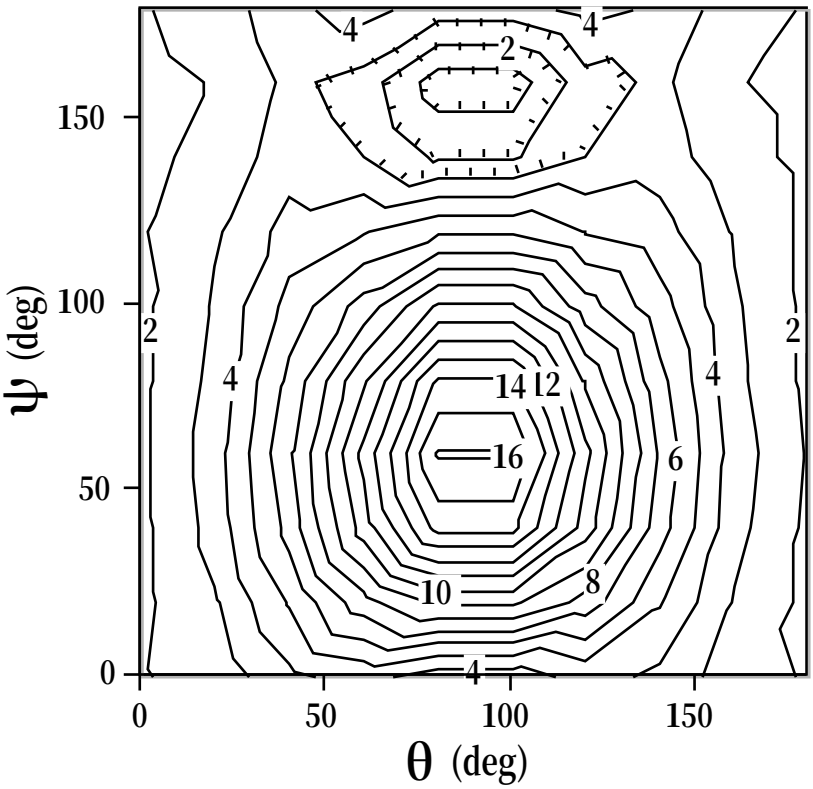
（b）電気機械結合係数

図２-１５.単結晶$LiNbO_3$／ダイヤモンド系の位相速度と電気機械結合係数
（φ=30°，θ=80°，ψ=60°）

図２-１６には、kh_{sLNO}=0.6で、φ=30の時の様子を詳細に検討し、θ-ψのマップとしたものを示す。



（ａ）位相速度 （図中数値の単位はm/s）



（ｂ）電気機械結合係数 （図中数値の単位は%）

図２-１６.IDT／単結晶$LiNbO_3$／GR／ダイヤモンド構造の
位相速度と電気機械結合係数のθ-ψのマップ（kh_{sLNO}=0.6、φ=30°）

位相速度はθ=90°、ψ=50°付近で最大の12,650m/sという高速を示し、またθ、ψが多少変化しても変わらないことがわかる。電気機械結合係数に関しては、θ=90°、ψ=55°付近で最大の16%になり、これも位相速度同様θ、ψが多少変化しても変わらないことがわかる。要するに、これらは同時に満足できるということを示している。ここでさらに、温度係数について計算した結果の同様のマップを図２-１７に示す。これから温度係数θ=85°付近、ψ=30°～60°の広いところで最小の20ppm／度となることがわかる。奇しくも上記と同様のオイラー角である。$LiNbO_3$単体では温度係数は70ppm／度程度であるので、ダイヤモンドとの積層で大きく改善される。

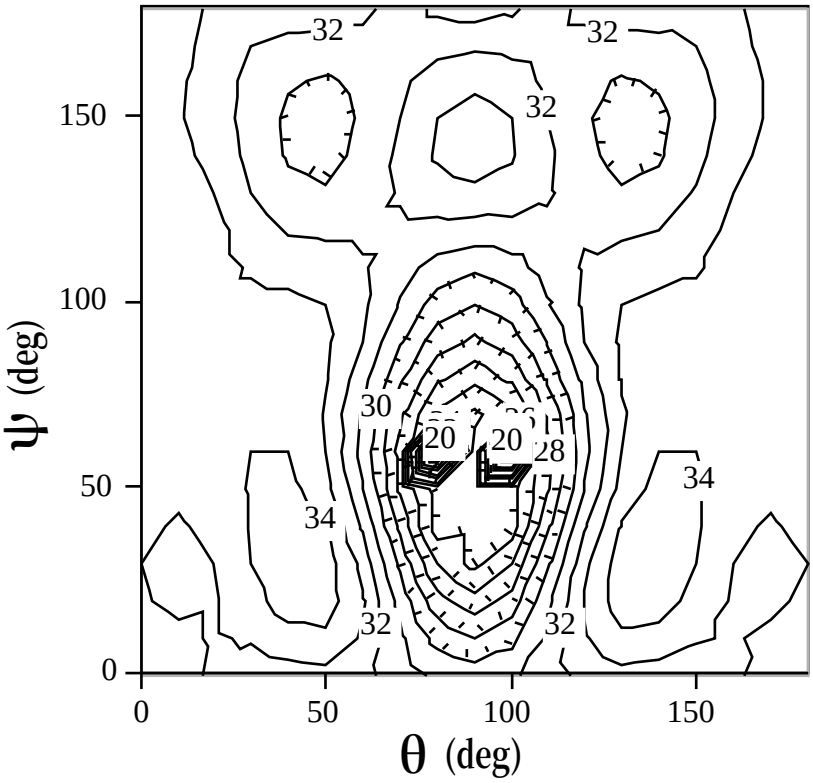


図２-１７.IDT／単結晶$LiNbO_3$／GR／ダイヤモンド構造の
温度係数（℃／deg）のθ-ψのマップ（kh_{sLNO}=0.6、φ=30°）

以上を表２-８にまとめる。位相速度はもちろんのこと、電気機械結合係数も類を見ない大きな値を示し、広い帯域用途では充分な20ppm／度の温度特性を有する本材料系は、高周波広帯域用途に大変有望である。
なお、張り合わせでこの材料系を実現するには、グランド電極に相当する金属膜を$LiNbO_3$とダイヤモンドの間に挿入する形になる。

表２-８． 単結晶$LiNbO_3$／ダイヤモンド構造のＳＡＷの波と特性

構造	モード	k_h LNO	オイラー角	位相速度 m/s	K^2%	温度係数 ppm/℃
IDT／単結晶$LiNbO_3$／GR／ダイヤ	２次	0.6	θ=90° ψ=60° φ=30° の付近	12,600	16	20

表２-９.ダイヤモンドＳＡＷ材料系と従来材料の比較

	カット・方向	位相速度 m/s	K^2 %	温度特性 ppm / deg	波
IDT/ZnO/diamond		11600	1.2	22	Sezawa
SiO_2/IDT/ZnO/diamond		10400	1.4	0	Sezawa
IDT/c-$LiNbO_3$/diamond		11890	9.0	25	Sezawa
SiO_2/ IDT/ c-$LiNbO_3$/diamond		12100	10.1	0	Sezawa
IDT/$LiNbO_3$/diamond		12600	16.0	25	Sezawa
IDT/$LiNbO_3$/GR/diamond		12300	10.0	30	Sezawa
Quartz	28 ~ 42YX	3158	0.14	0	Rayleigh
	-7.5YX	3948	0.11	0	Leaky
	36Y-Z	5088	0.11	0	SH
$LiTaO_3$	X-112Y	3287	0.64	18	Rayleigh
	36Y-X	4160	7.6	35	Leaky
		6300	2.2		2nd Leaky
$LiNbO_3$	128Y-X	3992	5.5	72	Rayleigh
	Y-Z	3488	4.8	94	Rayleigh
	64Y-X	4742	11	80	Leaky
		7400	12.3		2nd Leaky
$Li_2B_4O_7$	45X-Z	3440	1.0	0	Rayleigh
	45X-90Z	4915	0.14	50	BG
ZnO/glass		2360	1.9	25	Rayleigh
ZnO/sapphire		5500	4.5	43	Rayleigh

２-６． 材料系の比較検討

以上、ダイヤモンド上にZnO、AlN、$LiNbO_3$、$LiTaO_3$など圧電材料と温度補償膜であるSiO_2を積層した場合のＳＡＷデバイスのパラメータを求めてきた。ここで以上の材料系全体を比較検討する。これまで検討したダイヤモンド系ＳＡＷ材料を従来材料と比較したものを表２-９に示す。
また位相速度と電気機械結合係数でプロットしたものを図２-１８に示す。

図２-１８より、ダイヤモンドの特徴とも言うべき位相速度については、いずれの材料系においても10,000m/s以上の位相速度を有し、従来の材料系を大きく凌駕する事がわかった。即ちダイヤモンドの高速性を利用しようとする本研究の目的は、どの圧電材料との組み合わせにても、達することが出来るということがわかった。

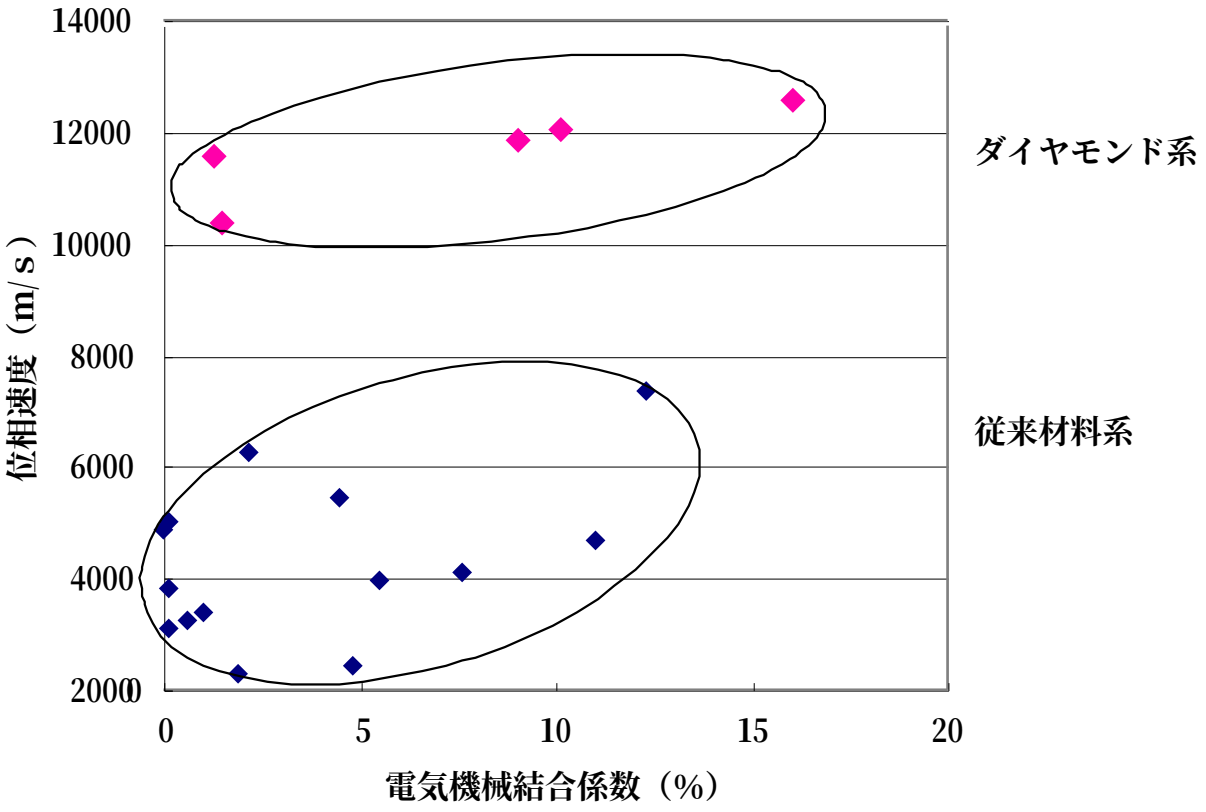


図２-１８.ダイヤモンドＳＡＷ材料系と従来材料の比較図
位相速度と電気機械結合係数

電気機械結合係数と温度係数でプロットしたものを図２-１９に示す。

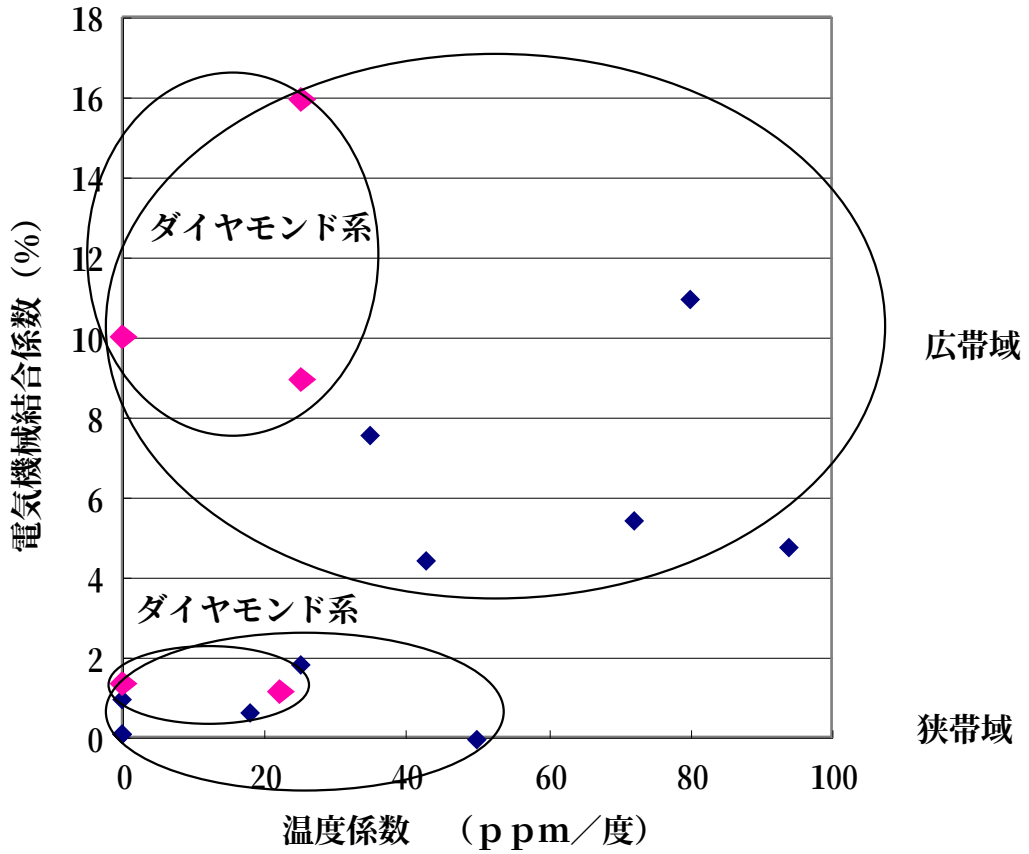


図２-１９.ダイヤモンドＳＡＷ材料系と従来材料の比較図
電気機械結合係数と温度係数

次に帯域幅であるが、１章に述べたように狭帯域用には温度係数の小さなものが適し、一方広帯域用には電気機械結合係数の大きな材料が適する。よって図２-１９及び表２-９より、従来水晶を用いている狭帯域用材料系の高周波版としては、SiO_2／IDT／ZnO／ダイヤモンドが期待されることがわかる。なおこの材料系は電気機械結合係数が水晶より１桁近く、その面でも大きく期待される。
また広帯域用の高周波化としては、$LiNbO_3$、$LiTaO_3$積層系が適しており、とくにSiO_2を積層したSiO_2／IDT／$LiNbO_3$／ダイヤモンドは温度特性もよい。

以上より、狭帯域用と広帯域用に適する代表的な構造とパラメータは下記の通りである。

○狭帯域用

SiO_2／IDT／ZnO／ダイヤモンド

波	セザワ波　２次モード
kh_{ZnO}=0.8	
kh_{SiO_2}=0.48	
位相速度	10,400m/s
電気機械結合係数	1.4%
１次温度係数	0ppm／度

○広帯域用

SiO_2／IDT／$LiNbO_3$／ダイヤモンド

波	セザワ波　１次モード
kh_{LNO}=0.4	
kh_{SiO_2}=0.37	
位相速度	12,100m/s
電気機械結合係数	10.1%
１次温度係数	0ppm／度

なお単結晶$LiNbO_3$／ダイヤモンドについても検討し、下記が驚異的な電気機械結合係数を有することがわかった。

IDT／単結晶$LiNbO_3$／ダイヤモンド

波	セザワ波　２次モード
オイラー角	θ=90、ψ=60、φ=30の付近
kh_{LNO}=0.6	
位相速度	12,600m/s
電気機械結合係数	16%
１次温度係数	20ppm／度

２-７．層構造ＳＡＷの速度分散性

ダイヤモンドＳＡＷの特徴は前述のように弾性表面波の高速度にある。しかし層構造ＳＡＷであるため、ダイヤモンドと圧電薄膜、及び温度補償膜など異なる材料の位相速度の差に起因して、速度分散性が発生する。ここでは実際にデバイス特性がどういう影響を受けるかを、述べる。

まずＳＡＷデバイスはフーリエ変換デバイスであるため、周波数応答関数は、

図２-２０に示すような入力関数H1（ｆ）と出力関数H2（ｆ）を用いて、次式で表される。

$$H(f) = V_{OUT} / V_{IN} = H_1(f) * H_2(f) \exp(-jkx_n) \qquad (2-8)$$

ここで　$k = 2\pi / \lambda = 2\pi f / V$である。

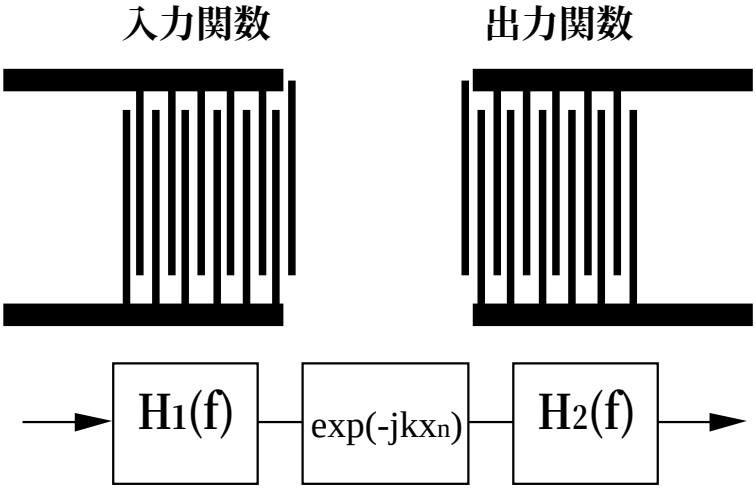


図２-２０.ＳＡＷデバイスの伝達関数モデル

デルタ関数モデル［21］で表すと、出力側の交番の＋-極性を入れて、

$$H(f) = \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} (-1)^n A_n \exp(-j k x_n) \qquad (2-9)$$

と表わせる。Anはn番目での電極重なりに比例する表面波励振強さ（全部かさなっている場合が1、全く重なりがない場合が0）、Nは電極数である。

通常の場合、速度分散性がなく、$k = 2\pi f / V_0$であるので、

$Xn = n\lambda / 2$　を入れて下記のようになる。

$$H(f) = \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} A_n \cos\left[\frac{\pi n (f - f_0)}{f_0}\right] \qquad (2-10)$$

これがデルタ関数モデルによる、一般の周波数応答関数である。

　次にダイヤモンド系ＳＡＷのように速度分散性がある場合について考える。即ち、Ｖが周波数の関数になるので、

$$k = \frac{2\pi f}{V(f)} \qquad (2-11)$$

を入れて変形すると、

$$H(f) = \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} A_n \cos\left[\frac{\pi n hf}{V(hf)h}\lambda - n\pi\right] \qquad (2\text{-}12)$$

と表される。
本研究のダイヤモンド系では、常にこれを元に考える必要がある［22,23］。

次に、速度計測について検討する。
フィルタ特性から求める方法に二つがある。周波数領域測定および時間領域測定である。まず周波数領域測定から位相速度を求める場合、上記理由によりフィルタの中心周波数においては、そのまま（２-８）式で位相速度が求められるが、中心周波数以外は速度分散性を有するため、位相速度を直接求めることはできない。
時間領域測定は、ＳＡＷの群速度が求める測定であり、通常の単結晶材料の場合位相速度は群速度に一致するのでそのまま求められる。しかしダイヤモンドＳＡＷデバイスでは、上記速度分散性を有するために、そのまま計算する事はできない。速度分散性がある場合は、群速度V_gは下記の式の関係にある。

$$Vg = d\omega/dk = dkVp/dk = Vp + dVp/dk = Vp + kh\ dVp/dhk \qquad (2\text{-}13)$$

ZnO／ダイヤモンドＳＡＷ構造の場合について、群速度を求めた結果を図２-２１に示す。計算と理論値がよく一致している。実際のフィルタに必要であるのは位相速度であり、これは実際的意味は持たないが、速度測定にはこれらを考慮する必要がある。以上のように、ダイヤモンドＳＡＷデバイスのように積層構造の場合は、速度を求めるのは数学的に複雑であり、計測時には充分注意を払う必要がある。

なお、実際にZnO／ダイヤモンド系の速度分散性が帯域幅に及ぼす影響について共同研究者が帯域幅を計算した結果を図２-２２に示す［23］。横軸は規格化膜厚で$k = 2\pi / \lambda$、h_{ZnO}はＺｎＯの膜厚である。これから例えば１次モードで規格化ＺｎＯ膜厚kh_{ZnO}が0.5の時、３０％程度狭帯域化する事がわかる。
こういった現象をデバイス設計に活かすと、より狭帯域、つまり高いＱ値のデバイスが得られる事がわかる。これを積極的に利用する事により、高Ｑ値の共振器の設計に積極的に利用する事が出来る。これは層構造の利点とも言える。

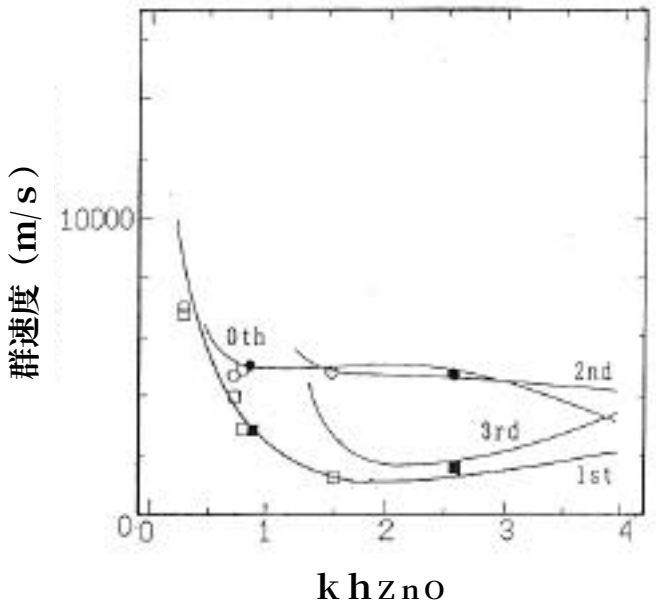


図２-２１　速度分散性が群速度に与える影響

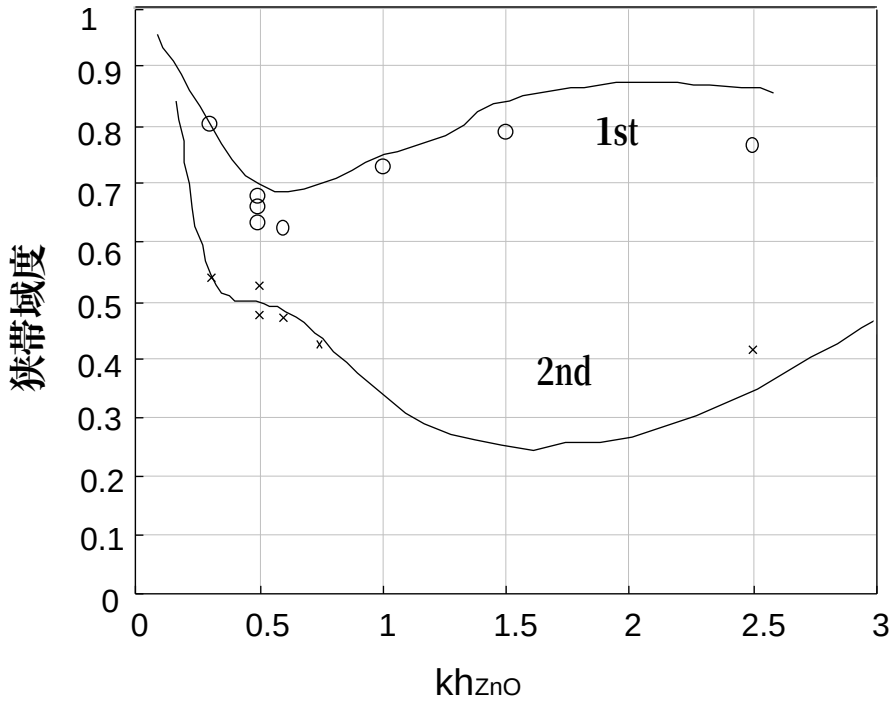


図２-２２．　ＺｎＯ／ダイヤモンド系の速度分散性に起因する狭帯域度
（実線は計算値、○△×は計測値）

２-８．まとめ

以上、本章では第２章で述べた理論に基ずき、圧電薄膜／ダイヤモンド系ＳＡＷの特性をシミュレーションにより求めた。
基板を選ばずｃ軸配向するZnOの利用という観点と、広くその他の圧電材料としてAlN、$LiTaO_3$、$LiNbO_3$を検討した。その結果、下記が明らかになった。

１）位相速度はどの圧電薄膜を用いても10,000m/s以上を確保出来、予想通り
ダイヤモンドを基板に用いたＳＡＷ材料は、高周波化に適する。

２）温度係数及び電気機械結合係数から総合的に判断して、下記材料系が適する。
○狭帯域用
SiO_2／IDT／ZnO／ダイヤモンド
セザワ波　２次モード
位相速度 10,400m/s　電気機械結合係数 1.4%　１次温度係数 0ppm／度
○広帯域用
SiO_2／IDT／$LiNbO_3$／ダイヤモンド
セザワ波　１次モード
位相速度 12,100m/s　電気機械結合係数 10.1%　１次温度係数 0ppm／度
IDT／単結晶$LiNbO_3$／ダイヤモンド
セザワ波　２次モード
オイラー角　　θ=90、ψ=60、φ=30の付近
位相速度 12,600m/s　電気機械結合係数 16%　１次温度係数 20ppm／度

またダイヤモンドＳＡＷでは、位相速度の低い圧電薄膜と高いダイヤモンドを積層するために、速度分散性を持つ。これが帯域に及ぼす影響と群速度に及ぼす影響について検討した。速度分散性の効果は帯域を狭くする方向に働き、狭帯域デバイスの場合には、積極的に設計に利用できる事を見いだした。

以下の章では、本章で検討した結果を元に、ａ）ZnOが一般に基板を選ばず成膜すること、ｂ）狭帯域は、高付加価値ＳＡＷデバイスの用途が多いこと　の２つの理由により、ZnOを圧電薄膜とし、SiO_2を温度補償膜とした材料系を実際に試作していく。

２章　参考文献

［1］ 弾性表面波素子技術ハンドブック
日本学術振興会弾性表面波素子技術150委員会編　オーム社平成３年

［2］S.Tonami, A.Noshitaka and Y.Shimizu, Jpn.J.Appl.Phys.,34,2664 (1995)

［3］Y.Kobayashi, Y.Hirao,K.Takeuchi,T.Usuki,K.Shibata, and Y.Shimizu,
Jpn.J.Appl.Phys.,34,1309 (1995)

［4］M.Kadota, C.Kondo, T.Ieki and T.Kasanami, Jpn.J.Appl.Phys., 29, 159 (1990)

［5］J.Koike, K.Shimoe, and H.Ieki, Jpn.J.Appl.Phys., 32,5B,2337(1993)

［6］H.B.Kang, K.Nakamura, K.Yoshida and K.Ishikawa,
Jpn.J.Appl.Phys., 36, L933 (1997)

［7］S.Kaneko, M.Tanaka, K.Masu, K.Tsubouchi and N.Mikoshiba,
J.Cryst.Growth, 115. 643 (1991)

［8］T.Nishida, R.Ibrahim, T.Horiuchi, T.Shiosaki and K.Matsushige,
Jpn.J.Appl. Phys., 36,6077 (1997)

［9］Y.Shibata,K.Kaya, and K.Akashi, Appl.Phys.Lett.,61,1000 (1992)

［10］T.E.Parker and H.Wichansky, J.Appl.Phys., 50, 1360　(1979)

［11］K.Yamanouchi, H.Sato, T.Meguro, and Y.Wagatsuma,
IEEE Trans.Ultrason. Ferro. Freq.Contr., 42, 392 (1995)

［12］K.Eda, Y.Topmita, M.Sugimoto, A.Namba, T.Ogura, Y.Taguchi and O.Kawasaki,
IEEE Ultrasonics, Proc. SU-22, 227 (1997)

［13］S. Shikata, H. Nakahata, A. Hachigo, and N. Fujimori,
Diamond and Related Materials, 2, 1197 (1993)

［14］H. Nakahata, A. Hachigo, K. Higaki, S. Fujii, A. Hachigo, S. Shikata,
and N. Fujimori,
IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 42, 362 (1995)

［15］K. Yamanouchi, IEEE Ultrasonics Symposium Proceeding p351 (1989)

［16］S.Shikata, H.Nakahata, K.Higaki, S.Fujii, A.Hachigo, H.Kitabayashi, Y.Seki,
K.Tanabe and N.Fujimori,
3rd Int'l Conf. Appl. of Diamond Films and Related Materials, Proc, 21 (1995)

［17］H. Nakahata, H. Kitabayashi, T. Uemura, A. Hachigo, K. Higaki, S. Fujii,Y. Seki,
K. Yoshida and S. Shikata, Jpn. J. Appl. Phys., 37, 2918 (1998)

［18］S.Shikata, H.Nakahata and A.Hachigo,
New Diamond and Frontier Carbon Technology,9, 75 (1999)

［19］ S.Shikata, H.Nakahata and A.Hachigo,
IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Freq. Control., received Sept.25. 2003
［20］ S.Shikata, A,Hachigo, H.Nakahata, and M.Narita,
IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Freq. Control., received Oct.31.2003
［21］ R.H.Tancrell and M.G.Holland,
Proc.IEEE,59,393 (1971)
［22］ H. Nakahata, K. Higaki, A. Hachigo, S. Shikata, N. Fujimori, Y.Takahashi,
T. Kajiwara and Y. Yamamoto,
Jpn. J. Appl. Phys., 33, 324 (1994)
［23］ A.Hachigo, D.C.Malocha, and S.M.Richie,
IEEE Ultrasonics Conf. 371(1995)

第３章　ダイヤモンドＳＡＷデバイスの作製

３-１．はじめに

第２章でシミュレーションにより、高周波ダイヤモンドＳＡＷデバイスの、狭帯域及び広帯域に適する材料系を提案した。本研究ではその中から、比較的カスタム性が強く、コスト的にも高級な用途が多い狭帯域用に対して実際に検討を進めた。本章では、実際にSiO_2／IDT／ZnO／ダイヤモンド構造を作製するための、ウェハなどの材料及びプロセスについて検討した内容について、特に、デバイス特性を左右する技術の開発過程について述べる。

まずダイヤモンドについては、ウェハ形状のダイヤモンドを作る事そのものに難しさがある。これに関して、実用化を考えて採用したフィラメントＣＶＤ法を用いた合成法とその結果について述べる。そして実際にＳＡＷデバイスを試作しながら、ダイヤモンドのＳＡＷ材料としての性能向上を目指した内容について記す。

次に３-３では、圧電薄膜としてＳＡＷデバイスの特性を決めるZnO薄膜を、RFマグネトロンスパッタリングによって成膜を検討した結果について記す。挿入損失低減のためにｃ軸配向性を向上させる事と、異常成長領域を減らすために、成膜条件とプロセスを検討した結果について記す。

最後に、３-４にＳＡＷデバイスを作製するための一連のウェハプロセス及び実装プロセスにおいて、特にダイヤモンドＳＡＷ特有の問題があり新たに開発した内容を述べる。特にＳＡＷデバイス特性に影響を及ぼす線幅制御について、反応性イオンエッチングを用いたアルミ系電極のエッチングに関して詳述する。

３-２．ダイヤモンド／Ｓｉウェハの合成と研磨

（１）合成及び研磨方法の検討

ダイヤモンドはm3mの立方晶で、表３-１に示すような弾性定数を有し、等方性の高い材料である。

表３-１．ダイヤモンドの弾性定数　（$\times 10^{11}$N／m^2）

10.76	1.250	1.250	0	0	0
1.250	10.76	1.250	0	0	0
1.250	1.250	10.76	0	0	0
0	0	0	5.758	0	0
0	0	0	0	5.758	0
0	0	0	0	0	5.758

ダイヤモンドの結晶方位に注目すると、ホモエピタキシャル成長による単結晶膜、ヘテロエピタキシャル膜或いは高配向膜、そして多結晶膜に分類される。本研究においては

ａ）等方性の高い材料である事

ｂ）大型基板への合成が可能な事

ｃ）応力が少なく、低価格合成可能な事

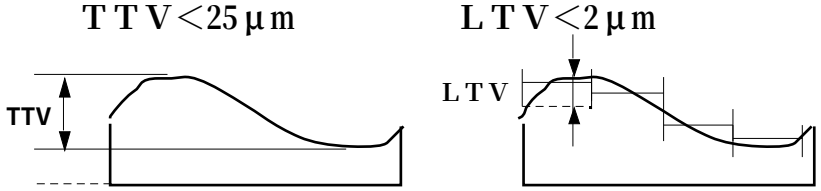
という３点の理由と多結晶膜でも良質の膜が得られることがわかっていたこと［1,2］から、多結晶膜ダイヤモンドによる合成のみを検討した。一方、ダイヤモンドの気相合成法は、マイクロ波ＣＶＤ法［3,4,5］、フィラメントＣＶＤに代表される熱ＣＶＤ法［6,7］、ＤＣプラズマ及びＤＣプラズマジェット法［8,9,10］、ＲＦプラズマ法［11,12］など多岐に渡る。原料もガスからアルコールなどの有機材料まで使用されていて、Ｃ－Ｈ－Ｏ元素のダイアグラム上で統一的な解釈がなされ、ダイヤモンドの生成可能な領域がわかっており、成長速度の比較がなされている［13,14］。これらの手法の中で高速成膜に関してはＤＣ及びＲＦプラズマ法が最も高く数10～100μｍ／ｈクラスであるが膜質などの点で劣る他基板の反りも大きい。その次にマイクロ波やフィラメントＣＶＤ法が1～数μｍ／ｈの成長速度を有するが、大型基板への合成を考えると圧倒的にフィラメントＣＶＤ法が有利であり、本研究において採用することとした。多結晶膜合成において、通常は核形成の過程では結晶の方向はランダムであり、成長した多結晶膜は様々な方向を向いた結晶粒の集合体となる。成長が進むにつれて、次第に成長速度の最も大きい結晶方位を膜の成長方向に向けた結晶が生き残るかたちで支配的になり、合体した後は成長方向のみに配向した柱状の結晶からなる多結晶膜となる。なお、ダイヤモンドの成長速度が結晶面により異なり、結晶面間の成長速度比は合成条件により変化するので、合成温度・原料ガス組成などを精密に制御することにより、基板面に垂直な方向に<111>、<100>、<110>が優先的に向いたようなＣＶＤ膜を、ある程度形成できるようになってきている。［15］

まず始めにウェハに必要な特性について検討した。ＳＡＷデバイスの深さ方向のエネルギー分布を考えると、90%以上が表面から１波長の深さに集中するので、ダイヤモンドの厚みは概ね4波長で充分である。例えば10,000m/sの位相速度で2.5GHzの場合、波長は4μｍとなり、4波長では約16μｍとなり、ダイヤモンド基板は薄膜で済む。また半導体のように不純物制御の必要もない。必要特性を列挙すると次のようになる。

A）高位相速度
B）低伝播損失
C）高抵抗
D）機械的な低欠陥
E）低いウェハのそり

特性面で必要であるのは、A）～C）の３点である。ダイヤモンド合成だけの観点から見ると、制御すべきものが少なく、一見極めて簡単である。しかしながら、半導体と同様のプロセスで微細電極加工を行う必要があるため、D）E）が必須である。表３-２にダイヤモンドウェハとしての必要特性を示す。高位相速度と低伝播損失については、言うまでもなくデバイスを作製して得られるものであり、ここからは省いてある。　なおＳＡＷウェハとして音速を非破壊で検査したいところであるが、現在の超音波測定法（Ｖ（ｚ）法［16］や超音波パルス干渉法［17］など）では、下地のシリコンの影響なくダイヤモンドＳＡＷウェハの音速を評価する事は、現状ではできない。

表３-２.ダイヤモンドウェハに必要な特性

項目	特性
ウェハサイズ	２、３及び４インチ
ウェハ厚さ	300μm ～ 1000μm
ウェハそり	ＴＴＶ＜25μm　ＬＴＶ＜2μm 
ダイヤ厚さ	周波数に依存（概ね20μm以上）
欠陥密度	＜ $10cm^{-2}$
表面粗さ	＜5nm
抵抗	＞ 10^6 Ωcm

ここで重要項目としてTTV（Total Thickness Variation）とLTV（Local Thickness Variation）がある。これは実際のデバイスプロセスにおいてステッパによる露光の際問題にされる指標であり、表３-２の中の図に示すようにステッパによる露光ショット内のフォーカス内に納めるために必須となる。
また欠陥に関しては、ＳＡＷ用ウェハ技術は、ヒートシンク、TAB（Tape Automated

Bonding）ツールなど従来のダイヤモンド応用製品に比べると、２～３桁以下にする必要があり、難易度は非常に高い。

次に合成について述べる。まず基板としてはダイヤモンドの高温合成に耐え、フラットネスに優れ表面仕上げのよい、通常のＳｉウェハ(100)を用いた。核発生にはダイヤモンド砥粒によるスクラッチ処理を実施した。ＣＶＤとしては良質のダイヤモンドが得られるという観点ではマイクロ波ＣＶＤ法、高速成膜という観点ではアークジェットＣＶＤ法や、フィラメントＣＶＤ法などが考えられるが、本研究では技術蓄積もあり、また多数枚可能で量産展開が容易なフィラメントＣＶＤ法を採用することにした［18］。用いたダイヤモンドの合成条件を表３-３に示す。流量は用いる装置によって変えた。

表３-３.ダイヤモンド合成条件

項目	条件
フィラメント	Wフィラメント　2100～2150℃
フィラメント基板間距離	7～9mm
原料ガス	CH_4　（１～３％）流量　30~90SCCM
希釈ガス	H_2　　流量　約3SLM
圧力	70～100Ｔｏｒｒ
基板温度	750～900℃

前述のヒートシンク、TABツールなどと大きく異なる点は、ダイヤモンドウェハの反りの発生を抑止するため、通常のダイヤモンド合成に較べて基板温度を均一にする事が重要であるということである。そのために、下記２つを実施した。

１）フィラメント温度を一定に保つための投入電力のＰＩＤ制御
２）排気系のコンダクタンス設計

まず投入電力のＰＩＤ制御について述べる。フィラメントＣＶＤ法の特徴として、時間が経つに従い、Wが炭化し、抵抗が変化するという問題がある。基板温度を一定に保つためには、電力制御、即ち、熱量コントロールにより制御するのが望ましく、ＰＩＤ制御を施した。その結果図３-１に示すようにＰＩＤ制御を実施したことで、それまでの5℃以内から1℃以内に制御する事が可能となった。

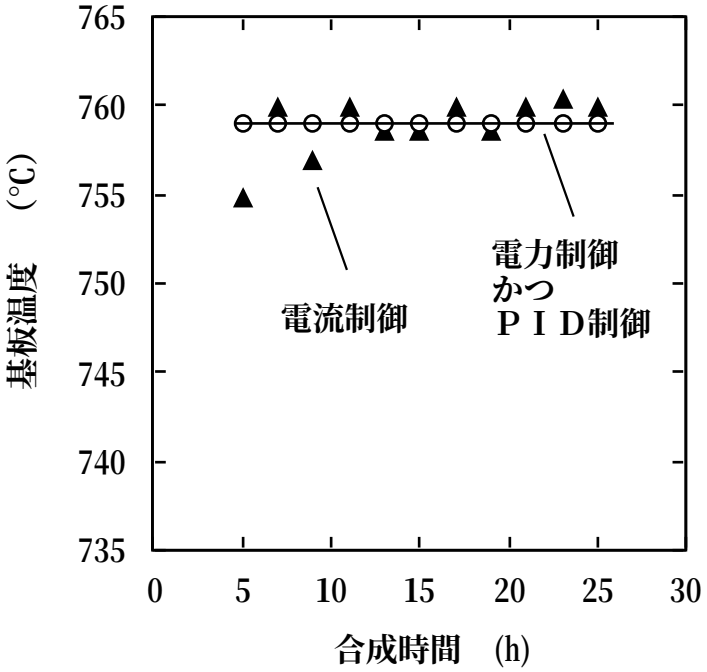


図３-１． ＰＩＤ制御による基板温度の経時安定化

また排気系については、複数ウェハを囲むようにした排気系配管のコンダクタンスを考えて、排気オリフィス径を場所に応じて変えた。即ちオリフィスのチャンバ側と排気側の圧力差は

$$\Delta P = Qi / Ci \quad (i=1 \sim n) \qquad (3\text{-}1)$$

である。ここで流量Qは流路長Lに反比例し、コンダクタンスCはオリフィス径r^2に比例する。図３-２に示すように、排気系に8箇所のオリフィスを設けて、コンダクタンスの計算を行い、オリフィス径を求めた。その結果は併せて図中に示した。これにより基板の端部間で20℃の温度差のあったものが8℃内に収まる事を確認した。

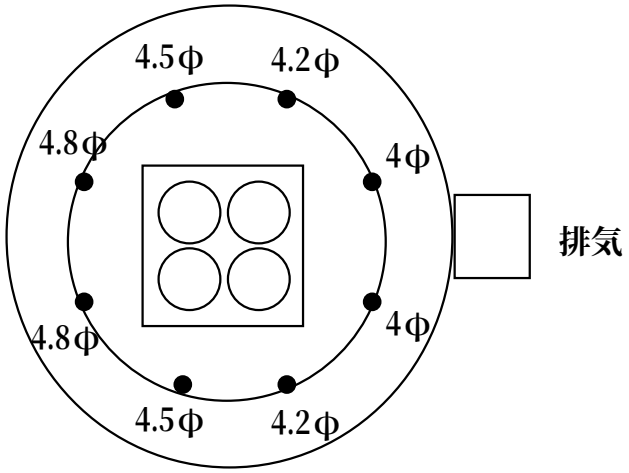


図３-２． ＣＶＤ装置内の排気系配管コンダクタンス調整

以上の２つにより、ウェハのそり量TTVを半分以下の20μm±10μmに収める事ができるようになった。

次に研磨であるが、ダイヤモンド砥石を用いた乾式研磨法を用いた。ＳＡＷデバイス実現には、1μmから0.5μm幅で、厚みが30～50nmの薄膜配線を歩留よく加工することが不可欠であり、ハーフミクロン以下の表面欠陥密度を徹底的に低減する必要がある。このため研磨は、粗研磨工程とファイン研磨工程に分けた。ハーフミクロン以下の欠陥密度は50個／cm^2程度以下になると、ＳＥＭなどにより直接観察する事は極めて困難になるので、レーザー欠陥検査器により欠陥のサイズと個数を検出する必要がある。その例を図３-３に示すが、ダストバックグランドを含んで6個／cm^2のデバイス加工可能レベルの良好な結果を得た。

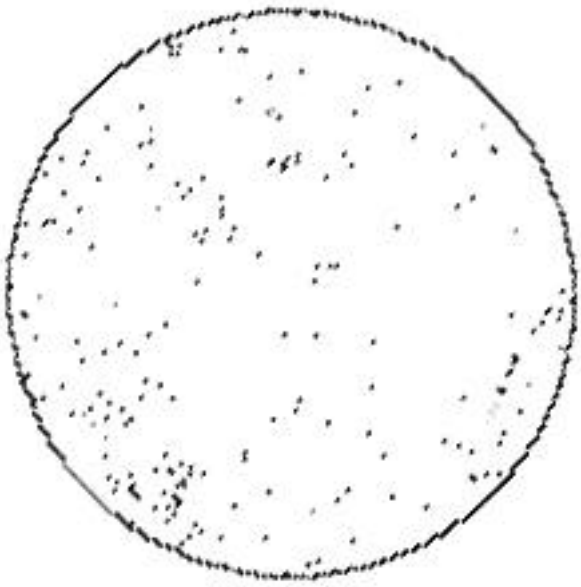


図３-３．研磨後のウェハ欠陥
欠陥数　6 cm^{-1}（500nm レベルの欠陥　ダスト (< 1 cm^{-1})を含む）

次に図３-４にウェハ表面のAFM（Atomic Force Microscope ）像の例を示す。ＲＭＳで数nm以下の極めて良好な表面粗さに仕上がっていることを確認した。

以上により得られたダイヤモンドウェハの写真を図３-５に示す。２及び３インチのサイズで、表３-２に示した必要特性は全て満足したウェハが得られた［19］。厚さは500から800μmであるが、必要に応じて裏面研削する事により、パッケージの高さに合わせる事が可能である。

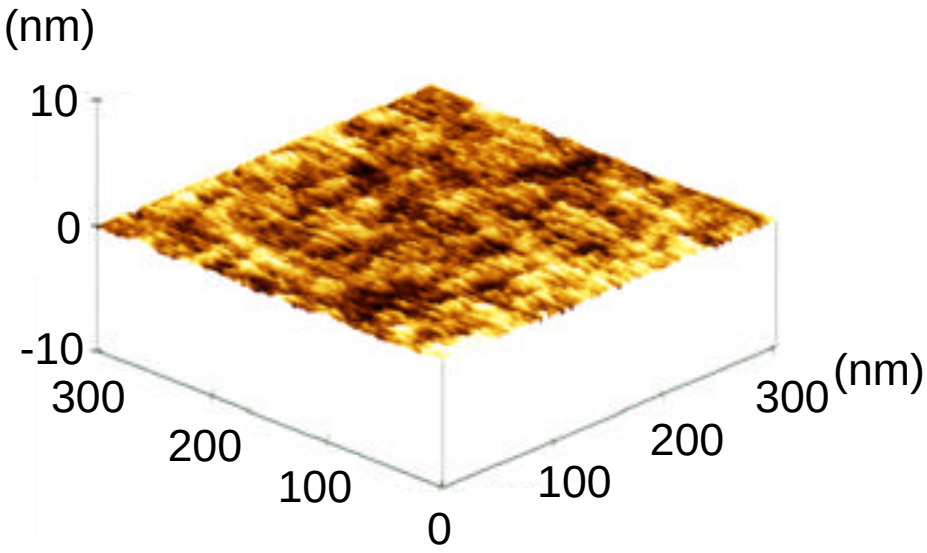


図３-４．ダイヤモンドウェハ表面のＡＦＭ像

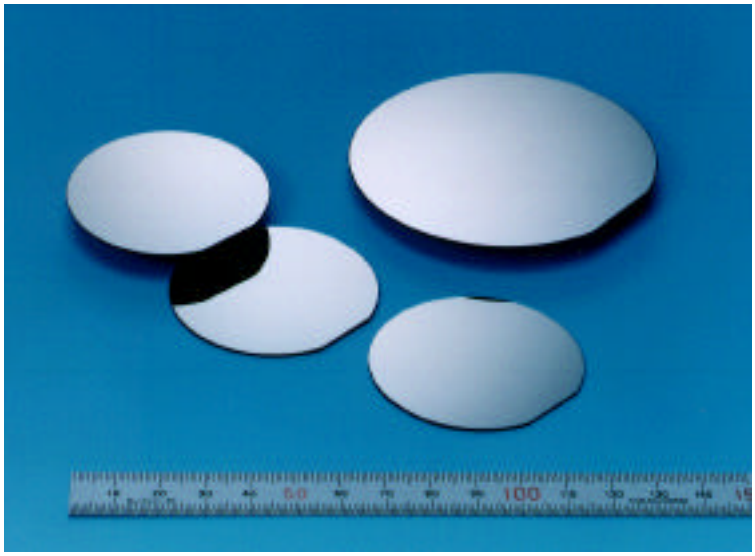


図３-５．２及び３インチφのダイヤモンドウェハの外観写真

（２）ダイヤモンドウェハの伝搬損失低減

以上、そりなどの形状や、表面欠陥に関する課題は解決してダイヤモンドウェハを得る事ができたが、ＳＡＷデバイスとして肝腎の伝搬損失については、前述のようにデバイスを作製して評価し、それをフィードバックする事で取り組んだ。そのためのプロセスや評価については後に詳述するが、ここではダイヤモンドに関する事について、述べる。

ところでＳＡＷデバイスの挿入損失は、下記の式のように分解することが出来る。

挿入損失＝双方向損失＋抵抗損失＋伝搬損失＋ミスマッチ損失＋α（誘電損失等）　（３-２）

双方向損失は、入力電力はＳＡＷに変換された後、IDTの左右から出力するので、半分損失となる。実際にはこれを反射器で拾うなどして設計で損失を低減するようにする。抵抗損失は電力を変換するIDTのところで発生するもので後に詳述する。伝搬損失は結晶粒界、表面粗さなどの材料や、IDTの段差に起因するものである。ミスマッチ損失は入出力側とのインピーダンスミスマッチングによるもので設計及び外部回路で低減させる。以上が損失の殆どである。その他誘電損失等もあるが、影響は小さい。この中でダイヤモンドの影響は、伝搬損失に表れる。この伝搬損失特性とダイヤモンドの材料物性の関連性を調べるために用いた手法が、Ｘ線回折とラマン分光である。一般的にダイヤモンド膜の評価方法は、Ｘ線・電子線回折法、電子線エネルギー損失分光法（EELS）、赤外分光法、カソードルミネッセンス法、ラマン分光法などが実施されている。Ｘ線回折は結晶性評価には不可欠である以外に、ラマン分光法は　・非破壊非接触測定　・その場観察　・高分解能測定(～1μｍ)　・非晶質の評価が可能という多くの優れた特徴を有することから、ダイヤモンド膜の重要な評価手法の一つとして確立している。　本研究でのラマン測定は、光検出にはCCDを用い、励起レーザとしてAr（波長457.92nm、パワー250mW）を用いた波数の分解能は0.3cm^{-1}であった。装置は大阪大学工学部（中島教授）のものを借用した。データはローレンツ曲線のフィッティングを行い、FWHM及びピーク値、積分値を算出した。

デバイスの伝搬損失は、ＳＡＷのテストデバイスを作り櫛形電極の間隔を５０λ、１００λ、１５０λと変えて挿入損失を測定し、その傾きから求めた。

伝搬損失について、ダイヤモンドの特性との関連を調べるため、基板温度、フィラメント径など合成条件が異なる５枚のウェハに関して、Ｘ線回折とラマン分光測定を行い、また実際にＳＡＷデバイスを作製して、得られた伝搬損失との相関関係を調べてみた。図３-６に、その典型的なＸ線回折の結果を示す。(100)、(110)、(111)

などの配向が混ざっており、どちらかというと(110)が支配的である。これらの配向性と伝搬損失について関連性を検討したが、特に相関はなかった。

2θ　（°）

図３-６．ダイヤモンドウェハのＸ線回折データの例

次に図３-７にラマン分光結果を示す。これに限らず、どの試料も1332.7cm^{-1}のダイヤピークと、1510cm^{-1}のグラファイトに関係するピークが見られる［20］。また一部のサンプルについては1360cm^{-1}の付近にピークが見られる。

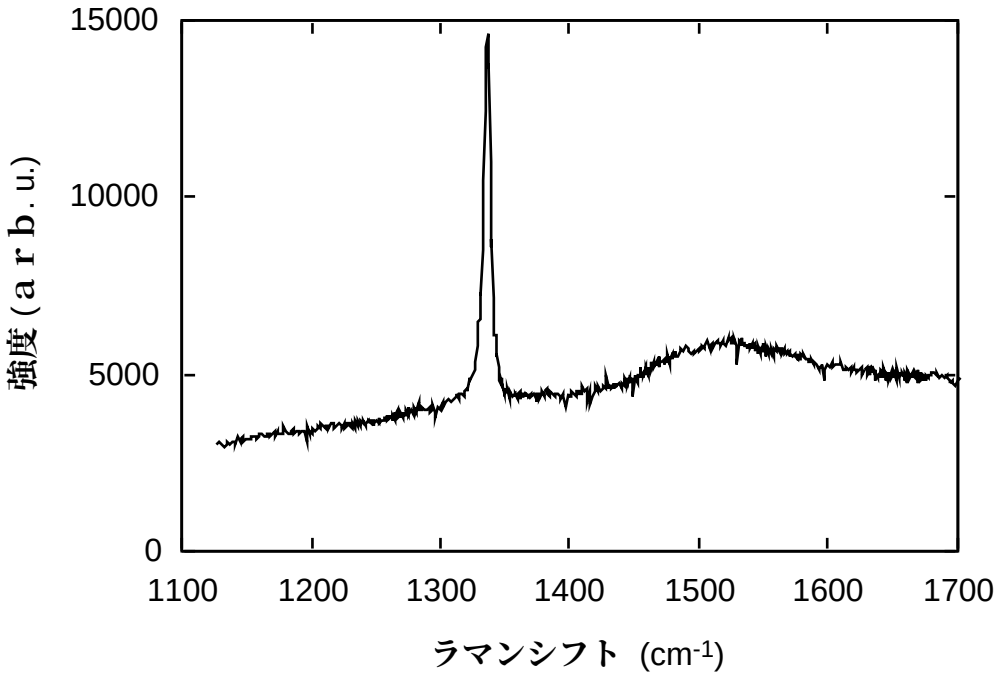


図３-７．ダイヤモンドウェハのラマン分光の例

グラファイト関連ピークについては、多数の研究者により研究されており［21,22,23,24］、その構造が同定されてきた。グラファイト構造の炭素伸縮振動によるピークが1580cm^{-1}付近（Gピーク）、有限のグラファイト層が収縮・膨張する振動（disorder mode）するものが1355cm^{-1}付近（Dピーク）、グラファイトにイオン注入し非晶質化したもの、もしくは結晶構造を小さくしたものでは、1580cm^{-1} 付近と1355cm^{-1} のピークが一つになり、1510cm^{-1}付近にピークが現れることが知られている。今回のラマンスペクトラムは、1510cm^{-1}のピークは非晶質化（結晶構造が小さい）したグラファイトと同定される。

さて図３-８に伝搬損失との関係を調べた結果を示す［25］。

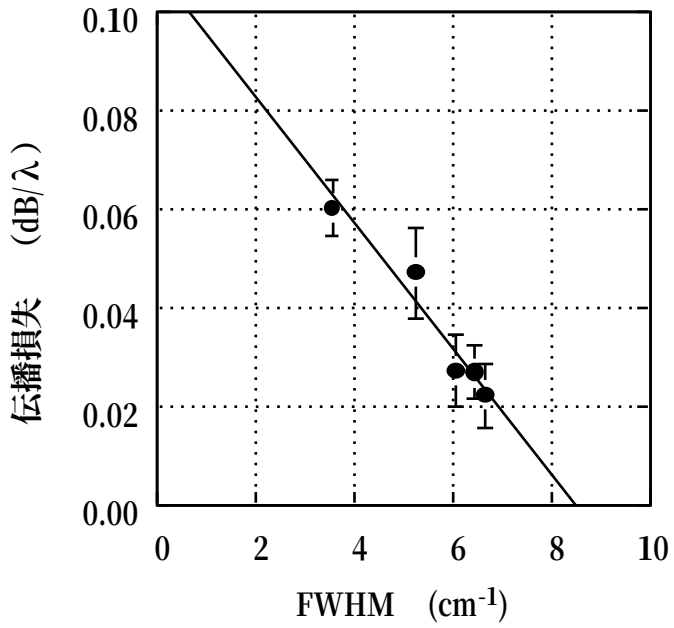


図３-８． ラマン分光のダイヤモンドピークのFWHMと伝搬損失の関連

図にみられるように、ダイヤピークのFWHMと伝搬損失に強い相関が見られた。即ち、ダイヤモンドの結晶性が悪くFWHMの大きい方が、伝搬損失は小さいという事がわかった。ダイヤモンドのFWHMが大きい事は、ダイヤの質が多少グラファイト成分など非ダイヤモンド成分を含み結晶性に劣る事、また粒界の間にはグラファイト等非ダイヤモンド成分が存在しやすいことから、粒界と粒界の質的な変化がなだらかであり、そのことがＳＡＷの散乱を少なくするのではないかと推定される。これは大変興味深い現象で、ＳＡＷ応用においては、ラマン分光で見て寧ろ悪い結晶性のダイヤモンドの方が適するということである。なお、グラファイトピークに関するラマンの結果からは、相関関係は見つけられなかった。以上、ラマン分光のデータを元にして、ＳＡＷデバイス用途としてのダイヤモンドは、結晶性のよいダイ

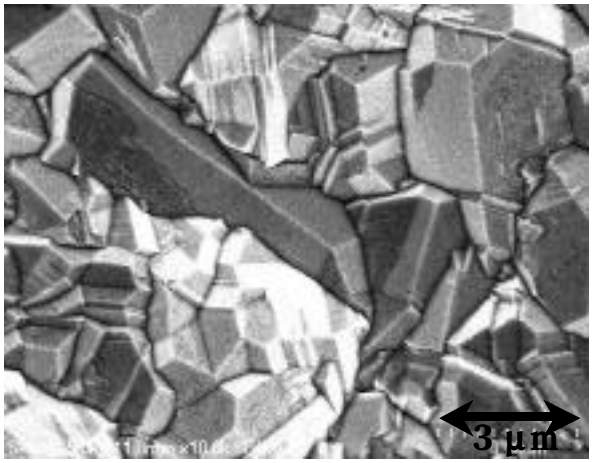
ヤモンドである事よりも、粒界の影響による伝搬損失の影響の方が遥かに大きい事がわかった。

そこで、さらに伝搬損失をさげる方法として、結晶粒界を、ＳＡW波長サイズから外していく事について検討を行った。もちろん単結晶化する事は不可能なので、逆に結晶粒界を小さいしていく方向での検討である。結晶サイズを小さくしていく方法は大きく２通りあり、１つはN_2ガス等不純物を増やす方法であるが、ダイヤモンド膜質の劣化が大きく位相速度への影響が大きいので、圧力を低圧にする方法を用いた。実際にはフィラメントＣＶＤ装置の排気弁開度を変更する改造を行い、圧力を通常の80Torrから20Torr、10Torrと変えて合成を実施した。これらダイヤモンドの成長後の表面ＳＥM像を図３-９に示す。最大粒径が順番に～5μm、～3μm、～0.5μm程度と有意に小さくなっている事がわかる。ダイヤモンドの合成は基板温度が高く、圧力が高いとガス、特に大量の希釈用H_2ガスによる対流が発生するが、ガス圧が低いと対流が少なく、拡散が支配的になり主にC-H活性種の衝突が減少して、基板に到達した活性種は移動せずに、その場でダイヤモンド生成反応するため、粒径が小さくなるのではないかと考えられる。

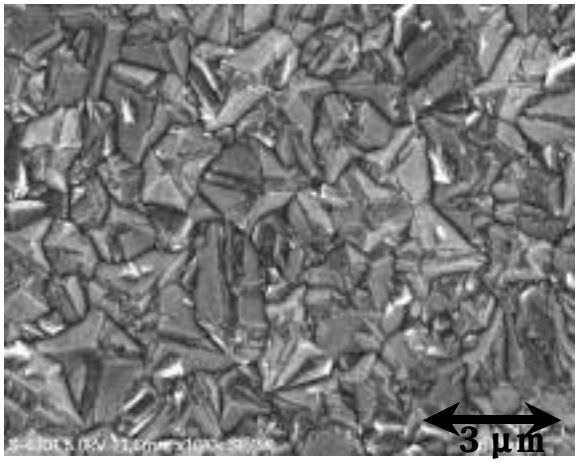
これを研磨したウェハを用いて実際にＳＡWのテストデバイスを試作し、伝搬損失を測定した。その結果を図３-１０に示す。いくつかの周波数で作製しているが、例えば2.5GHzでの比較結果を示すと、上記の順番に0.035から0.02dB／λに下がっており、ダイヤモンドの粒径が伝搬損失に及ぼす効果が、非常に大きいものであることがわかる［26］。

微粒ダイヤモンドにすると、その他位相速度などへの影響などが気がかりであるが、それらを含めてデバイスの結果を表３-４に示す。微粒化で心配されるダイヤモンドの位相速度は、わずかに1%の低下に留まることがわかる。線幅を1%変更することは大きな問題ではなく、また電気機械結合係数にも影響がない事から、微粒化に伴う問題はほぼ無視できると言える。

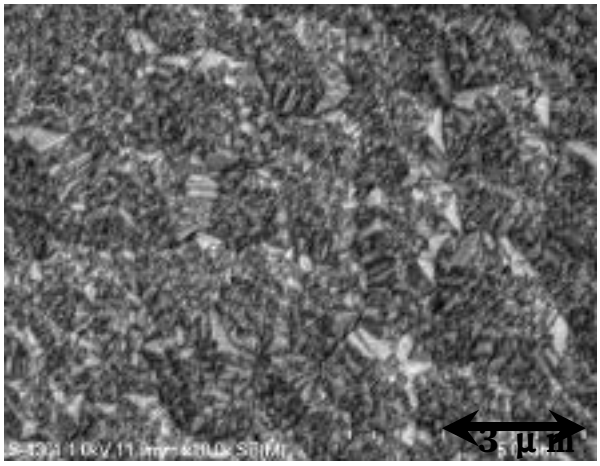
以上により、ＳＡWデバイスプロセスが可能な形状を有し、かつ高い位相速度と低い伝搬損失を有するダイヤモンドウェハを作製する事ができた。



（a）粒径～５μm



（b）粒径～３μm



（c）粒径～０.５μm

図３-９.粒径を変えて合成したダイヤモンドのＳＥＭ写真

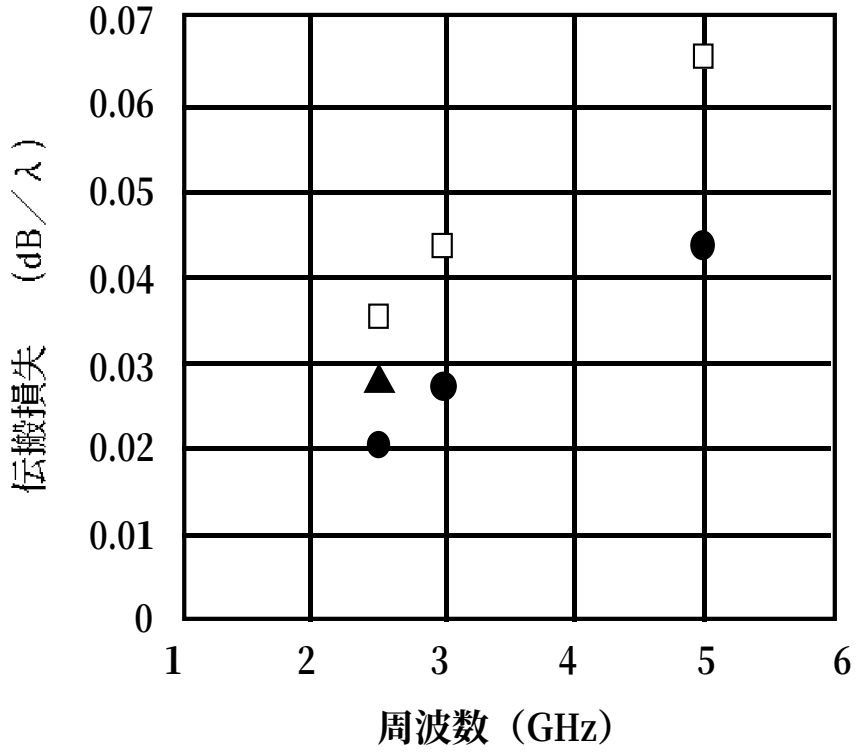

0.07
0.06
0.05
0.04
0.03
0.02
0.01
0
伝搬損失 （dB／λ）
1
2
3
4
5
6
周波数（GHz）

図３-１０.粒径を変えて合成したダイヤモンドの伝搬損失

□ A：～５μm　▲ B：～３μm　● C：～0.５μm

表３-４.微粒ダイヤモンドの2.5GHzデバイス試作結果

項目	A	B	C
粒径（μm）	～5	～3	～0.5
K^2（%）	1.0	1.0	1.0
位相速度（m／s）	9,900	9,860	9,800
伝搬損失（dB／λ）	0.035	0.028	0.02

３-３． ZnOの成膜

（１）c軸配向性

次に本項では、ＳＡＷデバイスの根幹となる圧電薄膜について検討した内容について述べる。ZnOは六方晶6mm、a=3.25A　c=5.12A　のII-VI族半導体結晶であり、ワイドギャップ材料としても注目されているが、圧電薄膜としても知られる。本研究において圧電薄膜として採用した理由は２つあり、１つはもちろん２章の検討で、SiO_2／ZnO／ダイヤモンド構造が狭帯域高周波ＳＡW用材料として極めて有力であるというシミュレーション結果が得られた事による。また２つめは、圧電薄膜として比較的基板を選ばずｃ軸配向しやすい材料であり、既にＳＡWデバイスでもZnO／ガラスやZnO／サファイアとしての実績があり、しかも組成制御がしやすい２元系材料であるためである［27,28,29,30,31,32］。

成膜方式は、ZnOの焼結体をターゲットとして、RFマグネトロンスパッタリングを用いた。ZnOはアンドープの場合ｎ型になっているので、ドーピングして高抵抗とするが、本研究ではLi_2CO_3（1mol%）をターゲットに混入させたものを用いた。LiはZnを置換してアクセプタとして作用し、ドナーを補償して高抵抗化に寄与させる事が目的である［27,29］。図３-１１にRFマグネトロンスパッタリングの装置概念図を示す。

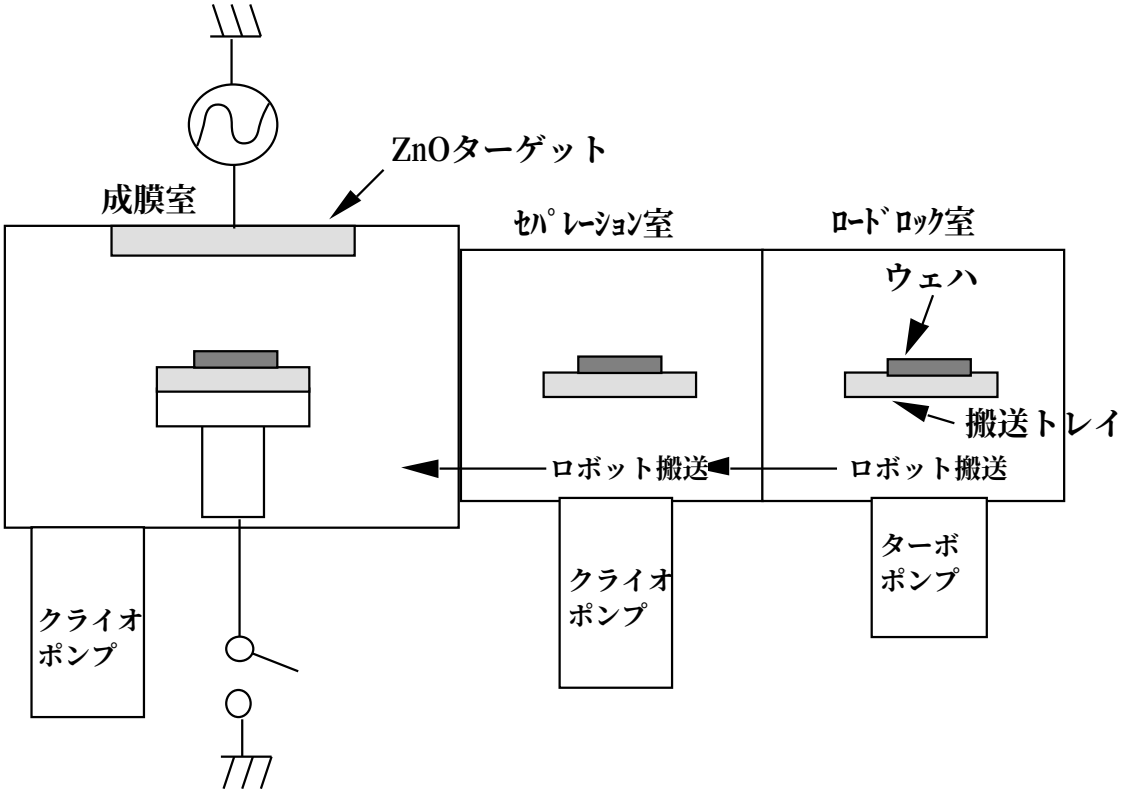


図３-１１.マグネトロンRFスパッタリング装置概略図

後述するバイアス印加については、DC及びRFのどちらかの印加が可能な構成になっている。スパッタガスとしては、Ar、O_2混合ガスを使用した。また、このＳＡＷデバイスの周波数制御のため、ZnOの目標膜厚を±1%以内に制御するため、装置内部に振動子モニターを導入した。表３-５に検討した成膜条件の範囲を示す。

表３-５．RFマグネトロンスパッタリングによるZnO成膜条件

項目	条件
ガス	Ar : O_2 ＝2：1～1：2 総流量　50SCCM
RFパワー（13.56MHz）	0.5～2.0KW
圧力	1～2.5Pa
基板温度　（℃）	200～350℃
バイアス　（V）	-20～50V

まず始めに多結晶ダイヤモンド上へのZnOのｃ軸配向の状況を確認するために、(100)、(110)及び(111)面の単結晶ダイヤモンドへ0.5μmのZnOを成膜して、ｃ軸配向性を調査した［33］。Ｘ線のロッキングカーブによる（002）反射のσ値（ガウス分布として計算）の測定結果を、図３-１２に示す。単結晶上では、どの面であってもダイヤモンド上には、σ値１.５°以下の良好なｃ軸配向膜が得られることがわかった。特に(111)面においては0.5°で最高のものでは0.27°というエピタキシャル膜レベルの値が得られた。ダイヤモンド(111)とZnOの格子定数不整は28.8%と大きいが、(111)面上への六方晶ZnOは成長しやすく、柱状の結晶が寄り集まっているため、１つ１つの結晶の結晶性がよくなったものと思われる。

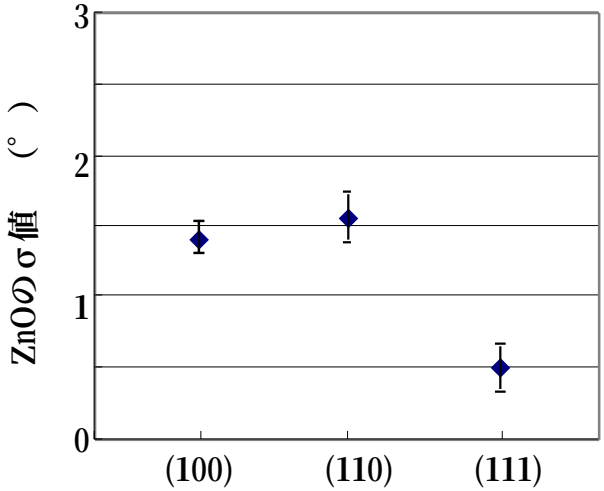


図３-１２.ダイヤモンド単結晶上に成膜したZnOの
Ｘ線のロッキングカーブによるｃ軸配向のσ値

以上より、面方位によって多少の結晶性の差はあるものの、ダイヤモンド上に良好なZnOがｃ軸配向する事を確認した。

次に、肝腎の多結晶ダイヤモンド上の成膜についてであるが、代表的なZnO薄膜のＸ線回折結果を図３-１３に示す。

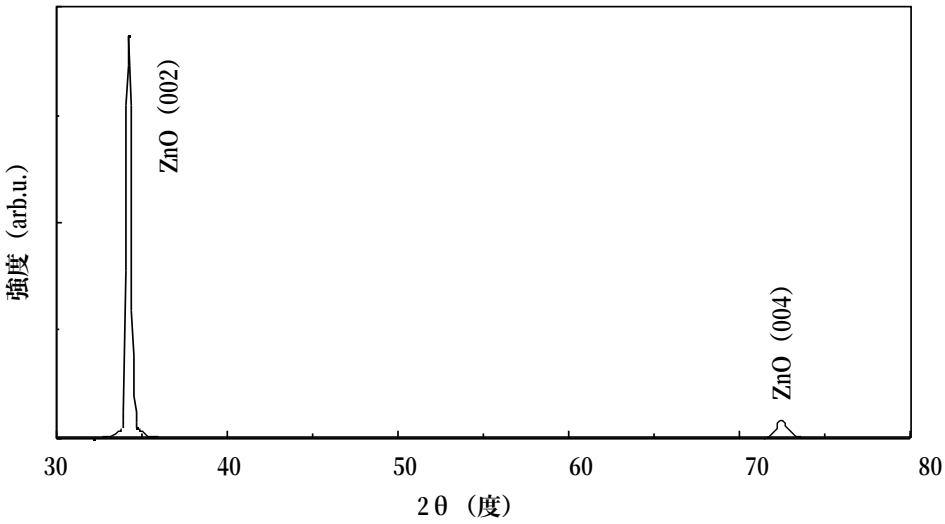


図３-１３.多結晶ダイヤモンド上に成膜したZnOのＸ線回折

図に見られるように、Ｘ線回折では(002)と(004)ピークのみで、多結晶ダイヤモンド上でもｃ軸配向する事を確認した。またσ値の膜厚依存性を調べた結果を図３-１４に示すが、膜厚が厚くなるほどσ値は小さくなり、即ちｃ軸配向性はよくなり、1μm以上では殆ど変化がない事がわかる。ＳＡＷデバイスの場合周波数によるが、2GHz以上の高周波ではZnO膜厚は薄く、0.5μm前後であるためｃ軸配向性がやや悪いところになるが、逆に配向性改善の余地があるとも言える。

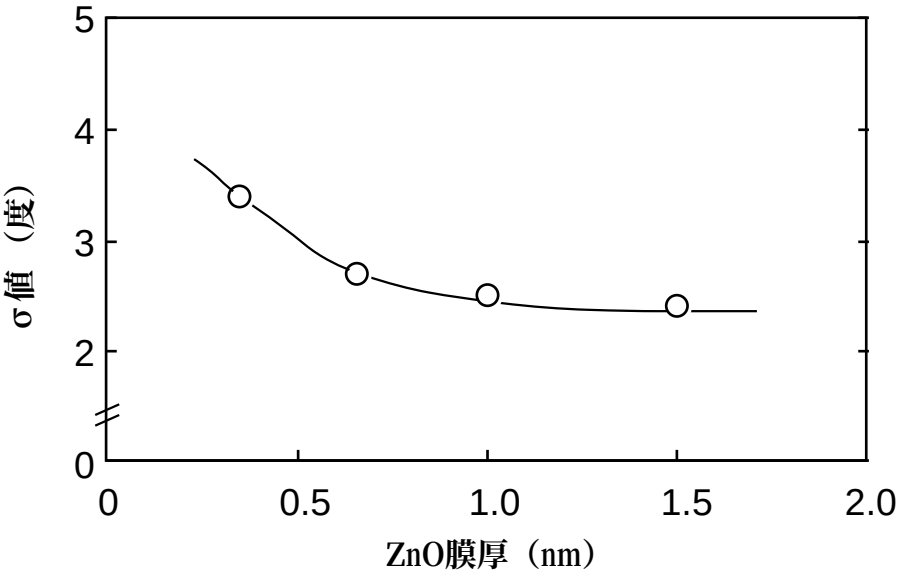


図３-１４.多結晶ダイヤモンド上ZnOのσ値の膜厚依存性

次に、代表的なZnO薄膜のＳＥＭ写真を図３-１５に示す。ＳＥＭ像に見られるように、異常成長領域が発生する事がわかった。Ｘ線回折ではｃ軸配向である事が確認されており、この数が増えてもａ軸配向が観測される訳ではない。なおこの異常成長は膜厚が厚いほど多数見られる事から、成長過程の途中から発生する、即ち、転位などをきっかけに発生するものと考えられる。

さて、これらｃ軸配向性や異常成長領域がＳＡＷデバイスに及ぼす影響について、改善のための対策を実施した。まずｃ軸配向性の影響について、テストデバイスを作って評価した。様々な条件で成膜したZnOを用いて、Ｘ線回折のｃ軸配向σ値を調べ、テストデバイスの挿入損失との関係を調べた結果を図３-１６に示す。予想通りこの２つには強い相関関係があり、ｃ軸配向性が高いほど挿入損失が低くなる事が判った。もっともこれは図３-１７に示すように、σ値の異なるZnO膜はモフォロジも異なり、σ値が大きいものの方が粗い表面をしているため、それによるＳＡＷの散乱によって損失となる部分を含んでいる。しかし、σ値の小さい薄膜が、異常成長を除けば、モフォロジーもよいのも事実で、実用上はこれらを一緒に議論して問題ないと判断した。そこで、良好なｃ軸配向膜を得るために、スパッタ条件を検討した。一般にスパッタにおいて膜質を劣化させる原因としては、Ar^+イオンによるが挙げられるという報告もある［34］。即ちイオン化したArが高速エネルギーを持ってウェハにダメージを与えることにより、膜の成長を阻害する。そこで基板にバイアスを印加しAr^+イオンを制御する実験をおこなった。図３-１８にバイアス電圧を変えて出来たZnO膜のσ値を測定した結果を示す。バイアスが＋になるに従って確かにｃ軸配向性が高くなることがわかった。これは基板側の＋バイアスによって、＋電荷を持つAr+が基板に引かれて加速される度合いが減少したものによると考えられる。

（２）異常成長低減

さて次に、最初に述べた異常成長の抑制について検討した結果を記す。前述のように、この異常成長はＸ線でみるとｃ軸配向膜であり、膜厚が厚いほど多数見られる事から、成長過程の途中から発生する、即ち、転位などをきっかけに発生するものと考えた。そこで成長の初期の段階で消滅させることが可能かを検討することにした。文献によると、Kimら［35］はSiO_2／GaAs上のZnOを検討しており、0.5～2.0μmのZnOを430℃10分アニールし、FWHMが1.23°から0.37°と大幅に向上することを見いだした。彼らは結晶性の向上の理由について、ボイドや結晶欠陥が減ったためだと述べている。また藤村らはサファイアのR面に２段階成長法を用いて、ZnOエ

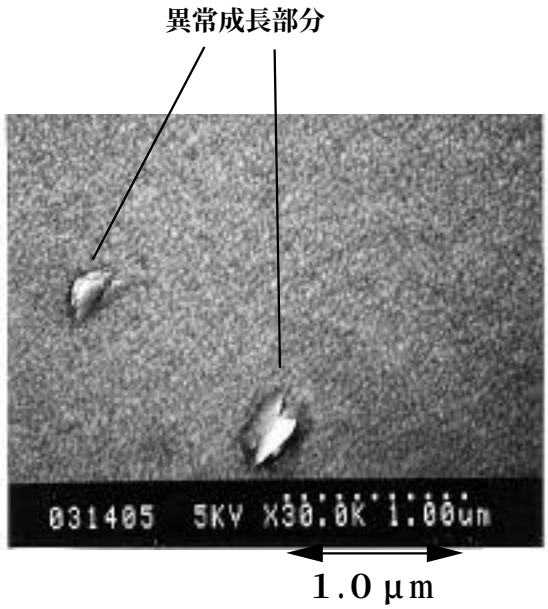


図３-１５.多結晶ダイヤモンド上に成膜したＺｎＯのＳＥＭ写真

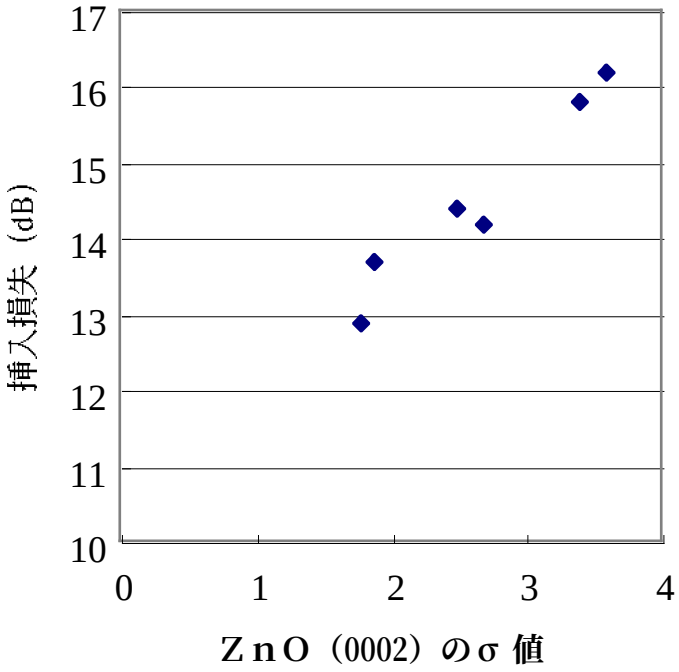


図３-１６.ＺｎＯのｃ軸配向のσ値とデバイスの損失の関係

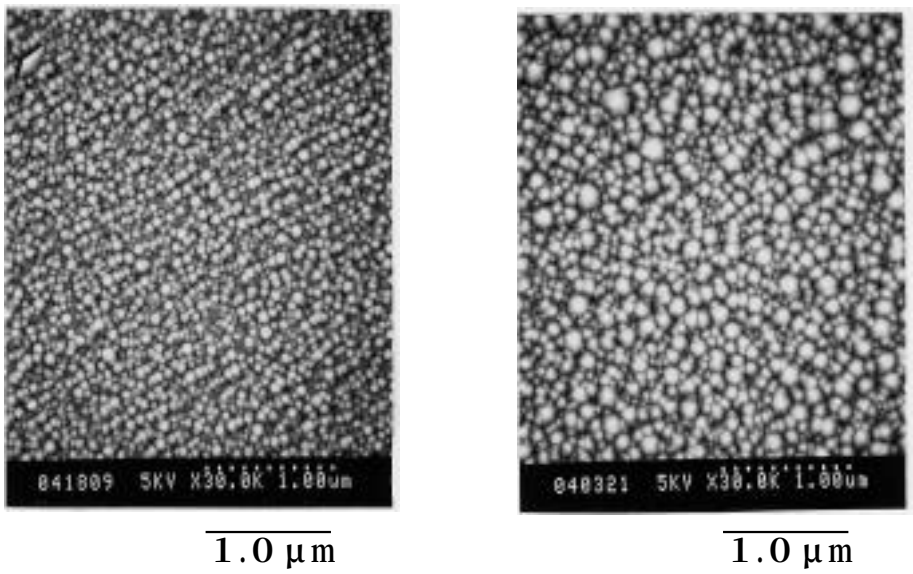


図３-１７. ZnOのＳＥＭ像

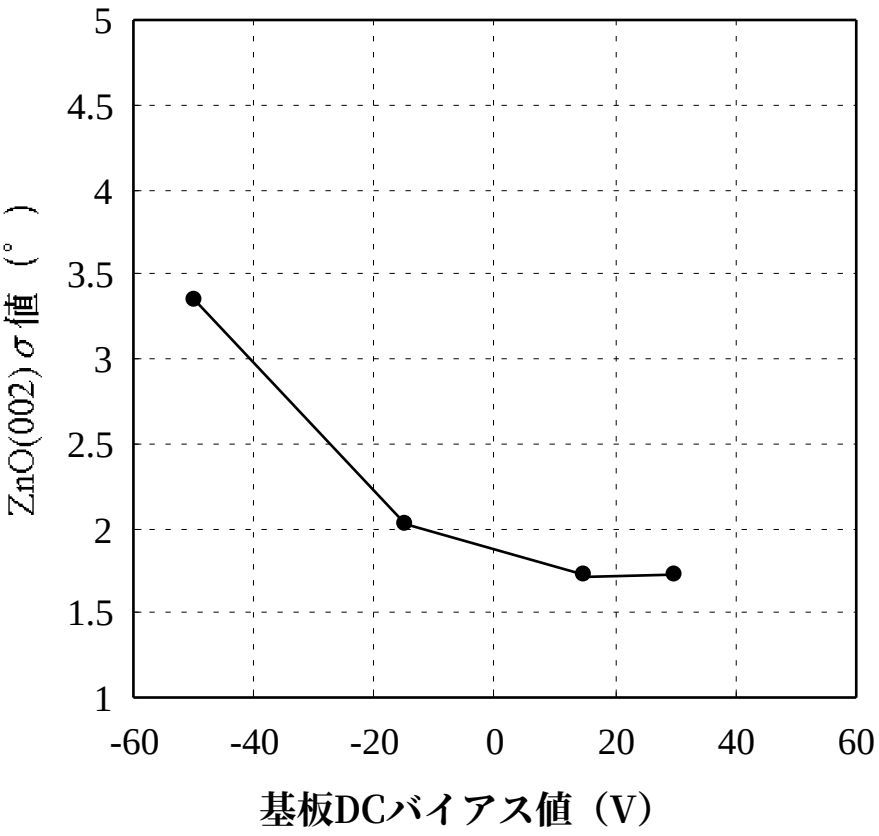


図３-１８. ZnOの成膜バイアスがσ値に及ぼす影響

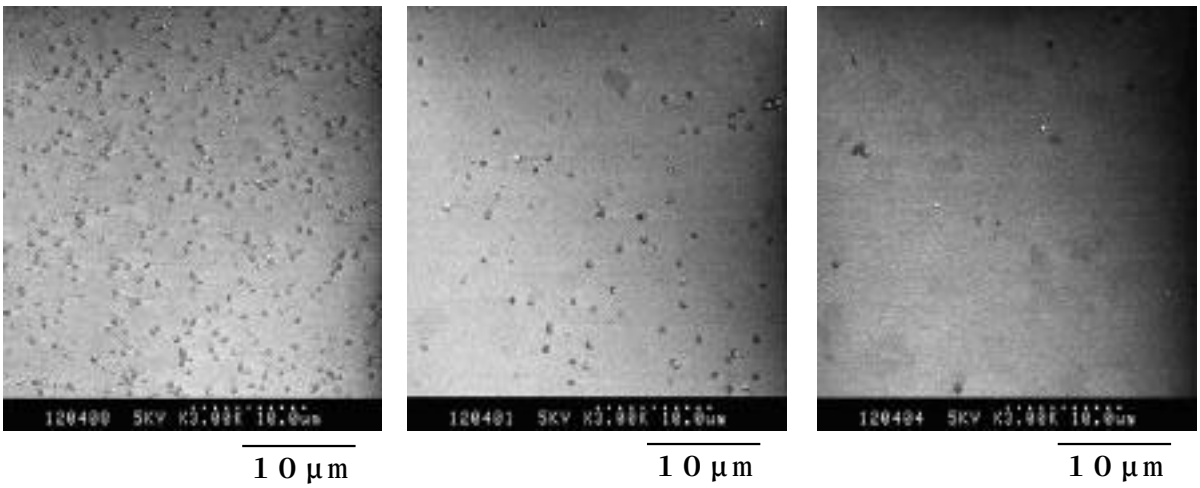
ピ成長させることに成功し、一方SiO_2をスパッタリングで形成し、その後、半導体の不純物の活性化に使われているRTA（Rapid Thermal Annealing）を行うことにより、界面準位が減少した例が報告されている［36］。ＳＡＷデバイスに必要とされているZnOの膜質はｃ軸配向性を優先させながら、結晶粒径があまり大きくならないようにすることである。結晶粒径があまり大きくなると個々の結晶の表面での凹凸が大きくなり、伝搬損失を増加させるからである。結晶粒径の成長エネルギーがｃ面優先配向エネルギーより小さいとすると、通常のアニールで低温からゆっくり温度を上げて行った場合、成長過程で粒径が大きくなってしまう恐れがある。RTAの最大の特徴は、短時間で所望のエネルギーを与えることが可能であることから、この目的には適していると考えられる。

以上により、まず１段階目の成長を行い、RTAによるアニールを実施することによって発生したZnOの異常成長を解消し、その後２段階目の成長を行うという方法を検討した。検討したZnO成長とアニールの条件を表３-６に示す。

表３-６.二段階成長法の条件

ZnO成長	条件
ガス	Ar：O_2＝1：1　総流量50SCCM
ＲＦパワー	1KW
圧力	1.5Pa
基板温度	280℃
バイアス	＋30V
成長膜厚	１回目40nm　２回目500nm
RTAアニール	
昇温	5秒
アニール温度	300～600℃
アニール時間	5～30秒
ガス	大気　20sccm

実際に、アニール温度を変えて２段階成長したZnOのＳＥM像を図３-１９に示す。高温アニールするに従い、異常成長が激減している様子がわかる。これにより、１段階目の成長でできた異常成長が、RTAアニールにより消滅し、それを引き継いで２段階目で、成長したものと考えられる。実際これらを用いてＳＡＷテストデバイスを作製し、伝搬損失を測定したところ、図３-２０に示すようにアニールなしで



（ａ）アニールなし　（ｂ）300℃アニール　（ｂ）500℃アニール

図３-１９.アニールによる異常成長の低減

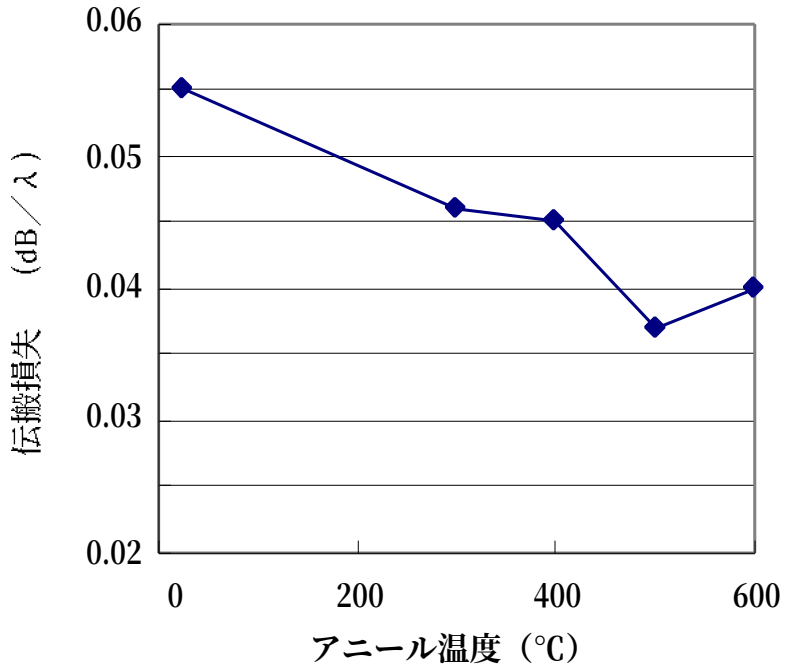


図３-２０.伝搬損失のアニール温度依存性

0.055dB／λから、500℃アニールで0.037dB／λまで低減することが出来た。　以上、ＲＦマグネトロンスパッタリングを用いて、バイアス印加とRTAを用いた２段階成長の２つの技術の開発により、多結晶ダイヤモンド上に、異常成長の少ないｃ軸配向膜で伝搬損失の小さいZnO薄膜を成膜することができた。その断面図を図３-２１に示す。

図３-２１.異常成長のないZnO膜の断面ＦＥＳＥM写真

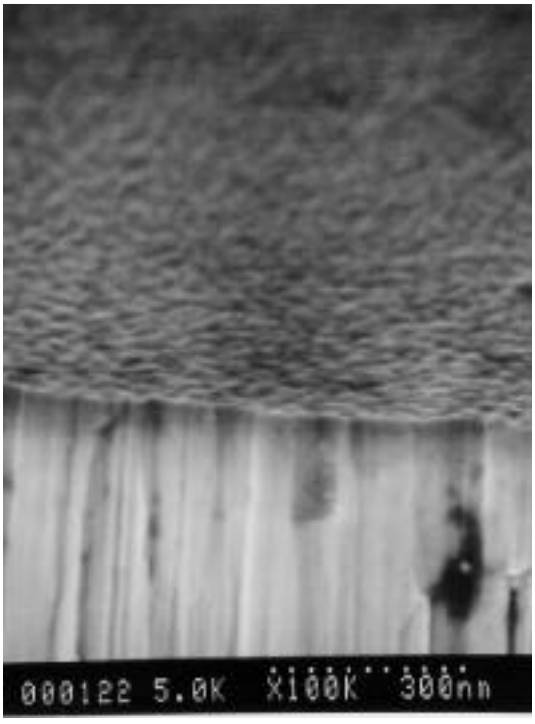


図３-２１.異常成長のないZnO膜の断面写真

３-４．高周波ＳＡＷデバイスの作製

（１）プロセスフロー

ＳＡＷデバイスのプロセスは、大きくウェハプロセスと実装プロセスに分かれる。まずSiO_2／IDT／ZnO／ダイヤモンド構造を例に、ウェハプロセスの概略を図３-２２に示す。ここではダイヤモンド／Siウェハをスターティングマテリアル（ａ）として説明する。まずRFマグネトロンスパッタリングによるZnO成膜を行う（ｂ）。厚さは例えば2.5GHzの場合で約500nmである。３-３で述べたように、実際には間にRTAアニールをはさんだ２段階成長である。その後$AlCu_{0.5\%}$電極を、同じくRFマグネトロンスパッタリングにより形成する（ｃ）。本研究で用いた$AlCu_{0.5\%}$によるIDT（Interdigital transducer）は25～50nm程度の薄い膜である。ここで$AlCu_{0.5\%}$用いたのは、文献などによりAlより耐電力性に優れることが判明している［37］からである。ステッパを用いた通常のリソグラフィで電極パターンをフォトレジストで形成し、反応性イオンエッチング（RIE-Reactive Ion Etching）を用いて$AlCu_{0.5\%}$をエッチングし、ＳＡＷデバイスの電極であるIDTを形成する（ｄ）。その後、SiO_2をRFマグネトロンスパッタリングにより成膜する。厚さは例えば2.5GHzの場合で約400nmである。これはターゲットを焼結体のSiO_2とし、Arを導入して成膜した（ｅ）。成膜される膜はアモルファスのSiO_2となる。その後、電極パッド部分のSiO_2を緩衝フッ酸を用いたウェットエッチングにより除去する（ｆ）。以上のわずか５工程である。$AlCu_{0.5\%}$の成膜、線幅制御のためのRIEによるエッチングについては、ＳＡＷデバイスの特性に大きく影響するので、後に詳述する。なお、プロセスの段数や順番は積層構造によって変わる。またIDT電極厚みが薄いフィルタ設計の場合、ボンディングパッド用$AlCu_{0.5\%}$電極形成を行う場合もある。こうして得られたＳＡＷデバイスの断面ＳＥＭ写真を図３-２３に示す。多結晶ダイヤモンドの粒が異なった方位を持っていること、ZnOがｃ軸配向していること、SiO_2がアモルファスであること、Alの段差が上のSiO_2に影響していることなどが読み取れる。

次に、図３-２４に示した実装工程のフローについて記す。まずウェハ形状のデバイスを切断する必要があるが、ダイヤモンドは通常のSiウェハのダイシングのようにダイヤモンド砥石を用いて切断できないため、YAGレーザーを用いて行う（ａ）。その際炭化されたダイヤモンドや、下まで貫通して飛ばされるSiがウェハ上に再付着するのを防ぐため、予めフォトレジストを用いて保護しておく。このYAGレーザープロセスは、レーザートリマなど半導体用設備で実施可能ではある。こうしてダイヤモンドを除去したウェハの基板のSi部分を通常のダイシングにより切断する（ｂ）。次にパッケージへの実装プロセスは、まずセラミックスパッケージ上にチップをダイボンドする（ｃ）。ダイボンド剤としてはエポキシ樹脂を用いた。充分にベーク

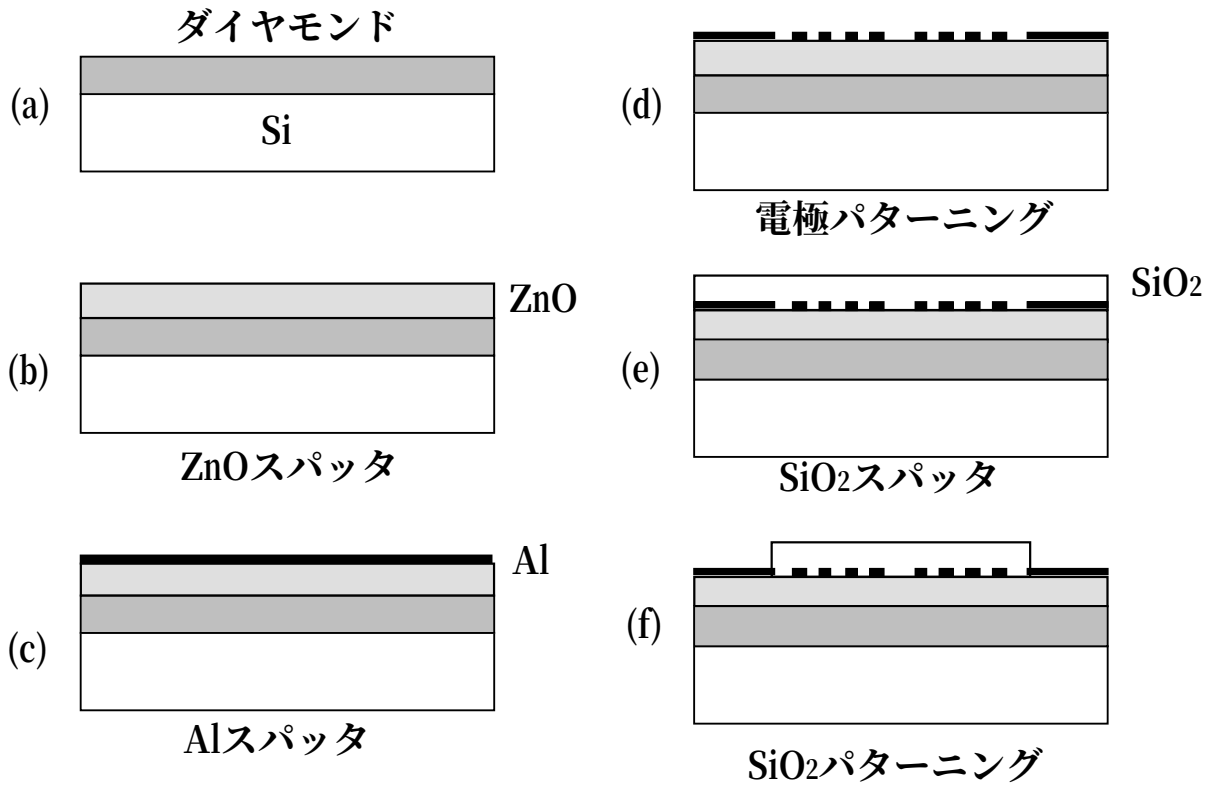


図３-２２　ウェハプロセスのフロー図

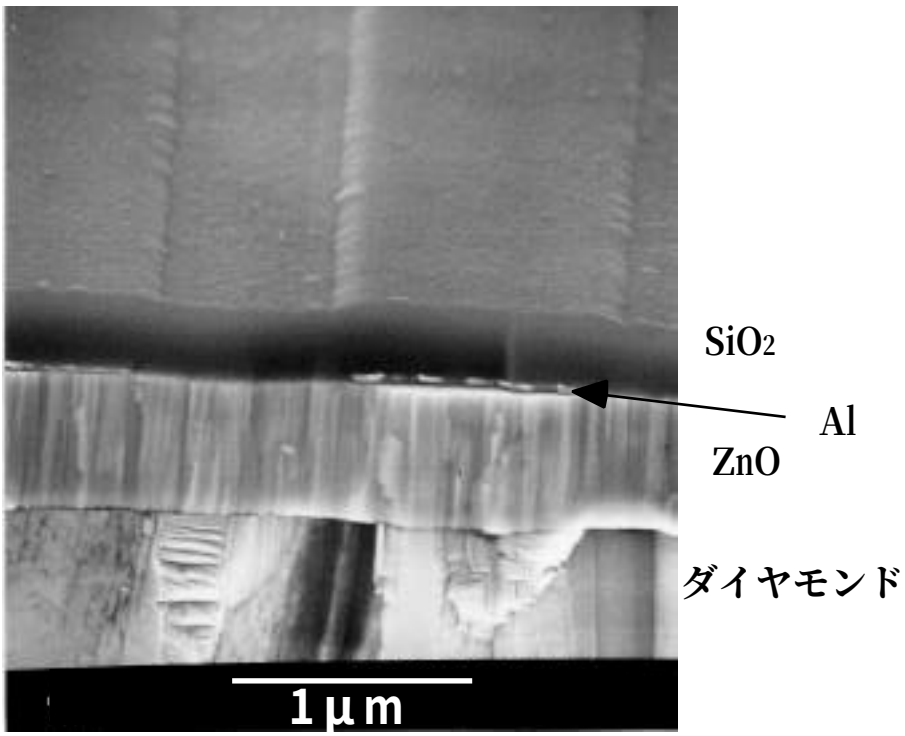


図３-２３　ウェハプロセス済みのデバイス断面ＳＥＭ像

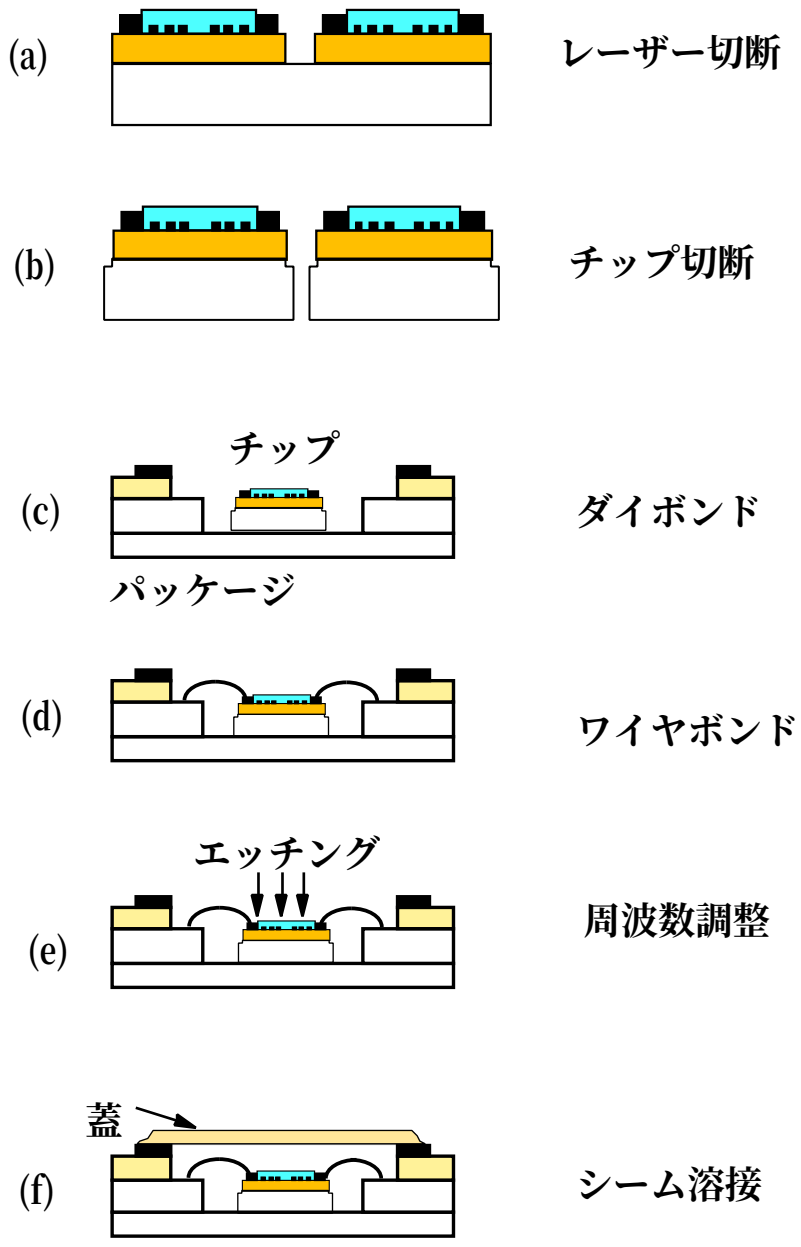


図３-２４　実装プロセスのフロー図

した後、取りだし電極へAlのワイヤボンドを行う（ｄ）。狭帯域フィルタや共振器ではこの状態で、水晶デバイスと同様、周波数微調整のためのエッチングを行う（ｅ）。本研究の狭帯域フィルタの場合は、CHF_3とO_2ガスにより、素子最上層のSiO_2を原子層レベルでエッチングし、所望の周波数に合致するように、周波数を数MHz程度調整する。この際周波数をモニタしながらエッチングを行う事が可能で、所望の周波数に調整できる。その後、パッケージの蓋をシーム溶接する（ｆ）。ＳＡＷフィルタでは、パッド部分やワイヤから放出される直達電磁波がデバイス特性の妨害となるため、その除去のため、パッケージの蓋は金属を用いる。

（２）櫛形電極形成

ＳＡＷデバイスの電極は弾性波のバルク波への反射を避ける必要があり、また反射率を所望の値にする必要があるため、一般に薄膜である。特にダイヤモンドＳＡＷデバイスの場合、高周波であるため、前述のように25～50nm程度の極めて薄い膜である。よってその耐電力性向上は必須課題である。ＳＡＷデバイスの耐電力性向上にはいくつかの方法が取られており、半導体デバイスと同様、CuやSiなどの添加をする方法［37,38］、薄いTiなどを下地に設置する方法［39］、薄いCuなどを中間に挟む方法［40］などが採用されている。本研究では容易な前者を採用し、通常よく用いられる$AlCu_{0.5\%}$とした。

ＳＡＷデバイスではIDTを構成する金属電極の電気抵抗によりエネルギー損失が生じ、ジュール熱に変換されて、挿入損失の要因の一つになる。この抵抗損失は一般に次式で計算できる［41］。

$$Lr = 10 \cdot \log(Rsaw / (Rsaw + Ridt)) \qquad (3\text{-}2)$$

ここで、Rsaw：SAWとして消費されたエネルギーに相当する等価抵抗分

Ridt：IDTの直列抵抗である。

RsawはIDT部分のＳＡＷ放射抵抗であり、通常はこの値が中心周波数で特性インピーダンス50Ωに近い値になるようにIDT設計される。RsawはIDT端面での音響反射を無視できる場合は次式で表される。

$$1 / Rsaw = 8\ K^2\ f_0\ C\ N^2\ W \qquad (3\text{-}3)$$

ここでWはIDT交差幅である。

IDTの直列抵抗RidtはIDTの線幅をd、厚みをh、長さをl、抵抗率をρ、対数をNとすると等価的に次式で計算できる［42］。

$$Ridt = (2\rho l / 3dh) / N \qquad (3\text{-}4)$$

電極一本あたり等価的にρl／3dhであるので、一対あたりでは2ρl／3dhとなり、これがN対並列接続と考えると式のようになる。これから分かるように、抵抗損失Ｌｒの値はRsawの値にも左右され、IDT対数の小さすぎる場合や結合係数の小さい場合(つ

まりRsawが大きくミスマッチの大きい場合）にはLrは小さくなり、Rsawが小さくなるほどLrは大きくなる．なお、Lrは入力側及び出力側の双方で発生するので全体での抵抗損失は2Lrになる。問題はIDTの薄膜化による抵抗上昇が非常に大きいことである。図３-２５は電極の抵抗率が抵抗損失にどの程度影響するのかを計算したものであるが、例えば1dBを限度として考えると、50nm厚の場合、6.5×10^{-6}Ωcmで1dB、30nmの場合5.5×10^{-6}Ωcmで1dBとなる。

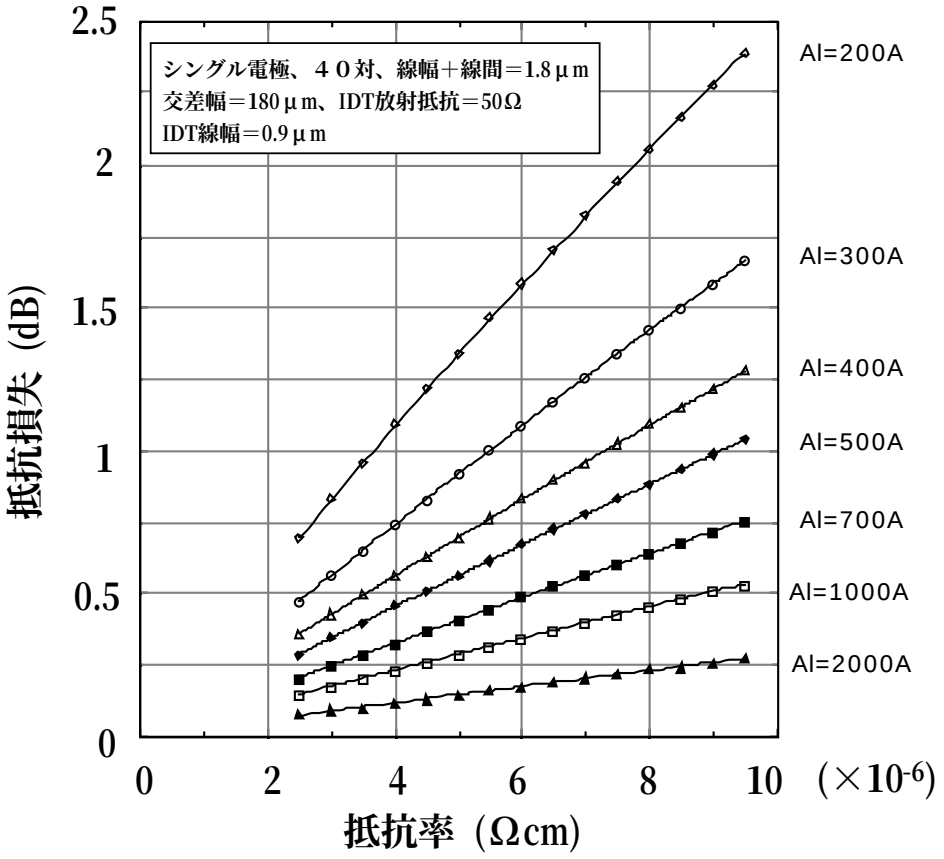


図３-２５.電極抵抗率の抵抗損失への影響

実際にAlCu0.5%が薄厚化した場合の抵抗を調べたのが図３-２６である。薄厚化するに従って高抵抗化し、25nmより薄くなるとバルク比で2倍を越す。30nmで考えると約5.2×10^{-6}Ωcmで図３-２５より抵抗損失は約0.9dBとなる。よって常にこの程度の挿入損失を抱えるということを念頭においておかねばならない。次にその加工について述べる。ダイヤモンドＳＡＷで2.5から5GHzの周波数を作製する場合、ライン&スペースとして、ハーフミクロンが要求される。このレベルは半導体の配線などで通常の技術であるが、高周波ＳＡＷデバイスの場合、次の２つの課題がある。

１）下が圧電材料となるため、電極加工時に圧電材料を損傷する。

２）スプリアス抑圧等デバイス性能を得るため線幅制御を精密に行う必要がある。

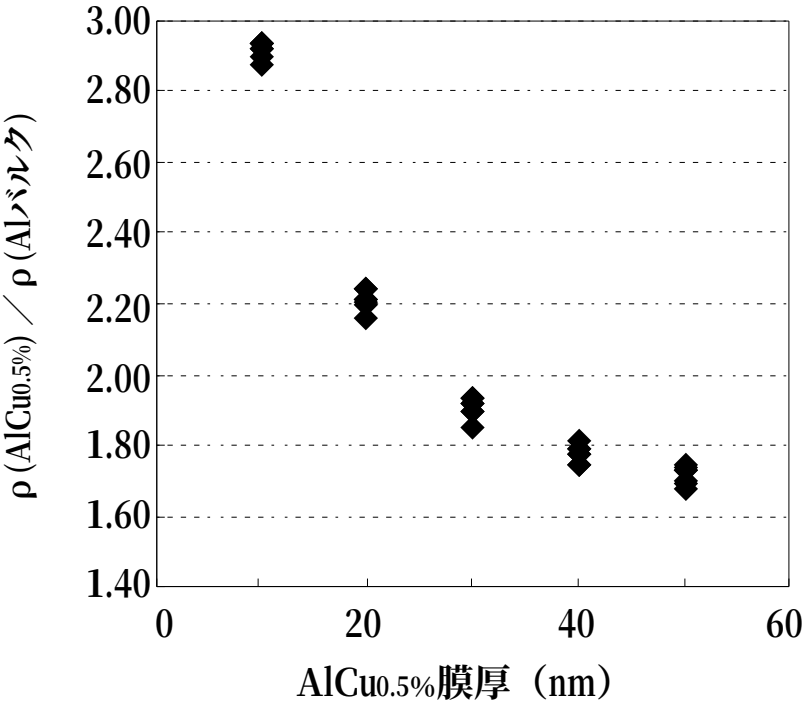


図３-２６.電極抵抗率の抵抗損失への影響

本項では、線幅制御性についての考察とこれらを解決するプロセス開発について述べる。相前後するが、狭帯域デバイスの作製結果から、SiO_2／IDT／ZnO／ダイヤモンドの共振器を作製した場合の２次波による主ピークに対する１次波スプリアスのＩＤＴ線幅依存性を図３-２７に示す。

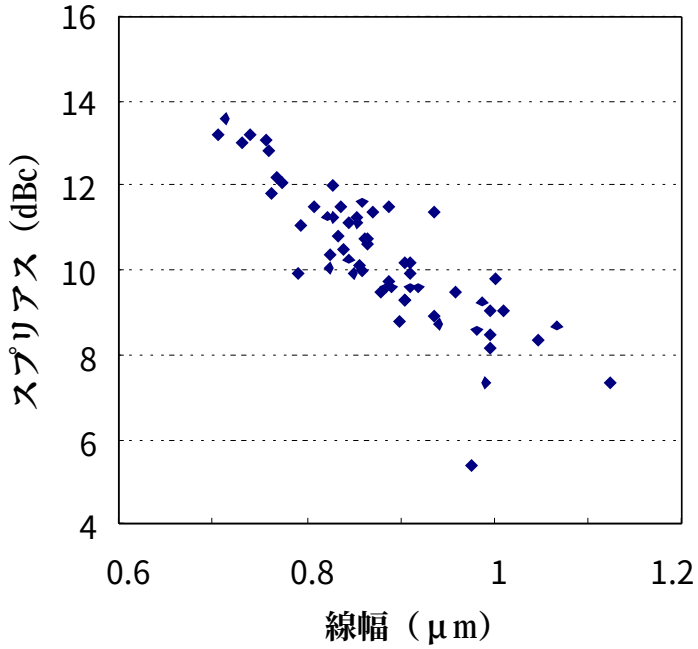


図３-２７　電極線幅と１次のスプリアス（２次主ピーク比）

ライン（L）とスペース（S）がL+S＝2.0μmであるので、線幅0.8μmというのはL=0.8μm、S=1.2μmということになる。この図からわかるようにL=1μmの時にスプリアス9dBcであるものが、0.7μmになると13dBc確保できる。これはもちろんIDT間の容量が小さくなるためである。これは一例であるが、このようにＳＡＷデバイスにおいてプロセスは、設計で詰めきるのが難しいところを補完することが可能である。このようなことを可能にしようとすると、マスクを忠実に反映するプロセスが必要になる。以上のことを換言すると、圧電薄膜にダメージなく、マスク通りのサイズに電極をエッチングする技術が必要になる。以下、反応性イオンエッチング（ＲＩＥ）を用いたエッチング技術の開発について述べる。　まず始めに、IDT電極形成プロセスの流れを図３-２８に示す。

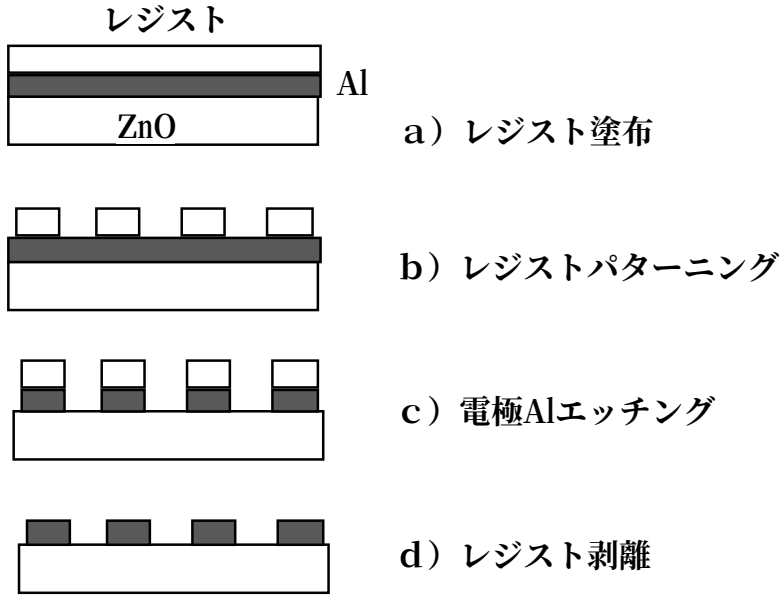


図３-２８．電極形成プロセスフロー図

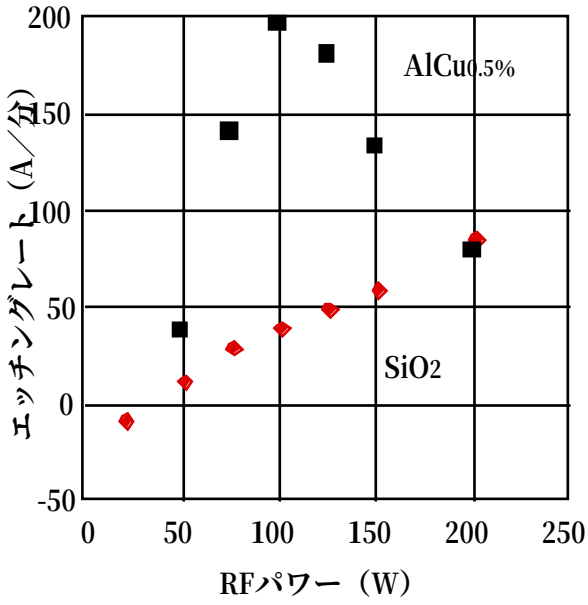
フォトレジストを塗布し（ａ）、ｉ線（365nm）ステッパを用いたフォトリソグラフィ（ｂ）の後、RIEによるエッチングを行い（ｃ）、最後にレジスト除去を行う（ｄ）。反応性イオンエッチングの場合、垂直方向に選択的にエッチングが進み、水平方向にはほとんどエッチングされないため電極が細ることなくエッチングが進行する。しかしSiO_2／IDT／ZnO／ダイヤモンド構造では、IDTの下地であるZnOがエッチングに用いるハロゲン系ガスに弱く、非常にエッチングされやすい物質でありダメージを受ける。しかしZnOはＳＡＷデバイスの特性の鍵を握る圧電薄膜であるので、エッチングによるダメージを受けると、充分な圧電特性を得ることができない事が予想される。そこでエッチングダメージから保護するために、保護膜層SiO_2を導入することを考えた。SiO_2は温度補償に使う構成材料でもあり、ＳＡＷ特性への影響が最

も少ないと考えられるためである。

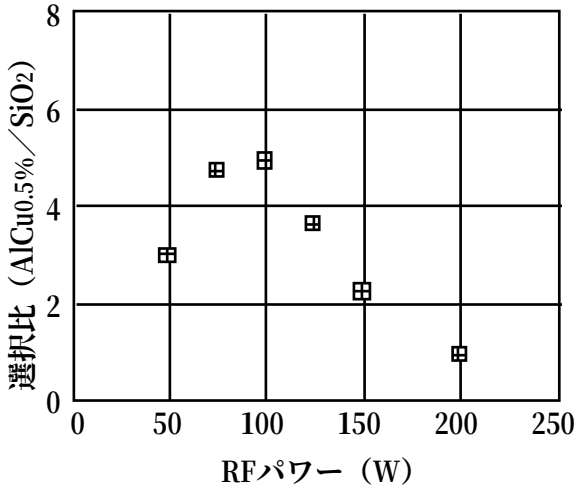
さて電極の下にZnO圧電薄膜が有るため、エッチングは$AlCu_{0.5\%}$電極に対しては速やかにエッチングが進行し、ストップ層となるSiO_2に対してはエッチングが進行しにくいような条件が必要となる。$AlCu_{0.5\%}$電極の厚みが30nm、保護SiO_2層厚みが5nm程度と想定して、エッチング選択比（$AlCu_{0.5\%}$／SiO_2）を最大限にする必要がある。

まずエッチング条件の探索として反応ガスの選択を行った［43］。$AlCu_{0.5\%}$のエッチングにおけるガスの選択については、上記選択比以外にも自然酸化膜層のエッチング、残留塩素の除去といった課題がある。$AlCu_{0.5\%}$の表面には薄い自然酸化膜層があり、酸化膜層をエッチングするためには還元性の高いガスを用いる必要がある。また$AlCu_{0.5\%}$のエッチングには一般に塩素系のガスを用いるが、エッチング後の生成物として塩素がウエハ表面に残留する。この残留塩素が空気と触れると空気中の酸素と反応して塩酸を生じ、電極を腐食してしまいコロージョンが発生する。そこで、残留塩素量が少なくなるようなガスを使う必要がある。この二つの観点から有利と考えられるBCl_3を用いて選択比向上を目指した。さらに混合ガスの検討を行った。エッチング機構を考えると、塩素のラジカルと反応して進行する化学的エッチングが主であるのに対し、SiO_2のエッチングはイオン衝撃による物理的エッチングが主である。従って、反応ガス中の塩素濃度を増やすことで、$AlCu_{0.5\%}$のエッチングを促進でき、SiO_2のエッチングにはほとんど影響しないと考えられるので、選択比を大きくできることが予想できる。具体的にはBCl_3にCl_2ガスを添加することを試みた。これはSiのLSIプロセスでAl／フォトレジストの選択比を上げるのに、Cl2とBBr3混合ガスを用いる事からの類推である［44］。基板温度、流量、圧力、 RFパワーなどについて最適化の実験をおこなった。その中で、RFパワー依存性を図３-２９に示す。SiO_2はRFパワーの上昇とともにエッチングレートが上昇しイオン衝撃による物理エッチングが進みやすくなることを示しているが、$AlCu_{0.5\%}$は化学反応律速のため、パワーを上げる効果はなくかえって、ウェハやチャンバに再付着するなどの問題が起こることがわかった。この結果100Wを最適パワーとして設定した。この再付着はガス圧力増加することなどでも発生する。塩素ガスの添加について図３-３０に各々のエッチング速度を示す。

Cl_2を添加することで、$AlCu_{0.5\%}$のエッチレートがBCl_3単独ガスの場合（18nm／分）に比べ3倍以上に大きくできることがわかる。一方、SiO_2のエッチングレートは塩素添加量によらず3.5nm／分程度で、ほぼ一定であることがわかった。この結果は、$AlCu_{0.5\%}$は化学的エッチングに、SiO_2は物理エッチングに支配されているということを実証している。Cl_2の添加はサイドエッチングを増やすことから、BCl_3+$Cl_2$5%添加ガスを用いて、選択比が$AlCu_{0.5\%}$／SiO_2=16と大きくできる条件を見出すことができた。この結果によりハーフミクロン電極形成が可能となった。

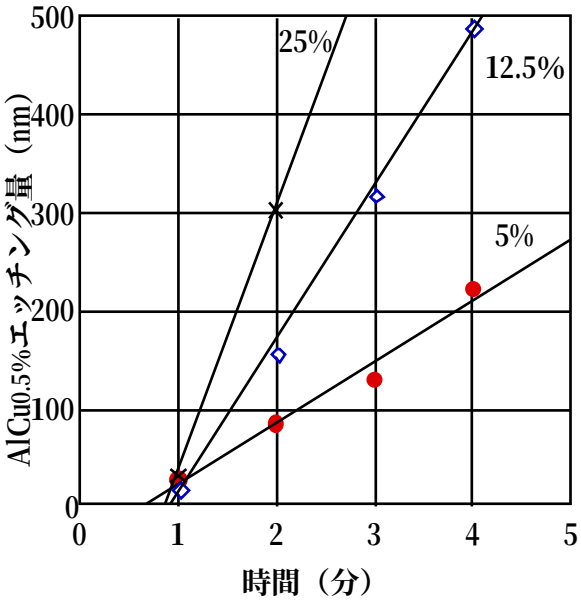


（ａ）エッチングレート

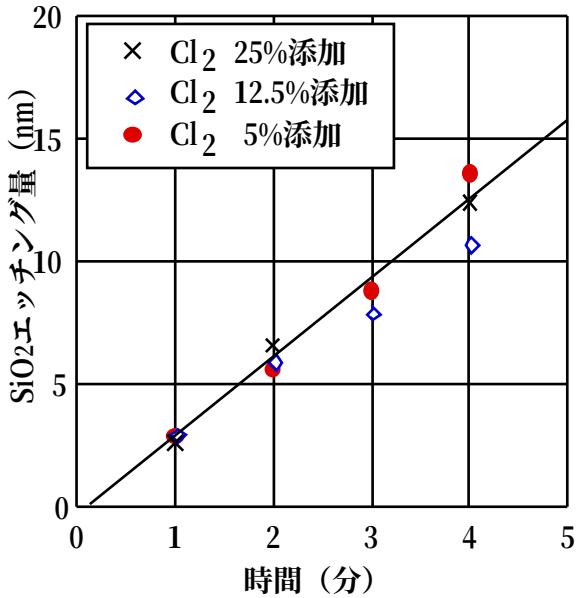


（ｂ）選択比

図３-２９．　AlCu0.5%とSiO2エッチングレート及び選択比のRFパワー依存性



（ａ）AlCu0.5%エッチング量



（ｂ）SiO2エッチング量

図３-３０．　AlCu0.5%とSiO2エッチングレートのCl2添加量依存性

Cl2を添加することで、AlCu0.5%のエッチレートがBCl3単独ガスの場合（18nm／分）に比べ3倍以上に大きくできることがわかる。一方、SiO2のエッチングレートは塩素添加量によらず3.5nm／分程度で、ほぼ一定であることがわかった。この結果は、AlCu0.5%は化学的エッチングに、SiO2は物理エッチングに支配されているということを実証している。Cl2の添加はサイドエッチングを増やすことから、BCl3+Cl25%添加ガスを用いて、選択比がAlCu0.5%／SiO2=16と大きくできる条件を見出すことができた。この結果によりハーフミクロン電極形成が可能となった。

以上の技術を用いて、2～5GHzのダイヤモンドＳＡＷデバイスを作製することができるようになった。2～3GHzのデバイスについては４、５章で詳述するが、ここでは最高の周波数として、ハーフミクロン線幅を用いた5GHzデバイス作製の例を示す。　図３-３１は0.5μmルールの共振器型設計のIDTパターンのＳＥＭ写真であり、上記のエッチング技術を用いてZnO上に寸法通り線幅の制御ができている。

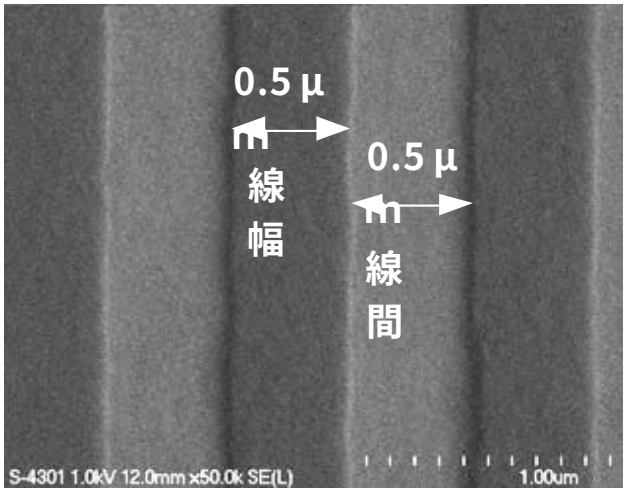


図３-３１.試作した０.５μmライン&スペース

図３-３２はこれを用いて得られた4.976GHzの共振器の高周波通過特性（S_{21}）である。この周波数は2.488GHzの2倍にした共振器の例であるが、このような高い周波数がダイヤモンドＳＡＷデバイスを用いれば、ハーフミクロンで直接発振可能であることが実証出来た。

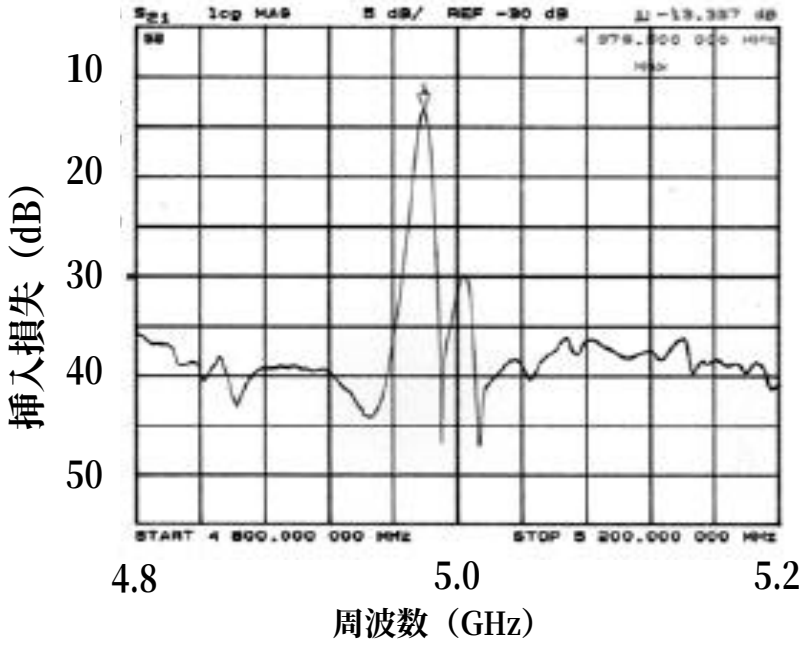


図３-３２．　5GHzフィルタのＳ21特性（f0=4.978 GHz, Q=650, loss=13.4 dB）

3-5.まとめ

本章では、高周波ダイヤモンドＳＡＷデバイスを作製するための材料及びプロセスについて述べた。

まずダイヤモンド合成については、実用化を考えて大面積合成に有利なフィラメントＣＶＤを採用した。従来の応用と大きく異なるのは3インチΦで1mm厚以下のウェハ状のダイヤモンド合成となるため反りを低減することであった。そのために合成に関しては、設備上の検討を中心に行った。即ち、電力制御や排気系を改善して、基板の温度制御をおこない、3インチで反りが20μm程度のウェハを合成した。また研磨についての課題は、薄膜電極を歩留りよく形成するため表面欠陥密度を低減することにあった。ダイヤモンド砥粒を用いた乾式研磨を採用し、粗研磨とファイン研磨に分けて研磨することにより、欠陥密度が6個／cm^2の微細加工可能なウェハを得ることに成功した。また実際にデバイス作製の結果をフィードバックしながら、伝搬損失低減に取組み、ラマン分光のダイヤモンドピークのFWHMと強い相関があることを見つけた。そして微粒ダイヤモンドを合成し、伝搬損失が0.02dB／λと極めて良好なウェハを得ることが出来た。

次に圧電薄膜としてＳＡＷデバイスの特性を決めるZnO薄膜について、マグネトロンスパッタリングによる成膜について検討した。挿入損失低減のために、バイアス印加によりｃ軸配向性を向上させる事と、異常成長領域を減らすために、RTAアニールを用いた２段階成長方式を開発し、良好なZnOを作製することが出来た。

またＳＡＷデバイスを作製するための一連のウェハプロセス及び実装プロセスを開発した。通常のＳＡＷデバイスにない工程としては、YAGレーザーによりダイヤモンドを除去した後にダイシングするチップ化工程を導入した。またダイヤモンド特にＳＡＷデバイス特性に影響を及ぼす線幅制御について、反応性イオンエッチングを用いたアルミ系電極のエッチングについて、ZnOの上に5nmの薄いSiO_2エッチングストップ層を導入することと、BCl_3にCl_2を添加することで、線幅制御できるようになり、ハーフミクロンの電極形成が出来た。

以上により、2～5GHzの高周波ダイヤモンドＳＡＷデバイスを作製することができるようになった。

3章　参考文献

［1］ N.Fujimori, New Diamond 3, 20(1987)

［2］ R.S.Sussmann, J.R.Brandon, G.A.Scarsbrook, C.G.Sweeney, T.J.Valentine, A.J.Whitehead and C.J.Wort, Diamond and Related Materials, 3, 303 (1994)

［3］ M.Kamo, Y.Sato, S.Matsumoto and N.Setaka, J.Cryst.Growth, 62, 642 (1983)

［4］ A.R.Badzian, B.Simonton, T.Badzian, R.Messier,K.E.Spear and R.Roy, Proc.SPIE, 683, 127 (1986)

［5］ H.Kawarada, K.S.Mar and A.Hiraki, Jpn.J.Appl.Phys., 26, L1032 (1987)

［6］ B.V.Spitzyn, L.L.Bouilov and B.V.Derjaguin, J.Cryst. Growth, 52,219 (1981)

［7］ S.Matsumoto, Y.Sato,M.Kamo and N.Setaka, Jpn.J.Appl. Phys., 21, L183 (1982)

［8］ H.R.Thorsheim, G.Celii, J.E.Butler, L.S.Plano and J.M.Pinneo, New Diamond Science and Technology, MRS, Pittsburgh, 207 (1991)

［9］ K.Suzuki, A.Sawabe, H.Yasuda and T.Inuzuka, Appl. Phys. Lett., 50, 728 (1987)

［10］ N.Otake, H.Tokura, Y.Kuriyama, Y.Mashimo and M.Yoshikawa, Int'l Symp Diamond and Diamond-like Films., The Electrochemical Society, 89-12, 93 (1989)

［11］ S.Matsumoto, J.Mater.Sci. Lett.,4, 600 (1985)

［12］ S.Matsumoto,M.Hino and T.Kobayashi, Appl.Phys.Lett., 51, 737 (1987)

［13］ P.K.Bachmann and W.Enckevort, Diamond and Related Materials, 1, 1021 (1992)

［14］ P.K.Bachmann, D.Leers and H.Lydtin, Diamond and Related Materials,1,1 (1992)

［15］ C.Wild, R.Kohl, N.Herres, W.Muller-Sebert, and P.Koidl, Diamond and Related Materials, 3, 373 (1994)

［16］ J.Kushibiki and N.Chubachi, IEEE Trans.Sonics and Ultrasonics, SU-32, 189 (1985)

［17］ J.Kushibiki,N.Akashi, T.Sannomiya,N.Chubachi and F.Dunn, IEEE Trans.ltrason. Ferroelec. Freq.Contr., 42, 1028 (1995)

［18］ S. Shikata, H. Nakahata, A. Hachigo, and N. Fujimori, Diamond and Related Materials, 2, p. 1197˜1202 (1993)

［19］ S. Fujii, Y. Seki, K. Yoshida, H. Nakahata, K. Higaki, H. Kitabayashi and S. Shikata,　IEEE Ultrason. Symp.Proc., p. 183˜186 (1997)

［20］ M.H.Brodsky, Light Scattering in Solids 1, Springer- Verlag, Berlin (1975)

［21］ R.J.Nemanich and S.A.Solin, Phys.Rev., B20,392 (1979)

［22］ F.Tuistra, and J.L.Koenig, J.Chem. Phys., 53. 1125 (1970)

［23］ M. Yoshikawa,G.Katagiri, H.Ishida, A.Ishitani, M.Ono and K.Matsumura, Appl. Phys. Lett. 55, 2608(1989)

［24］ M. Yoshikawa, H.Ishida, A.Ishitani, S.Koizumi and T.Inuzuka,
Appl. Phys. Lett. 58, 1387(1991)
［25］ S.Fujii, S.Shikata, T.Uemura, and H.Nakahata,
IEEE Electronic Materials, to be submitted March., 2004
［26］ T.Uemura, S.Fujii, H.Kitabayashi, K.Itakura, A.Hachigo, H.Nakahata and S.Shikata,
Jpn. J. Appl. Phys., 41, 3476 (2002)
［27］ T,Shiosaki, S.Ohnishi and A.Kawabata, J.Appl. Phys., 50, 3113 (1979)
［28］ S.Fujishima, Proc. IEEE Ultrasonics Symp., 87 (1990)
［29］ M.Kadota, C.Kondo, T.Ieki and T.Kasanami, Jpn.J.Appl.Phys., 29, 159 (1990)
［30］ M.Kadota, T.Kasanami and M.Minakata, Jpn.J.Appl. Phys., 31, 3013 (1992)
［31］ N.Fujimura, T.Nishihara, S.Goto, J.Xu and T.Ito,
J.Cryastal Growth, 130,269 (1993)
［32］ L.Mang and F.S.Hicknernell, Proc. IEEE Ultrasonics Symp.,363 (1996)
［33］ A.Hachigo,H.Nakahata,K.Higaki, S.Fujii, and S.Shikata,
Appl.Phys.Lett.,65,2556 (1994)
［34］ H.F.Winters and H.J.Coufal, J.Vac.Sci.& Technol., A11, 657 (1993)
［35］ H. K. Kim and M.Mathur, J. Electic. Mat. 22, 267(1993)
［36］ N. Fujimura, J. Crystal Groth 130, 269(1993)
［37］ N.Hosaka, A.Yuhara, H.Watanabe, J.Yamada, and M.Kajiyama,
Jpn.J.Appl.Phys., 27, 175 (1988)
［38］ J.Yamada, N.Hosaka, A.Yuhara and A.Iwama,
IEEE Ultrasonics Symp. Proc., 285 (1988)
［39］ A.Kamijyo, J.Appl. Phys.,77, 3799 (1995)
［40］ T.Nishihara, O.Ikata, Y.Sato, IEEE Ultrasonics Symp.Proc. 383 (1995)
［41］ K. M. Lakin, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques,
MTT-22, 418 (1974)
［42］ 廣田、中村、第14回超音波エレクトロニクスシンポジウムUSE93
講演予稿集269(1993)
［43］ J.L.Vossen, J.Electrochem. Soc., 126, 319 (1979)
［44］ H.Sawai, N.Fujiwara, T.Ogawa, M.Yodeda and K.Nishioka,
11th Symp. Dry Process, Proc.126 (1985)

第４章　ダイヤモンドＳＡＷデバイスの特性評価

４-１．はじめに

これまで、２章ではダイヤモンド系ＳＡＷデバイス用材料のシミュレーションを行い、狭帯域材料系及び広帯域材料系ともに、優れたＳＡＷパラメータが得られることがわかった。

３章では、その内狭帯域材料系として、比較的成膜が容易と思われるZnO圧電薄膜の成膜と、温度補償用のSiO_2薄膜の成膜の検討を行った。そしてそれらを用いたSiO_2／ZnO／ダイヤモンド系ＳＡＷデバイスのプロセス開発について述べた。

本章では、シミュレーションの妥当性を確認するために、まずZnO／IDT／ダイヤモンドとIDT／ZnO／ダイヤモンドの２つの構造について、位相速度及び電気機械結合係数の計測と、シミュレーションとの比較を行った。

そして実際にダイヤモンドＳＡＷで高周波化が可能であるかの確認を、2.5から5GHzまでの周波数で行なった。

次にZnO／ダイヤモンドにSiO_2を積層した場合の温度補償について検討した。また実用上重要な２次係数についてデバイスを実装して、計測した。２次係数については ZnO及びSiO_2の膜厚を実験的に最適化を行い、SiO_2／ZnO／ダイヤモンド系が温度特性について従来の水晶を大きく凌駕することを見いだした。

最後に、ＳＡＷデバイス自体の課題でもある耐電力性について、高温での加速実験を行い、ダイヤモンド系ＳＡＷデバイスが従来材料を大きく凌駕することを見いだした経緯について述べる。

４-２．基本特性の評価

作製したＳＡＷフィルタの特性から、ＳＡＷの基本特性である位相速度と電気機械結合係数について、シミュレーション結果との比較検討を行ったので、その結果について述べる。まず始めにパラメータの高周波特性からの求め方について記す。作製したＳＡＷデバイスのウェハを、オンウェハの状態のままで、高周波プローバを用いて各々のデバイスに直接高周波の針を当て、ネットワークアナライザにより高周波のＳパラメータを測定した。位相速度は２章に示したようにS_{21} のピークの周波数f_0 から、次式で求められる。

$$f_0 = V／\lambda \qquad (4-1)$$

電気機械結合係数は、S_{11}から求められるGを用いて次式で求められる［1］。

$$K^2 = G / (8 f_0 C N^2) \quad (4-2)$$

ここで、G、C、Nは各々最大コンダクタンス、IDT間容量、IDT対数である。

まずZnO／IDT／ダイヤモンドとIDT／ZnO／ダイヤモンドの２つの構造について、ZnO膜厚を変えて1GHzのテストデバイスを作製し、高周波特性を測定し、位相速度を求めた。それを規格化膜厚kh_{ZnO}でプロットした結果を、２章のシミュレーション結果と併せて、図４-１に示す。（ａ）のZnO／IDT／ダイヤモンドでは、０次と１次モード波がはっきり観測される。２次モードについては、電気機械結合係数が小さいため観測されない。IDT／ZnO／ダイヤモンドでは、２次の電気機械結合係数が大きいため、０次、１次及び２次モード波が観測される。それらの位相速度については、（ｂ）のIDT／ZnO／ダイヤモンドについては、シミュレーション線上に完全に一致する位相速度が得られ、ZnO／IDT／ダイヤモンドについてはシミュレーション線より概ね1～2%程度低い数値を示すが、大変によい一致を示す。これらからダイヤモンドの高速性は、結晶性にさほど大きく左右されないものと考える。IDTサイズと周波数をプロットして、従来材料と比較すると図４-２のようになり、同じ線幅のIDTでほぼ2、3倍の周波数を得られることがわかり、ダイヤモンドの高周波化の優位性が実証できたと考える［2,3,4］。

次に電気機械結合係数について、同様のプロットをおこなった結果を図４-３に示す。（ａ）のZnO／IDT／ダイヤモンド構造では、シミュレーションと実験結果がよい一致を見ており、１次モードで1.4から4.8%と大きな値を取る。（ｂ）のIDT／ZnO／ダイヤモンド構造では、２次モードのkh_{ZnO}=1.0付近でシミュレーションで1.2%、実測でもう少し大きな1.4%程度の値が得られている。これについてもシミュレーションと概ねよい一致を示していると考えられる。

以上より、ZnO／ダイヤモンド系を用いて位相速度と電気機械結合係数の測定を行い、シミュレーションと実測に、良好な一致が見られることを検証した。

４-３．温度特性の評価

次に温度特性について評価した。温度特性TCFは、温度の関数として、下記のように表される。

$$TCF = a T + b T^2 + c T^3 \quad (4-3)$$

通常のＳＡＷ材料では１次係数が大きく、その場合２次係数以下は隠れてしまって１次係数のみが観測される。１次係数が零になると２次係数が観測され、ATカット水晶振動子のように、さらにそれも零となって、３次係数が観測されるものもある。

２章で見たようにSiO_2を積層することにより、ZnO／ダイヤモンドの温度特性をキャンセルして１次温度係数を零にすることができることが予想される。まずここではSiO_2／ZnO／ダイヤモンド系の温度特性について、１次温度係数が零になるか否かの実証をおこなった。１次温度係数が零になると、２次温度係数が観測され周波数と温度の相関を見ると２次関数になるが、ここではその２次温度係数を求めた。
温度特性の実測は、実装後パッケージに封止した最終デバイスの形にて行った。デバイスを恒温チャンバに入れ、温度を変えて一定に安定してから高周波測定を行った。測定温度は0℃、25℃、40℃、60℃、80℃の５点測定した。

まずは１次係数についてSiO_2を成膜していった時の温度係数について調べた結果を図４-４に示す。

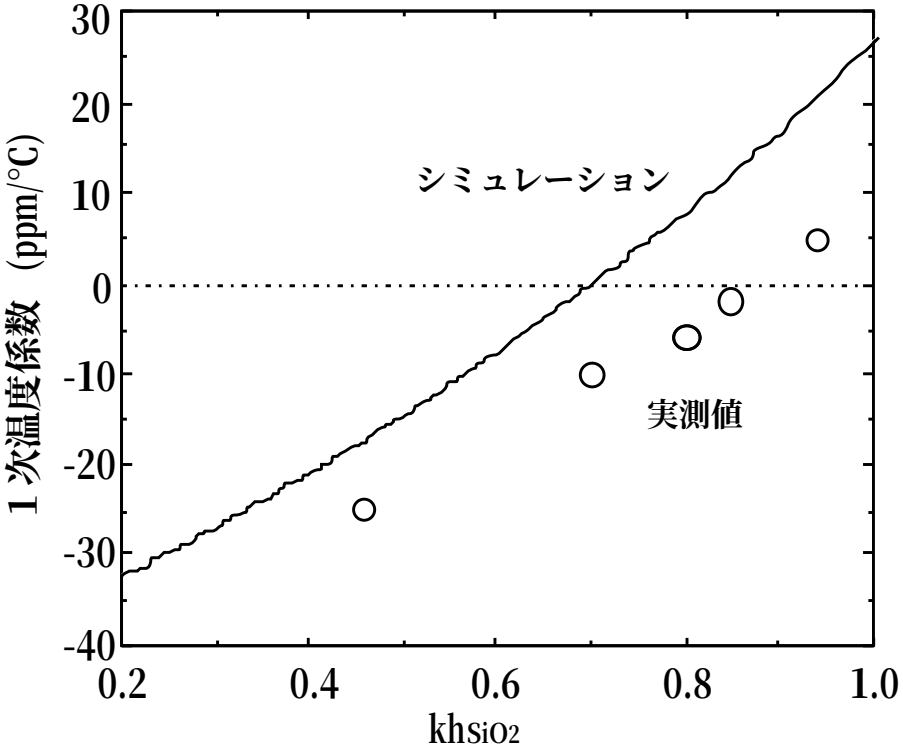


図４-４． SiO_2による温度補償

図から見られるように、SiO_2でZnO／ダイヤモンドの温度特性を補償し、この例ではkh_{SiO_2}=0.86の時に零温度係数となる。合わせて示したシミュレーションの結果と較べると、約30%程度膜厚増で補償されている事がわかる。これはSiO_2が実際には、スパッタリングによる成膜で完全なアモルファスである事による材料定数の差に起因すると考えられる。いずれにしても、予想通りSiO_2でZnO／ダイヤモンドの温度特性を補償し１次温度係数が零になる条件が存在する事がわかった。

そこで次に問題になるのが、２次温度係数である。温度に対してパラボリックな特性が得られる。その一例を図４-５に示す。係数を求めるには、温度を４～６点変えて周波数を測定し、２次曲線でフィッティングして、２次係数を求める。

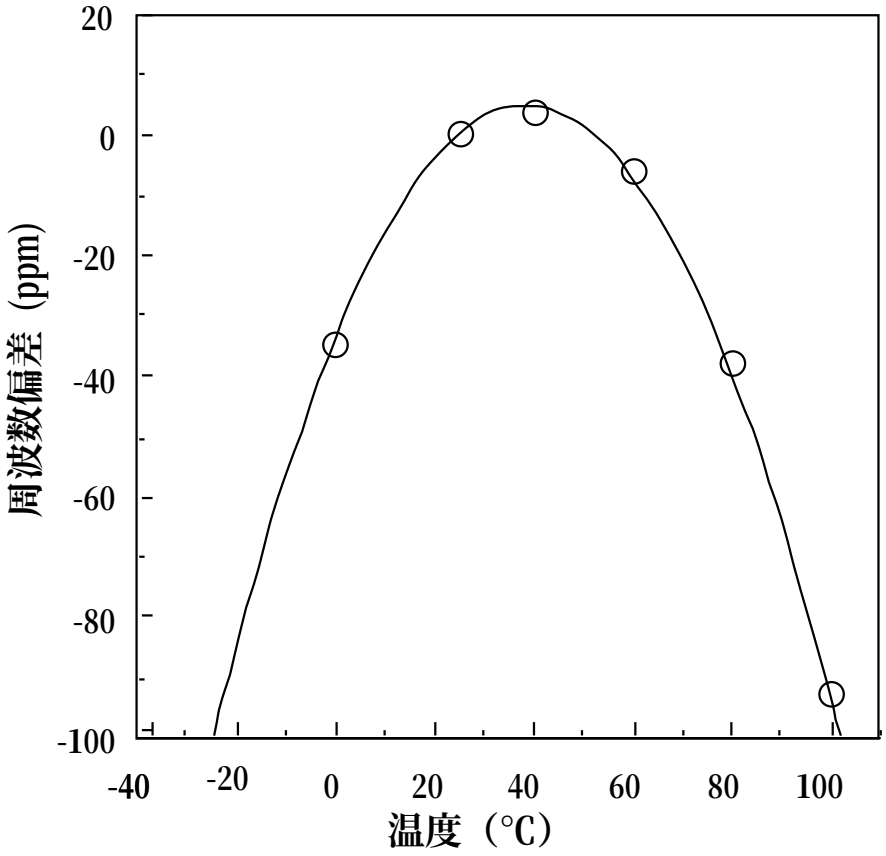


図４-５．２次係数が表れている温度特性例

実際に試作したSiO_2／ZnO／ダイヤモンド構造ＳＡＷデバイスの中で、温度特性の良好なデバイスの典型的な温度特性を図４-６に示す［5,6］。温度変動は-40～85℃で90ppmに収まっており、STカット水晶の130ppm、36Yカット水晶の200ppmに比べて小さいという特徴を有する［7,8,9］。水晶が様々な用途に好んで用いられるのは、この温度特性にあるが、ダイヤモンドＳＡＷフィルタでは、温度特性がさらに良く、高周波化が容易で、しかも電気機械結合係数が大きなものまで得られるという事で、幾十もの利点がある。狭帯域用フィルタや共振器など狭帯域用途に適している他、狭帯域のRFフィルタ、温度変動を抑えたいIFフィルタなどへ適していると考えられ、水晶の高周波版として期待できる。

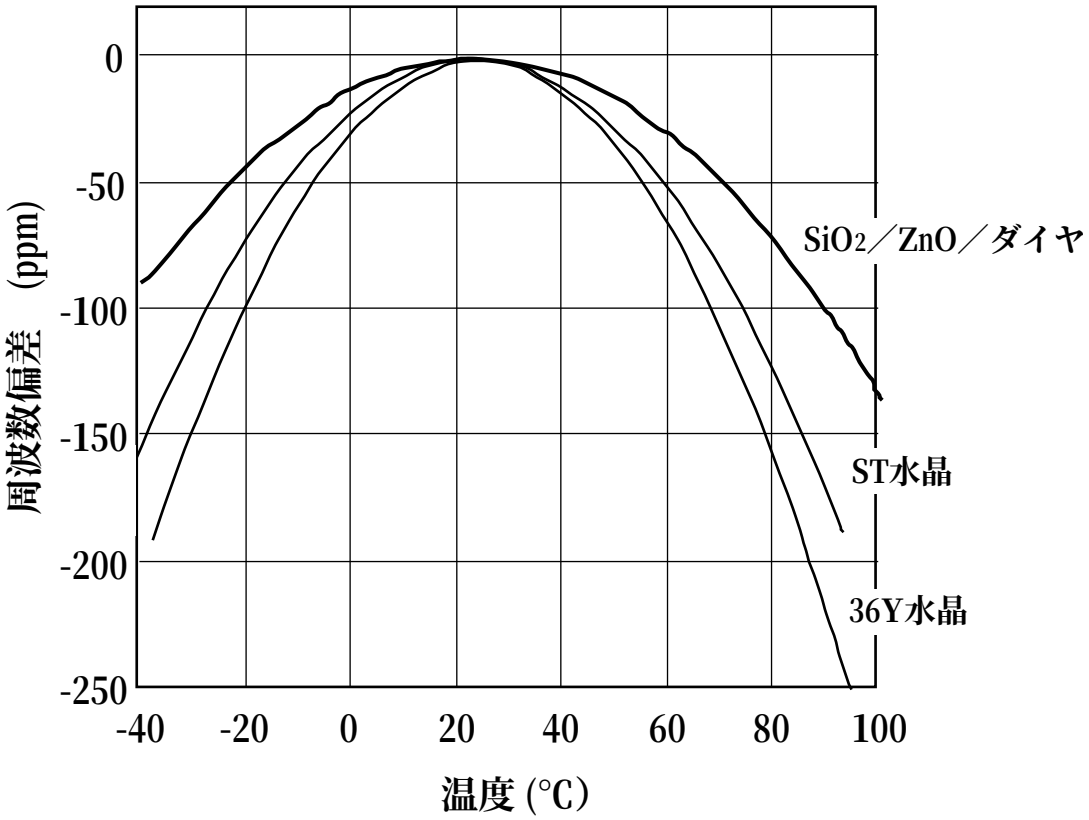


図４-６． SiO_2／ZnO／ダイヤモンド系の温度特性

さてこうした用途に展開する場合に、特に共振器用途を考えると、さらに温度特性がよいと好ましいのはいうまでもない。ここでは温度特性をさらに改善した内容について述べる。温度係数の組み合わせはダイヤモンド、ZnO、$AlCu_{0.5\%}$電極とSiO_2の組合せである。温度特性を改善するためには膜厚の組み合わせを変えればよいが、ダイヤモンドは厚みが充分でないと位相速度が大幅に落ちるために変更できず、$AlCu_{0.5\%}$電極は厚みが30nm程度と薄く、抵抗損や反射係数に大きく影響するために、これも変更しにくい。そこでZnOとSiO_2の膜厚の組合わせを変えて、実験を行った。

その結果を表４-１に示す［10,11］。

表４-１.ZnOとSiO_2の膜厚の組合わせと２次温度係数

ZnO膜厚	SiO_2の膜厚	２次温度係数
0.78	0.65	-0.022
0.88	0.74	-0.019
1.21	0.91	-0.017

こうして最適化する事により、２次温度係数で-0.022から-0.17ppm／$℃^2$まで改善する事ができた。-40～85℃の温度変動では70ppm以下に収まる。これは温度特性に優れ

るSTカット水晶の-0.034～-0.039に較べてに較べて半分のレベルにあり、高周波で使われる事の多い３６Ｙカット水晶の0.05～0.056に較べると約1／3になる。

表４-２に零温度係数の材料である水晶と総合比較をしたものを示す。位相速度、電気機械結合係数、温度特性と、いずれのパラメータにおいても、SiO_2／ZnO／ダイヤモンド構造は、水晶を完全に凌駕する値を有し、狭帯域高周波用途材料として素晴らしい材料系であるという事が判る。

表４-２．狭帯域用ＳＡＷ材料パラメータの比較

	弾性波	位相速度 m/s	K^2 %	２次温度係数 -ppm/°C^2
SiO_2/IDT/ZnO/ ダイヤモンド	2nd Sezawa	9000	0.4	0.020～0.025
SiO_2/ZnO/IDT ダイヤモンド	1st Sezawa	10000	1.4	0.018～0.025
STカット水晶	Rayleigh	3160	0.12	0.034~ 0.039
36Y カット水晶	SH	5100	0.10	0.050~ 0.056

４-４．耐電力特性の評価

以上、２章でシミュレーションにより予想した特性、即ち高周波化を実現する位相速度と電気機械結合係数についてについて、実際のデバイスでの数値を検証した。また温度特性については、実験により２次係数を求め、さらにそれを最適化して、水晶より優れた温度特性が得られる事を実証した。

次に本項では、ＳＡＷ伝搬特性のシミュレーションでは検討できない耐電力性についての評価結果について述べる。

最近、通信機器、特に携帯機器の大電力化が進み、電子部品も対応を求められており、ＳＡＷデバイスもその例外ではない。ＳＡＷデバイスは微細加工したAl系の電極を用いるため耐電力に劣るため、様々な工夫が電極材料や構造になされているが、これまで材料面からこの課題に取り組んだ例はない。

本研究で、ダイヤモンド系ＳＡＷデバイスを検討するに当たって、ダイヤモンドが物質中で最も熱伝導率が高く、半導体レーザーなどのヒートシンク材料として用

いられる事から、本材料系は耐電力性に富むのではないかと考え、それを実証する事にした。

（ａ）実験方法

ZnO／ダイヤモンドと、従来耐電力用途に使用されている$LiTaO_3$と、対等の比較を行うため、同一線幅にて比較検討を行った。実験の条件を表４-３に示す。

表４-３.耐電力性実験に用いた素子の作製条件と特性

項目	$LiTaO_3$	ダイヤモンド
材料	Xカット-112度伝搬	ZnO／ダイヤモンド
構造		
電極	$AlSi_{2\%}Cu_{0.5\%}$ 80nm	$AlSi_{2\%}Cu_{0.5\%}$ 80nm
線幅	１μｍ	１μｍ
設計	トランスバーサル型 30対	トランスバーサル型 30対
位相速度　m/s	3,290	10,000
電気機械結合係数　%	0.64	1.4
中心周波数　MHz	822	2896
挿入損失　ｄＢ	１６.５	１７.５

表に示したように、１μｍ線幅のトランスバーサル型フィルタを作製した。線幅が同一のため位相速度を反映して、周波数は$LiTaO_3$が822MHz、ZnO／ダイヤモンドが2896MHzと3倍強になる。得られたフィルタの挿入損失はほぼ同等の17dB程度となった。この損失が高周波電力から熱に変換されるエネルギとなる。これらのデバイスについて電力を投入し計測をおこなった。計測系を図４-７に示す。アンプして、デバイスに高電力を投入した後、アテネータでパワー減衰させ、ネットワークアナライザにて計測をおこなった。まず両方のベアデバイスを大気中120℃で高電力を印加していくと、$LiTaO_3$は23dBm以上の入力で線型性がなくなり、28dBmで素子特性が大きく劣化することがわかった。それに対してダイヤモンドの場合は、アンプ限界の36dBmまで異常は認められなかった。順次電力を変えて計測を行った過程の高周波通過特性（S_{21}）を図４-８に示す。

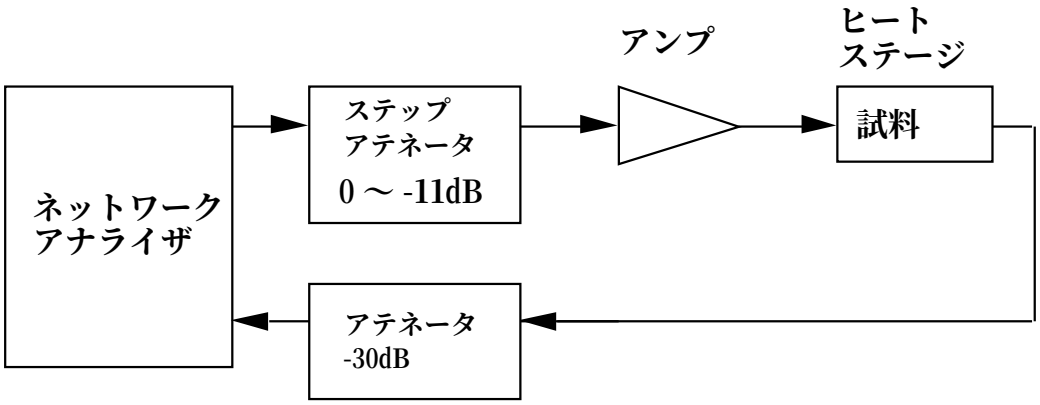


図４-７． 耐電力性の計測系

ダイヤモンドに36dBm、$LiTaO_3$に28dBm印加した後の、フィルタ電極部分のFE（Field　Emission）SEM写真を図４-９に示す。$LiTaO_3$は28dBm印加で電極が破壊されて融解しているのが見られる。明らかに電力が熱に変換してダメージを受けているのが見て取れる。しかも結晶にクラックが大きく入っているのがわかる。一方ダイヤモンドは36dBm印加後も変化が見られない。実は、これは当初の予想を遥かにこえたものであった。この理由については後述する。

次にこれらの素子をパッケージに実装したものを用いて加速劣化試験を行った。加速温度は120℃であり、かなり厳しいものである。劣化の定義は、損失が0.5dB低下したところを持って寿命と定義した。その結果を入力電力と寿命でプロットしたものを図４-１０に示す。

この図から見られるように、$LiTaO_3$では27dBm程度の電力印加を数時間印加しただけで寿命となる事がわかる。一方、ダイヤモンドでは34dBm印加の場合でも10時間以上もつなど、$LiTaO_3$の約8倍の電力に耐える結果が得られた。これを同一周波数（電極線巾はダイヤモンドが約3.5倍大きい）で比較したものを図４-１１に示す。補助線は従来の$LiTaO_3$デバイスの結果からわかっている寿命線をいれたものであり、ダイヤモンドもそれに従うと仮定して、補助線を入れた［12,13,14］。これから、ダイヤモンド系は従来材料系に比較して、まさに桁違いの耐電力性を有する事が予想される［15,16］。

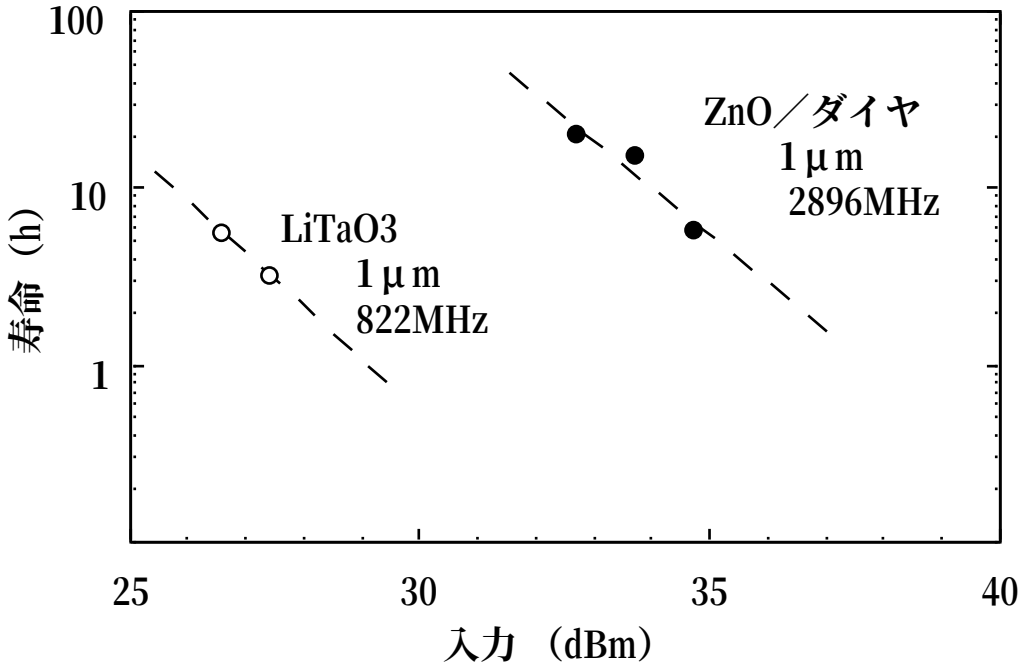


図４-１０． 高電圧印加時の加速劣化試験結果加速温度（120℃）

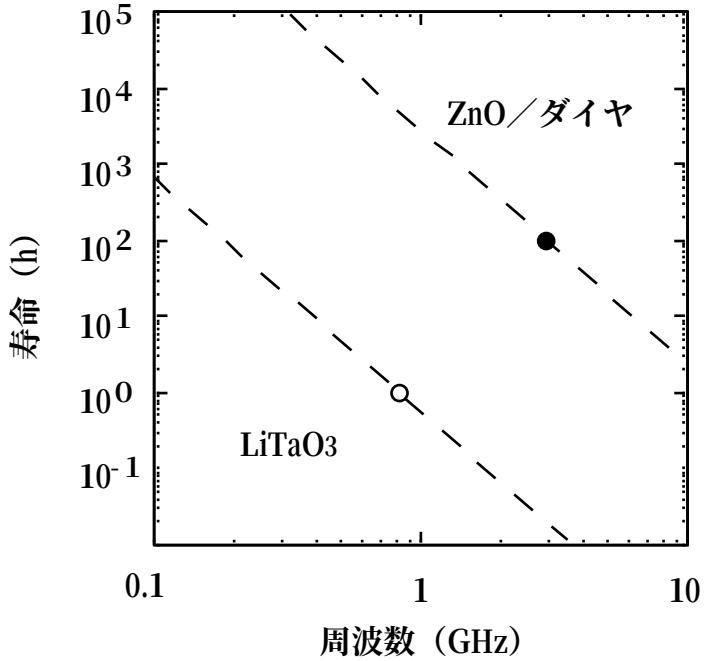
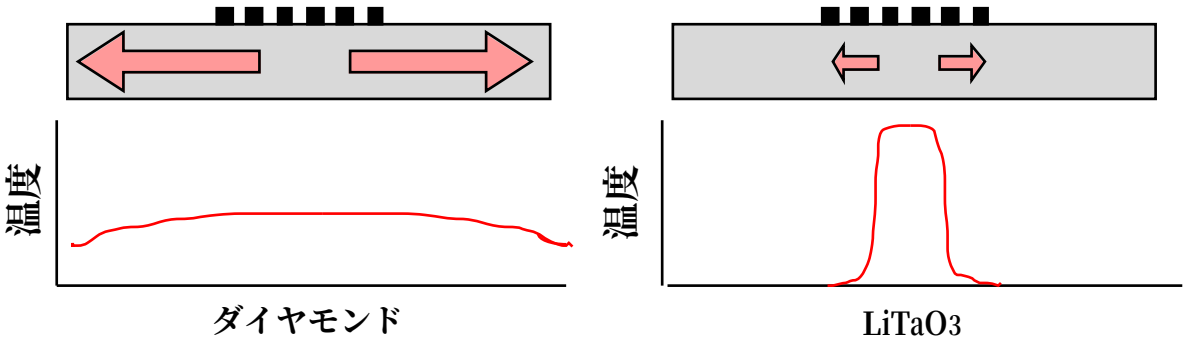


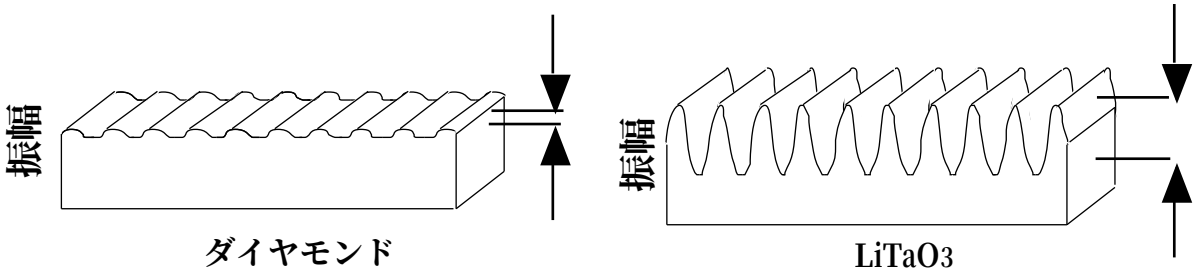
図４-１１． 寿命の周波数依存性（加速温度120℃）

この原因として、高い熱伝導率と弾性定数を原因として考えている。図４-１２にその様子を模式的に示す。まず熱伝導率であるが、ダイヤモンドはヒートシンクとして用いられる材料で、物質中最も熱伝導のよい事が知られている。もちろん本研究で用いたダイヤモンドは薄膜であり、バルクに比較して熱伝導率は半分程度に低下するが、それでも5cm^2/sの高い熱拡散率を有する［16］。それに対して$LiTaO_3$は

0.013cm^2/sであり［17］、ダイヤモンドのおよそ400分の1である。このため、模式図に示すように電力が熱に変換した後、拡散せずにAl系電極にダメージを与えるものと推測される。一方、本研究のきっかけの一つでもあるが、極めて当然の事ながら、ダイヤモンドは弾性定数が高い。３章の表３-１に示したように、$LiTaO_3$の弾性定数（$\times 10^{11}$ N/m^2 ）がC_{11}=2.298　C_{13}=0.812　C_{33}=2.798　C_{44}=0.968であるのに対し、ダイヤモンドは各々C_{11}=10.8　C_{12}=1.25　C_{33}=10.8　C_{44}=5.76と、概ね5倍程度あり、模式図に示すように波の振幅が小さく、物理的にAl電極に及ぼす影響が小さい事が推定される。



（ａ）熱伝導起因



（ｂ）振幅起因

図４-１２．ダイヤモンドと$LiTaO_3$の耐電力性の差を説明する模式図

現在ＳＡＷフィルタは、電極線巾が小さくなる事により耐電力性が低下するため高周波化に問題があり、電極のマイグレーション防止のためCu添加やCuやTi系を積層化する事によって改善の努力がなされているが、高周波化には限度がある。ダイヤモンドを用いればこういった問題は一気に解決するものと思われ、従来材料では不可能な高出力送信用フィルタなどへの展開が期待される。　用途としては、衛星や移動体通信にGHz帯で数W入力可能な送信用フィルタなどが考えられ、現在誘電体

フィルタでしか対応できない高周波＆高出力用途に、ダイヤモンドＳＡＷフィルタが適応できると考えられる。またこの性質は、必ずしも高周波だけでなく、従来材料で適応可能な低周波（例えば1～2GHz）でも、ダイヤモンドＳＡＷフィルタの適応できるところがあるものと考えられる。

４-５． 伝搬損失

これまでに位相速度、電気機械結合係数、温度特性、耐電力性などについて検討したが、最後に実用上で挿入損失を決める重要因子である、伝搬損失について検討した結果について述べる。なお、ここで伝搬損失はテストデバイスで入出力IDT間の距離を50λ、100λ、150λと変えて高周波通過特性Ｓ21の挿入損失を測定し、その傾きから計算した。

ダイヤモンドの合成を、伝搬損失に関して最適化した結果については、既に３章で詳しく述べたので、ここでは省略し、構造の違いの影響について述べる。比較したのはIDTとZnOの上下関係で、ZnO／IDT／ダイヤモンドとその逆であるIDT／ZnO／ダイヤモンド、そしてそれらにSiO_2を積層したSiO_2／ZnO／IDT／ダイヤモンドとその逆のSiO_2／IDT／ZnO／ダイヤモンドの４つの構造である。　図４-１３に、単位波長当たりの伝搬損失の周波数依存性として示す。微粒ダイヤモンド上のデバイスは構造を限定して作製していて比較にはならないが参考までに図示する。これから一目瞭然であるが、IDT上にZnOを成膜した構造では、伝搬損失が非常に大きいことがわかる。これはプロセスとして、IDT形成した後にZnOを成膜するために、膜質に問題があると考えられる。実際にそのデバイスの断面をFESEMで見た写真を図４-１４に示す。IDT端部から成長したZnOが斜めになり、境界線が見えるが、こういう一種の結晶粒界によってＳＡＷが散乱されて、伝搬損失増加となって現れるものと考えられる。なお図４-１３に従来ＳＡＷデバイスにおける伝搬損失の報告されたデータを記載したが［18,19,20］、これらの値から考えても本研究で得られたZnO／ダイヤモンド系やSiO_2／ZnO／ダイヤモンド系ＳＡＷの伝搬損失は同等かそれよりも小さい良好な数値を示すことがわかる［10,11］。

以上より、温度特性、伝搬損失を併せて考えるとSiO_2／IDT／ZnO／ダイヤモンドは、電気機械結合係数はその逆構造より低いが、実用上優れていると言うことが出来る。

４-６.信頼性

最後に、デバイスの信頼性について述べる。ＳＡＷデバイスはDC通電がないため半導体デバイスのようにエレクトロマイグレーションはないが、RF通電時の弾性波振幅による劣化やストレスマイグレーションが存在する。本研究で検討したダイヤモンドＳＡＷデバイスは、いくつかの観点から信頼性について懸念点があった。即ち、積層構造による問題と、高周波狭帯域用であること自体の問題点である。ダイヤモンドＳＡＷに関しては、高温保存試験で周波数が変動するという問題点があった。図４-１５（ａ）が始めに得られていた高温保存試験の周波数依存性の結果である。広帯域用としては、この程度の周波数変動は全く問題にはならないが、狭帯域用では周波数ずれは致命的ですらある。

この問題に対し、デバイス及びパッケージに付着したH_2Oが、高温保存に伴いデバイス表面に付着し、周波数低下させるという事を見いだした。それに対して、デバイス及びパッケージのシーム封止前ベーキングを導入する事で、図４-１５（ｂ）に示すようにクリアした。以上より、ダイヤモンドＳＡＷフィルタは、最も厳しい規格といえるSONET（Synchronous Optical Network）規格に関して、表４-３に示す機械的試験（振動試験、衝撃試験）、電気的試験（静電破壊）、保存試験（熱サイクル、高温保存、高温恒湿、熱衝撃、低温保存）、はんだ耐性試験など全項目で満足する事が出来た。

４-７．まとめ

以上、本章では、シミュレーションで求めたデバイスの基本性能の妥当性を実験により確認するための検討を行った。

まずZnO／ダイヤモンド系の２つの構造の位相速度及び電気機械結合係数の計測とシミュレーションとの比較を行い、位相速度は2%以内の精度で合致し、高周波化が可能あることを明らかにした。そして実際にダイヤモンドＳＡＷで高周波化素子を作製し、2.5から5GHzまでの高い周波数デバイスを作る事に成功した。電気機械結合係数についてもシミュレーションとほぼ一致する事を、実験的に証明した。

次に温度補償については、ZnO／ダイヤモンドにSiO_2を積層した場合、シミュレーションより約30%膜厚を増やすことで、１次係数を零にできることを確認した。また実用上重要な２次係数については、ZnO及びSiO_2の膜厚を実験的に最適化を行い、SiO_2／ZnO／ダイヤモンド系が-0.017ppm／$℃^2$の２次係数を有し、従来の水晶の1／2以下となり、大きく凌駕することを見いだした。

またＳＡＷデバイス自体の課題でもある耐電力性について、高温での加速実験を行い、ダイヤモンド系ＳＡＷデバイスは従来材料より桁違いに優れることを見いだした。これは弾性定数が高くＳＡＷ波の振幅が小さく、電極にダメージが少ないことと、熱伝導率が高く、電力から熱に変換されたエネルギがIDTの部分から素早く放出されることと推測される。

伝搬損失の観点からは、ダイヤモンド上にZnOを成膜するSiO_2／IDT／ZnO／ダイヤモンドが優れていることがわかった。

最後に信頼性試験と対策を行い、最も厳しい規格を満足する事が出来た。

以上、ZnOを圧電材料として用いたダイヤモンドＳＡＷは、シミュレーション通り高周波化が可能であり、また耐電力に富むこと、そしてSiO_2で温度補償すると水晶より温度特性に優れることを見いだした。伝搬損失の観点も考慮し、SiO_2／IDT／ZnO／ダイヤモンドが優れていることがわかった。

４章　参考文献

［1］ C.Campbell, Surface Acoustic Wave Devices and Their Signal Processing Applications, Academic Press (1989)

［2］ S. Shikata, H. Nakahata, A. Hachigo, and N. Fujimori, Diamond and Related Materials, 2, 1197 (1993)

［3］ S. Shikata, H. Nakahata, K. Higaki, A. Hachigo, and N. Fujimori, IEEE Ultrasonics Symp.Proc., 277 (1993)

［4］ H. Nakahata, K. Higaki, A. Hachigo, S. Shikata, N. Fujimori, Y.Takahashi, T. Kajiwara and Y. Yamamoto, Jpn. J. Appl. Phys., 33,324 (1994)

［5］ S.Shikata, H.Nakahata, K.Higaki, S.Fujii, A.Hachigo, H.Kitabayashi, Y.Seki, K.Tanabe and N.Fujimori, 3rd Int'l Conf. Appl. of Diamond Films and Related Materials, Proc, 21(1995)

［6］ H. Nakahata, H. Kitabayashi, S. Fujii, K. Higaki, K. Tanabe, Y. Seki and S. Shikata, IEEE Ultrason. Symp. Proc., 285 (1996)

［7］ Y. Yamamoto, H. Takado, Y. Yamada, N. Sakairi, Y. Takahashi, R. Kajihara, K. Tomotsune and H. Komiya: NEC Tech. Rep. 45, 97 (1992)

［8］ T. Nishikawa, A. Tani, C. Takeuchi and J. Minowa, Jap. J. Appl. Phys. 20-4,29 (1981)

［9］ T. Nishikawa, A. Tani, K. Shirai and C. Takeuchi, Freq. Control Symp, Proc., 286 (1980)

［10］鹿田、中幡、藤井、八郷、北林、上村、板倉、圧電材料・デバイスシンポジウム　55、（2003）

［11］ S.Shikata, H.Nakahata, S.Fujii, T.Uemura, Y.Takada, T.Kano, N.Itoh, and O.Iwamoto, 2nd Int'l Symp. Acoustic Wave Devices for Future Mobile Comm.Systems, Proc., 89 (2004)

［12］ N.Hosaka, A.Yuhara, H.Watanabe, J.Yamada, and M.Kajiyama, Jpn.J.Appl.Phys., 27, 175 (1988)

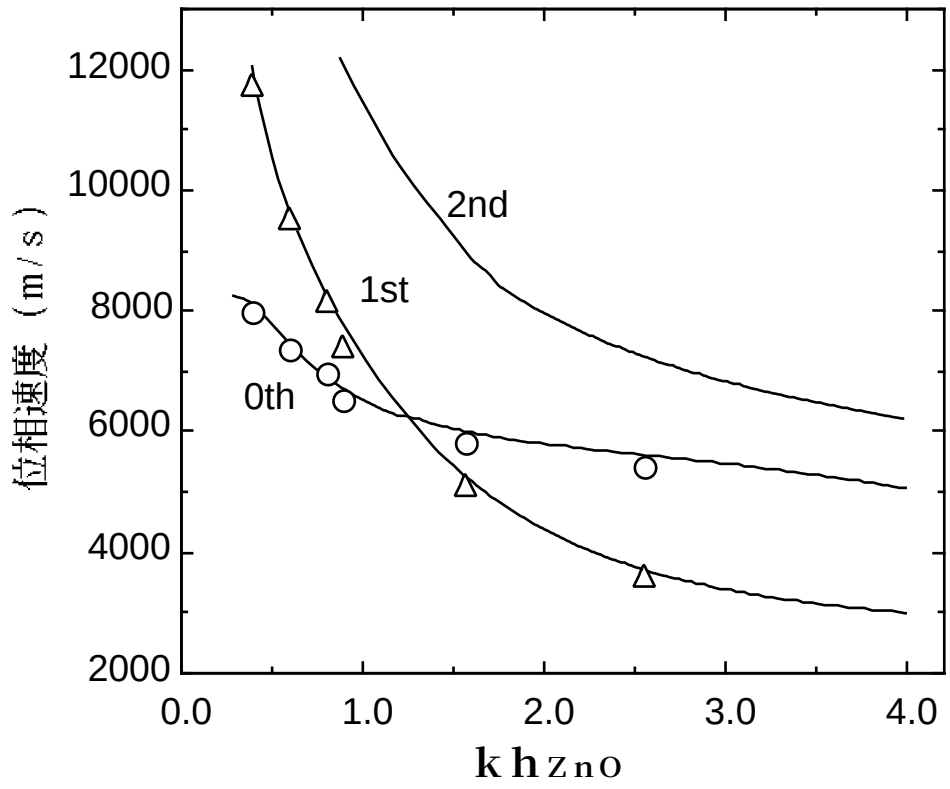
［13］ A.Kamijyo, J.Appl. Phys.,77, 3799 (1995)

［14］ T.Nishihara, O.Ikata, Y.Sato, IEEE Ultrasonics Symp.Proc. 383 (1995)

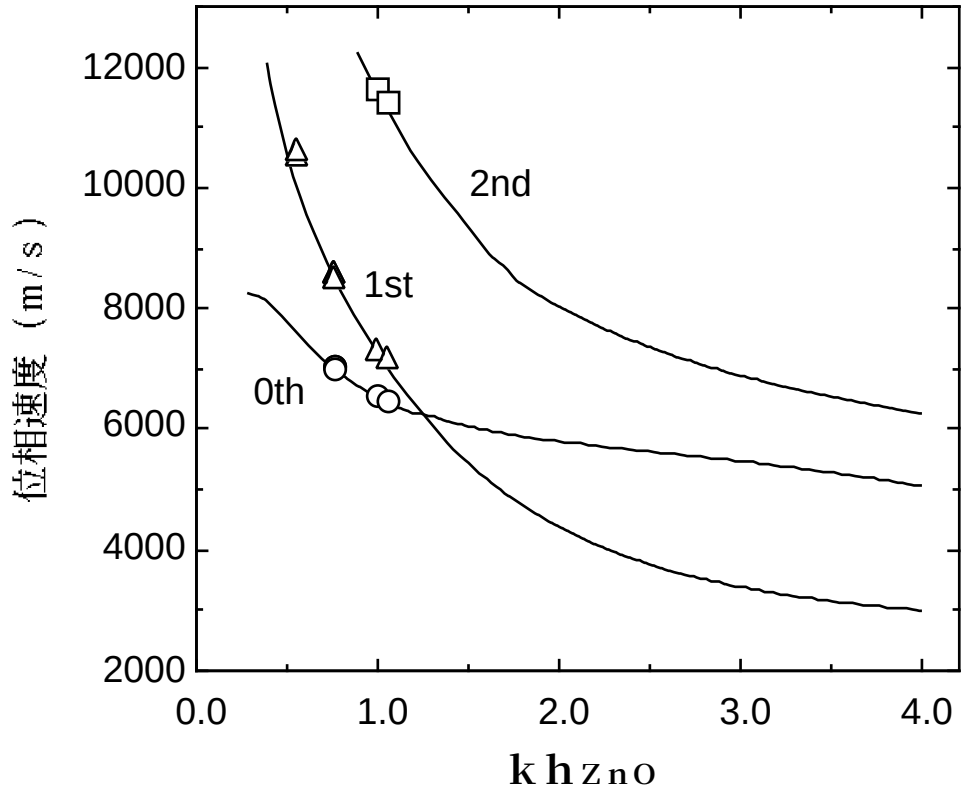
［15］ K. Higaki, H. Nakahata, H. Kitabayashi, S. Fujii, K. Tanabe, Y. Seki and S. Shikata, IEEE MTT-S Digest, 829 (1997)

［16］ K. Higaki, H. Nakahata, H. Kitabayashi, S. Fujii, K. Tanabe, Y. Seki and S. Shikata, IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 44,　1395 (1997)

［17］T.H.Lin, D.Edwards, P.E.Reedy, K.Das, W.McGinnis and S.H.Lee, Ferroelectrics, 97, 153 (1988)
［19］J.Koike, Jap.J.Appl.Phys., 32, 2338 (1993)
［20］J.Koike, Jap.J.Appl.Phys.,34,2678 (1995)
［21］佐藤、電子情報通信通信学会　A373　(1995)



（a）ZnO／IDT／ダイヤモンド構造



（b）IDT／ZnO／ダイヤモンド構造

図４-１.　位相速度の実証
（実線：シミュレーション、　○△□：実測値）

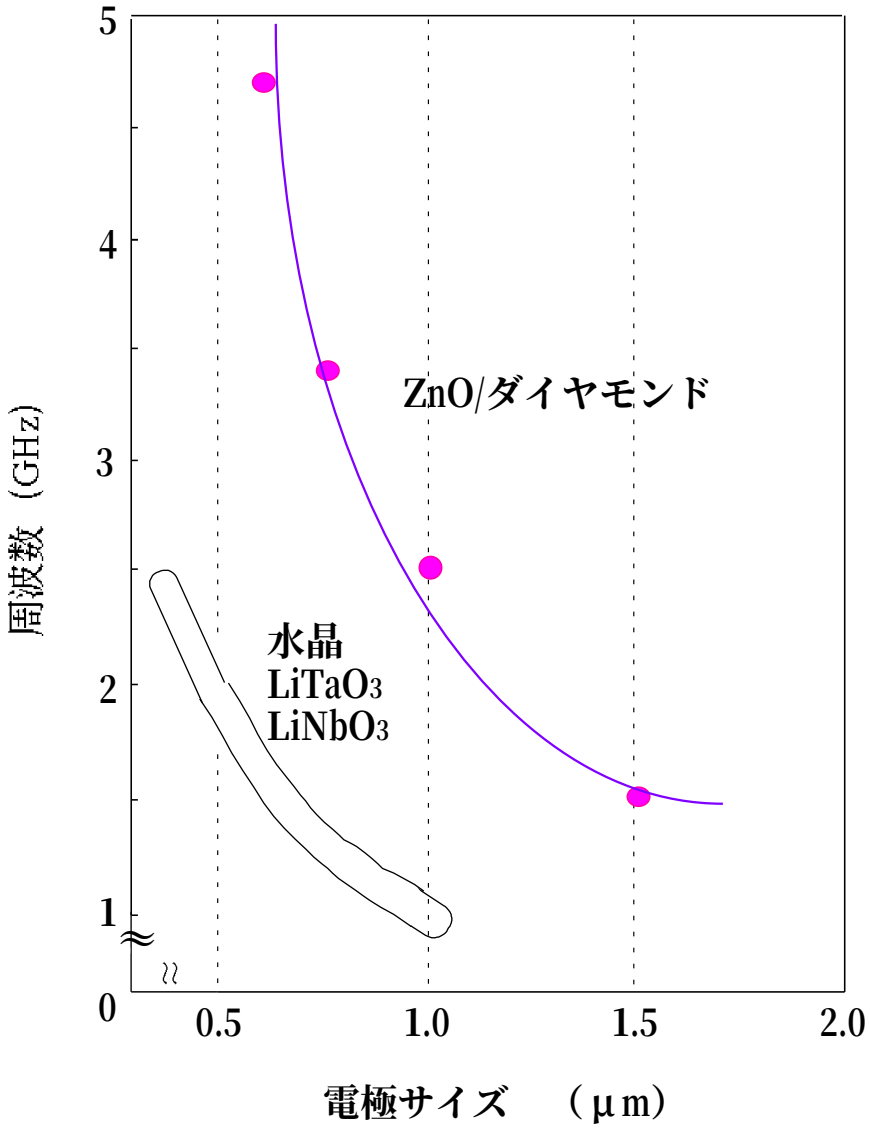
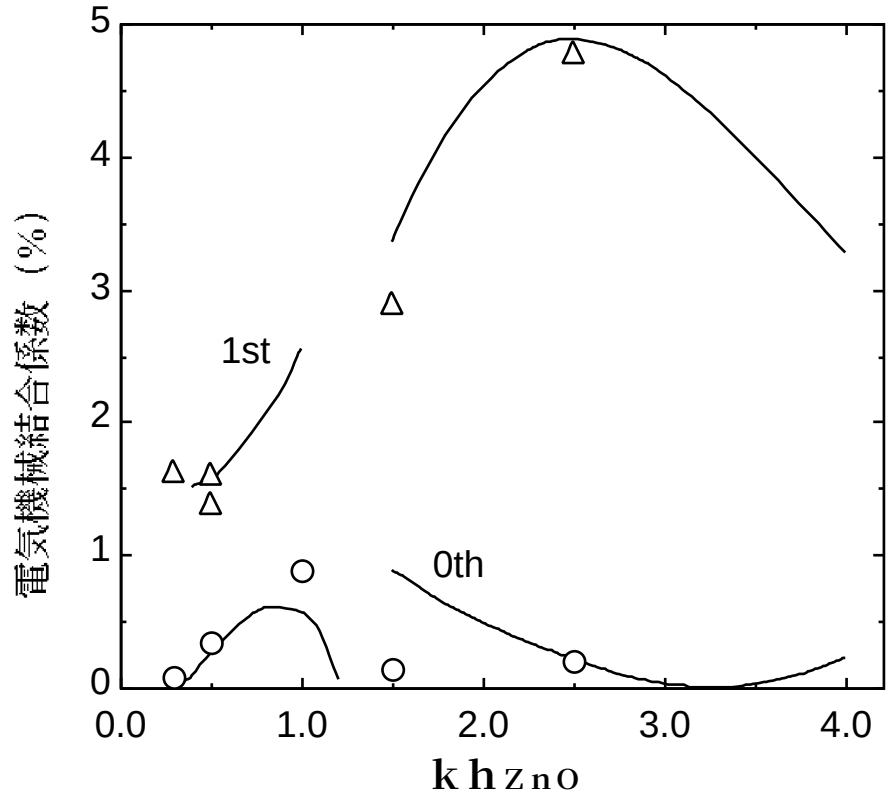
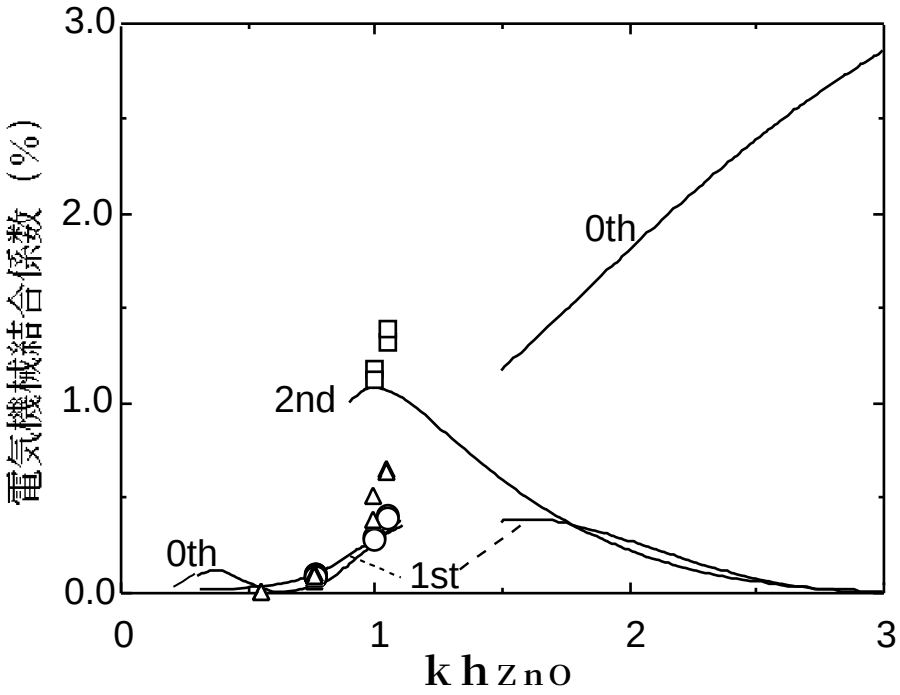


図４-２．IDTサイズと周波数の関係

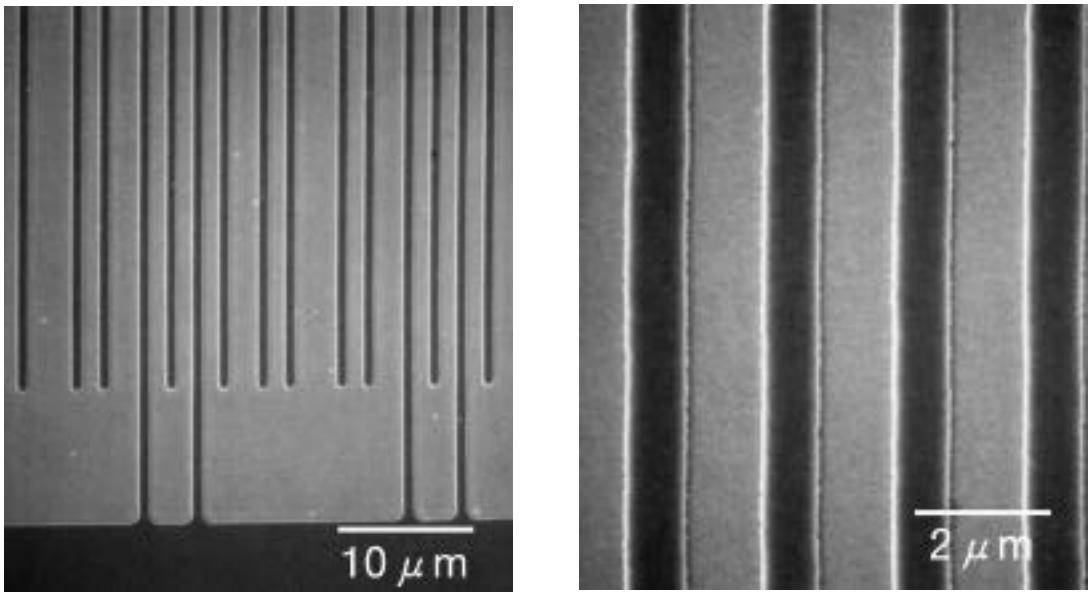


（a）ZnO／IDT／ダイヤモンド構造

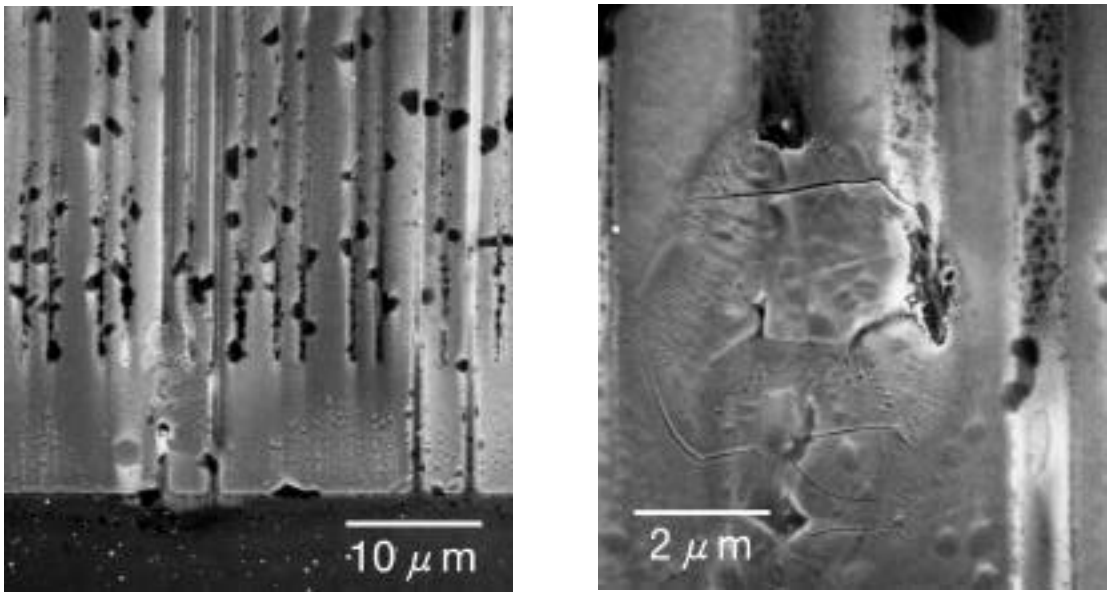


（b）IDT／ZnO／ダイヤモンド構造

図4-3.　電気機械結合係数の実証
（実線：シミュレーション、　○△□：実測値）



（ａ）ZnO／ダイヤモンド（36dBm印加後）



（ｂ）$LiTaO_3$（28dBm印加後）

図４-９．高電圧印加後の電極のＳＥＭ像

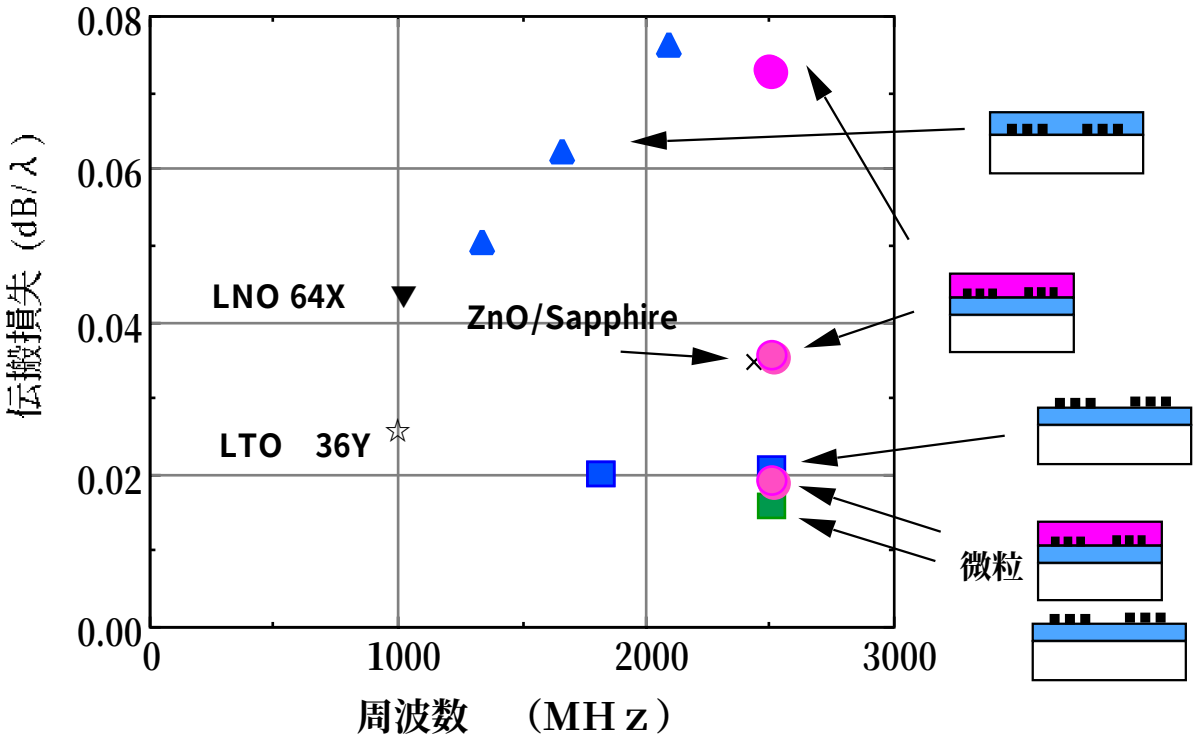


図４-１３． ダイヤＳＡＷの構造と伝播損失

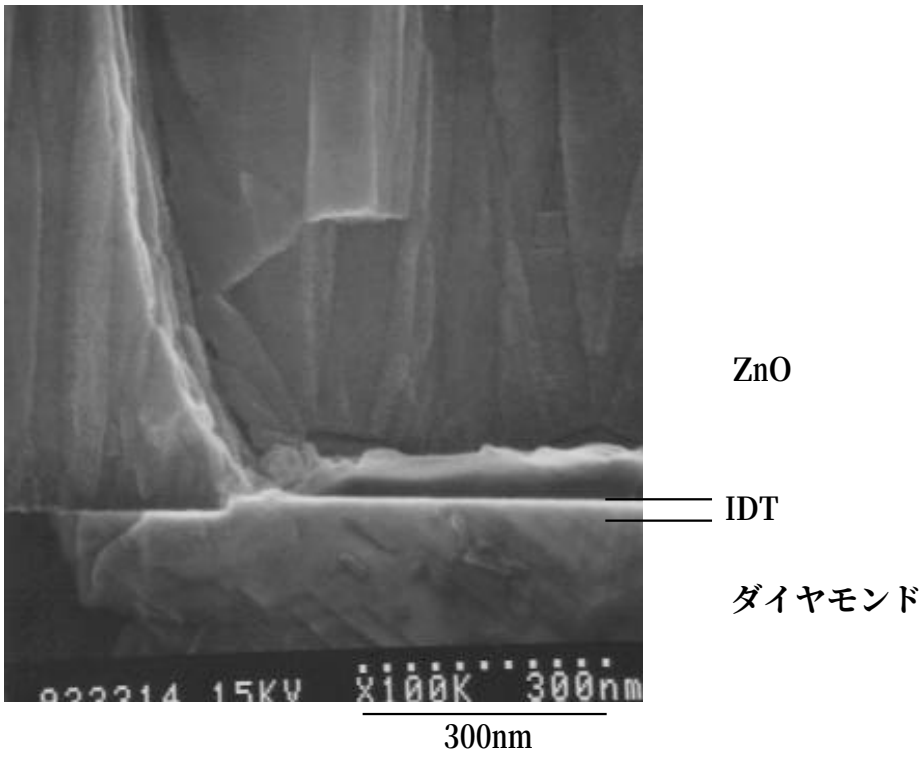
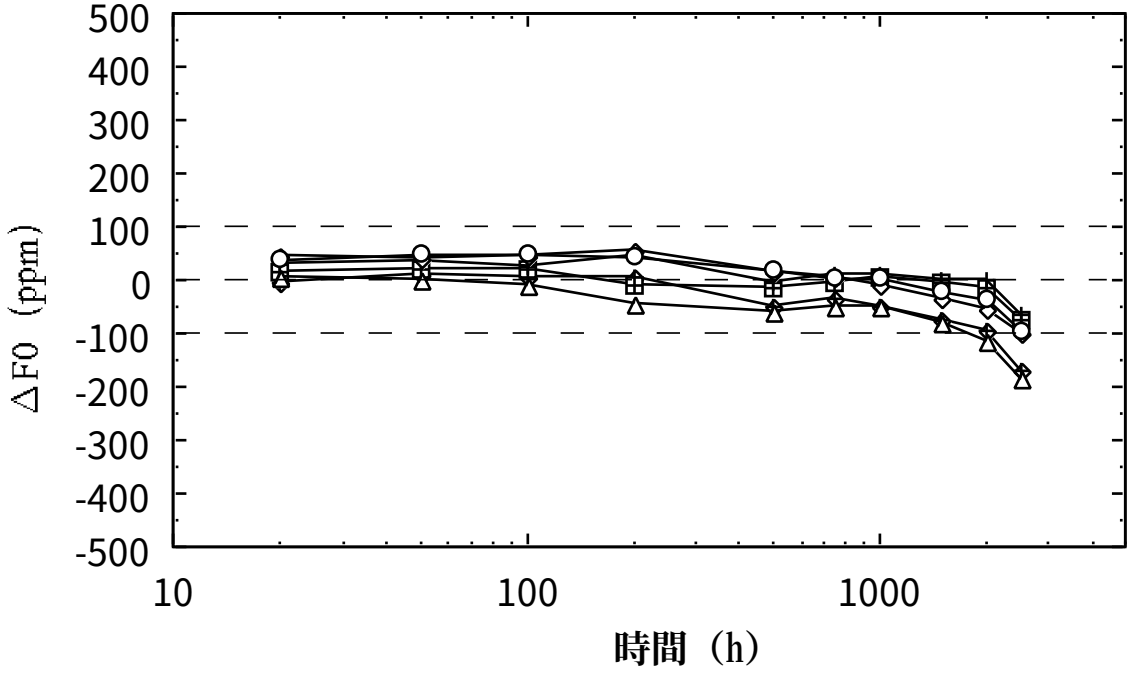
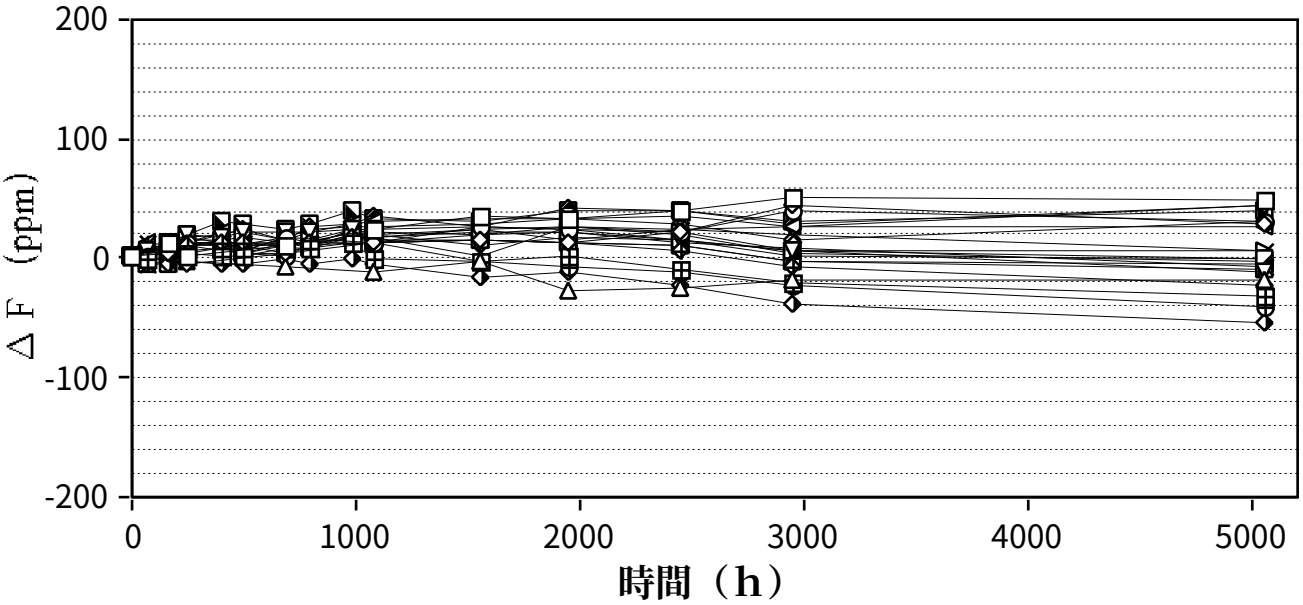


図４-１４． ZnO／IDT／ダイヤモンド構造の断面ＳＥＭ写真



（ａ）対策前の高温保存試験結果



（ｂ）対策後の高温保存試験結果

図４-１５．ダイヤモンドＳＡＷデバイスの信頼性試験
85℃高温保存試験

表５-３．ダイヤモンドＳＡＷフィルタの各種信頼性試験結果

内容	条件	周波数 (ppm)	挿入損失 (dB)	Q値	結果
機械的振動	MIL.STD.883, Method2007 A (20-G peak, 20-2000Hz 1往復4分,X,Y,Z方向　4往復)	-7～6	-0.01～0.18	-3.1～1.0	合格
機械的衝撃	MIL.STD.883, Method2002 A (500-G 半波正弦波, 1.0ms, X,-X,Y,-Y,Z,-Z方向 各5回)	-11～21	-0.06～0.16	-4.1～5.7	合格
高温保存	85℃ 5000時間	-28～25	-0.24～0.13	-14～10	合格
低温保存	-40℃　1000時間	-51～-5	-0.07～0.08	-1.8～7.6	合格
温度サイクル	-55℃ 30分 → 125℃ 30分 1000サイクル	-27～84	-0.18～0.16	-1.2～11.2	合格
熱衝撃	0℃ → 100℃　15サイクル 各槽30秒　移動10秒以内	-28～9	-0.05～0.20	-8.1～6.0	合格
高温高湿	85℃ 85%　1000時間	-66～-7	-0.05～0.20	-1.6～8.7	合格
温湿度サイクル	図４-１５参照	-18～3	-0.06～0.03	-3.0～10.4	合格
はんだ耐熱	ピーク温度 255～265℃ 220℃以上 15～21秒 予熱帯 160～190℃ 60～120秒	-17～36	-0.15～0.10	-4.9～5.9	合格

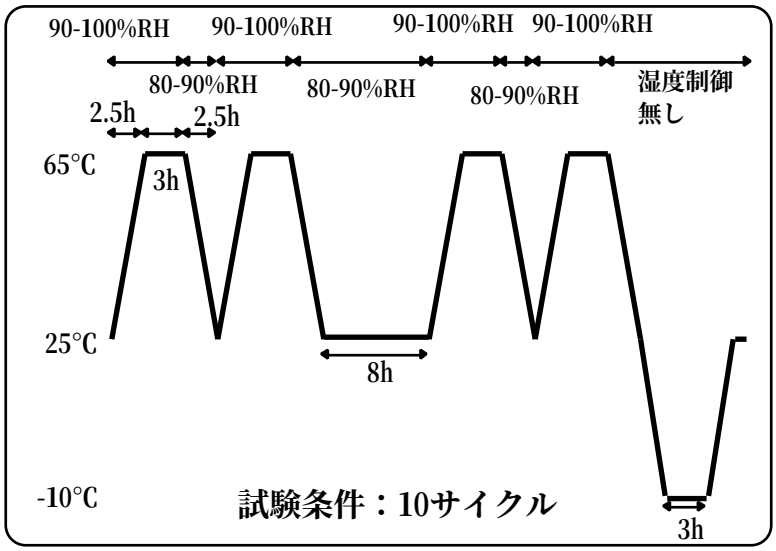


図４-１６．温湿度サイクルの条件

図４-８.入力電力を変えてLiTaO3及びダイヤモンドＳＡＷフィルタに投入した後のS21特性

第５章　通信デバイスへの応用

５-１．はじめに

４章において、SiO_2／IDT／ZnO／ダイヤモンド構造が狭帯域高周波用ＳＡＷ材料として非常に優れていることを、実験的にも見出した。またプロセス改良により、最も厳しいデバイス信頼性試験に合格する事を確認した。本章ではこれを用いて、実際に光通信や無線通信で用いることの出来る高周波ＳＡＷデバイスに応用した例について述べる。
まず始めに、主として用いた波と条件を表５-１に示す。

表５-１．実用デバイスに用いた構造とパラメータ

項目	内容
構造	SiO_2／IDT／ZnO／ダイヤモンド
波	セザワ波　２次モード
電極	$AlCu_{0.5\%}$
kh_{ZnO}	1.04
kh_{SiO_2}	0.86
位相速度	10,000m/s
電気機械結合係数	約1.2%
２次温度係数	-0.017ppm／$℃^2$

殆どの場合この波を用い、場合によっては、スプリアス波の周波数を所定の周波数から外すためにZnO、SiO_2の膜厚を、多少ずらして用いた。さて１章の表１-１に示したように、この波を用いて高周波狭帯域デバイスの設計及び作製を行った設計方法を大きく分けて説明すると、下記のようになる［1］。

１）狭帯域用に共振器型設計を用いるもの［1］。
　　主に共振器に用いる。
２）重み付け設計を行い波形整形するもの。［2,3］
　　ＩＦフィルタなどベースバンド信号処理に用いる矩形フィルタなどに用いる。
３）ＲＦフィルタで低損失重視の設計を行うもの。
　　例えばIIDT（Interdigitated IDT）型［4,5］やラダー型［6］などに用いる。

共振器型設計にはいろいろ手法もあるが、代表的なものはIDTの外側に反射器を設置して、ＳＡＷのエネルギーを閉じ込めて、挿入損失を減らす設計である。この反射

器は電気的には接続していないが、この変わりに単にIDT本数を増やして閉じ込め効果を出す場合もある。本研究ではこの共振器型設計を多用した。重み付け設計は、１章でも記述したように、フーリエ変換デバイスの特徴を十二分に活かした設計で、所望の逆フーリエ変換を施した重み付けIDTを用いるものである。IF（中間周波数）フィルタやフィルタバンクなど特殊用途に広く用いられている。広帯域用途の設計は携帯電話用に各社が注力したものであるが、実質はラダー型が主として使用され続けている。

本章では、主として狭帯域デバイスの結果について述べる。まず高周波狭帯域フィルタや共振器には、表５-２に示すような用途がある。

まず狭帯域用フィルタは、機器に発生する信号または外部から入力される様々な周波数成分から、特定の周波数だけを取り出すために用いられる。基準信号などの場合が多く、

ａ）スプリアス（不要波）除去

ｂ）雑音レベルを下げる

などが要求され、温度変動を嫌う用途ばかりである。

光通信では受信信号再生の際のタイミング抽出用の狭帯域フィルタ、送信用クロックの逓倍後にジッタ成分を除去するフィルタなどがある。無線通信では、基地局信号制御などで用いる。場合によっては、チャネル帯域の厳しい用途に用いる事もある。光通信、無線通信、ＯＡ機器類など共通のものとしては、クロック信号を逓倍した後の、スプリアスカットフィルタなどに需要がある。本研究では、ダイヤモンドＳＡＷデバイスの始めての応用として作製したタイミング抽出用の狭帯域フィルタについて述べる。無線用途としては、第３世代移動体通信用に作ったフィルタについて、５-３に述べる。

次に共振器であるが、ＳＡW共振器を発振源として用いた発振器には２種類ある。

１）固定ＳＡW発振器　　SO（SAW Oscillator）

２）電圧制御ＳＡW発振器　VCSO（Voltage Controlled SAW Oscillator）

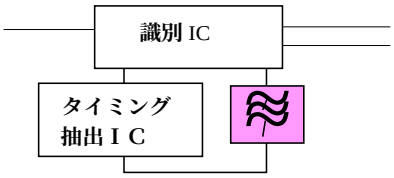
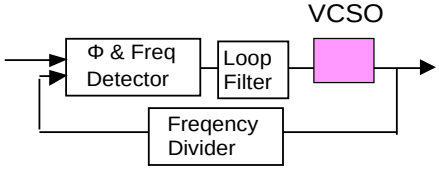
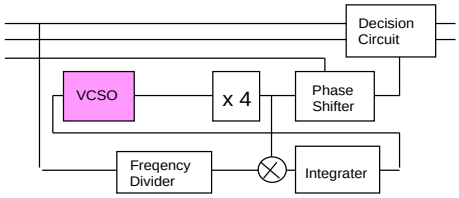
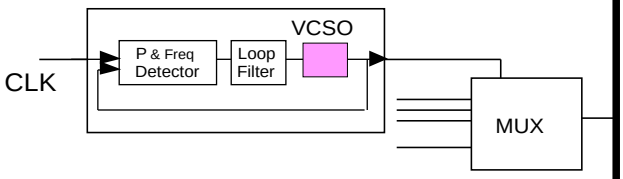
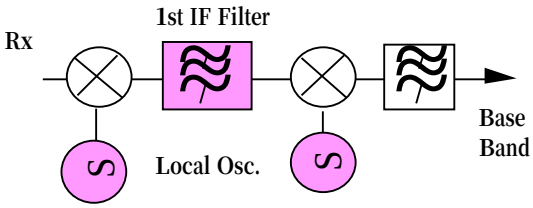
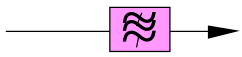
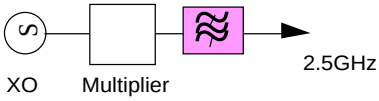
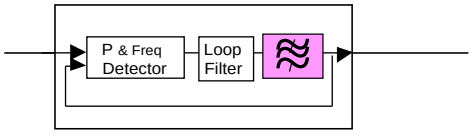
である。通常発振器は、水晶振動子をそのまま使用するかまたは逓倍して用いるが、ＳＡW発振器の場合、

ａ）高い周波数でも直接発振可能

ｂ）振動に強い

といった特徴があり、例えば自動車のキーレスエントリーなど、頻繁にカスタマが落下する事を想定したような用途では、水晶振動子では置換できない不可欠なのものになっている。

表５-２．狭帯域フィルタの主な用途と回路構成

分野	デバイス	用途	回路
光通信	フィルタ	タイミング抽出	
	共振器	周波数変換器用ＶＣＳＯ	
	共振器	タイミング抽出用ＶＣＳＯ	
	共振器	ジッタフィルタ用ＶＣＳＯ	
無線通信	フィルタ	ミリ波ＩＦフィルタ	
	共振器	局部発振器	
	フィルタ	基地局	
光無線ＯＡ他	フィルタ	クロック	
	共振器	ＶＣＳＯ	

光通信分野での最終用途としては、送信クロックのジッタを除去するためのジッタフィルタ、タイミング抽出に用いるＰＬＬ回路などが挙げられる。無線用途では、局部発振器（LO-Local　OScilletor）があり大きな需要がある。ＯＡ機器ではサーバーなど高速ＯＡ機器のクロックもGHz帯になっており、ますます高周波化が進んでおり、今後ますます進展する高周波クロック系分野では、活躍の場が多い。その他半導体装置に用いる高周波発振器など各種産業機器の発振源の用途も多い。

５-２．光通信用フィルタへの応用

（１）タイミング抽出フィルタ

まず始めに、光通信用の基幹伝送系受信モジュール用に2.488GHzタイミング抽出フィルタを作製した例について述べる。１章において背景を述べたように、光通信に於てはB-ISDNを基本とする大容量、高速通信網の整備が進行しており、その規格となるのが、同期通信系であるSONET（またはSDH）規格であり、155.52Mbps（OC3）を基本に、622.08Mbps（OC12）、2.488Gbps（OC48）、9.953Gbps（Oc192）のハイアラキで構成される。

これら光通信システムでは、受信後のデータ再生にタイミング信号が必要であり、その際に狭帯域で温度安定性のよいフィルタを用いる。受信時のタイミング抽出の模式図を図５-１に示す。受信信号をアンプで増幅した後、再度デジタル信号に変換する際に、１か０の判定タイミングを取る回路にタイミング抽出フィルタは用いられる。これまで155や622MHzのシステムでは水晶ＳＡＷデバイスが使われ、2.488GHzに関してもその延長で水晶に超微細加工を施してデバイスが作られ始めたが［7］、性能面で問題が多く、損失や温度特性面で優れたデバイスの出現が待たれていた。

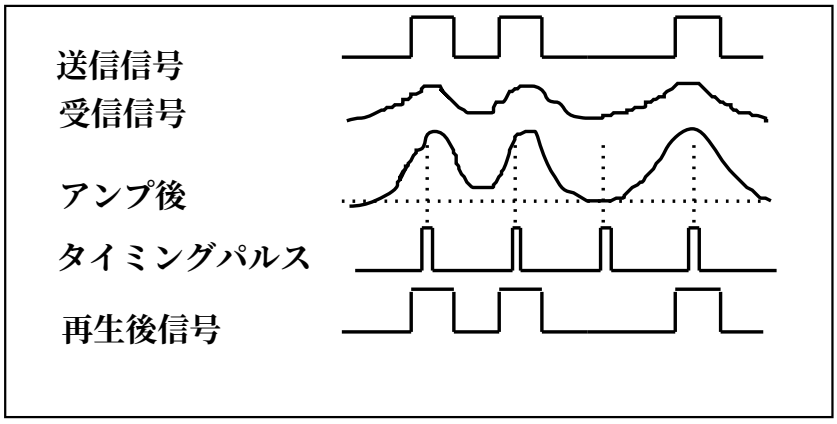


図５-１.タイミング抽出方法の模式説明図

ＳＡＷフィルタの設計としては、

・周波数2.48832GHz±100ppm

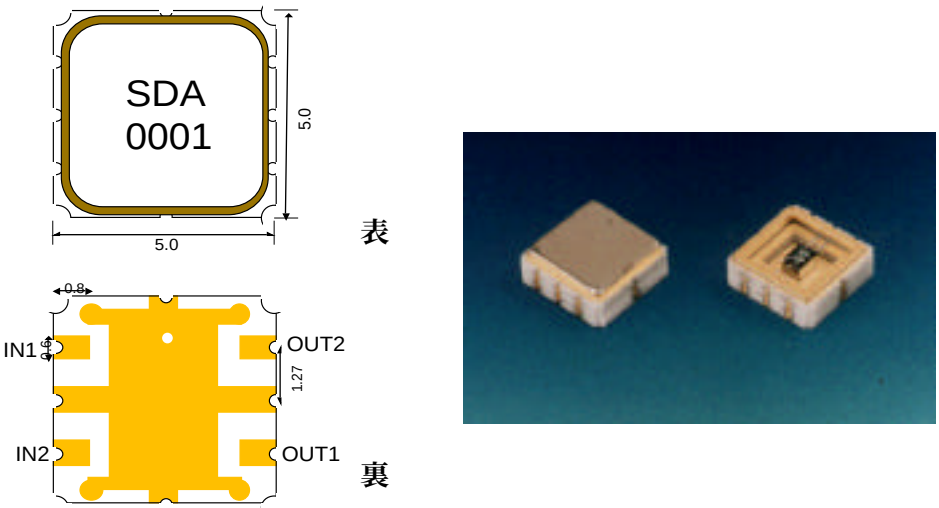
・Q値が650±30　（Q値は、f／Δfで与えられる）

・スプリアス20dBc以上

・差動入出力

を満たし、できるだけ低損失、低温度変動を目指す設計を行った。

表５-１に示す波を用い、低損失化のため、IDTの両側に反射器を置いた２ポート共振器で、内部反射を利用して低損失化を図った。線幅1.0μmの櫛型電極で、チップサイズは1.4×1.1mmである。実装には5×5mm表面実装型のセラミックパッケージを用いた。高周波側の雑音を避けるためビアホールを6個設けグランドを強化すると同時に、パッド及びワイヤから直接放出される電磁波（直達波）の影響を避けるための設計をおこなった。以上により0～6GHzでの実効減衰量として30dB以上を確保した。このパッケージを図５-２に示す。



（ａ）パッケージの図　　（ｂ）デバイス実装後の外観図

図５-２．　ＳＡＷデバイスパッケージの図とデバイス実装後の外観図

また差動回路に対応するため、パッケージ系全体のグランドと、ＳＡＷフィルタのグランドラインを分離して封入した。パッケージに実装後のデバイス外観も併せて示す。図５-３に試作したタイミング抽出用ＳＡＷデバイス［8,9］の代表的な高周波透過特性S_{21}特性を示す。測定は50Ω系で行い、外部マッチングは行っていない。（ａ）は6GHzまでの広帯域周波数特性を評価した結果で、（ｂ）は主ローブだけの特性を示す。６ＧＨｚまでの広い領域においてスプリアスを抑制した。中心周波数は2.48832GHz、代表的なQ値は670、挿入損失は6.5dBである。

また併せて、水晶で微細加工して得られているデバイスと性能比較した表を表５-３に示す。周波数温度特性としては、-40～85℃での中心周波数変動量は90ppmで温度安定性に優れており、水晶の1／2以下である。またダイヤモンドＳＡＷの場合電気機械結合係数が大きくIDT対数が少なくて済むため、伝搬距離が少なく、波の位相変化が少ない事が予想される。実際、通過帯域内の位相傾斜は-0.04度／KHzであり、通過に伴う位相の周りが少ないという事がわかった。これら温度安定性と位相傾斜が少ないことを併せると、図５-４に示すように、高周波信号の通過に伴う遅延が小さく、温度変動が少ないという特徴が出てくるが、これは回路設計上大変有利になる。なおスプリアス抑圧については、３章のリソグラフィにところで述べたように、プロセスで、線幅を太く制御する事によって、広い周波数域に渡って20dBc以上を確保した。

表５-３．タイミング抽出フィルタの性能比較

	ダイヤモンド	水晶
周波数	2488.32MHz±100ppm	2488.32MHz±100ppm
挿入損失	6～7dB	12～16 dB
Q値	640～700	640～700
温度変動 (-40~ 85℃)	90ppm	195ppm
抑圧	20dBc (<3GHz) 20dBc (3~ 6GHz)	11dBc (<3GHz) 9dBc (3~ 6GHz)
位相傾斜	-0.04deg/KHz	-0.07deg/KHz
サイズ	48mm^3	100~ 150mm^3

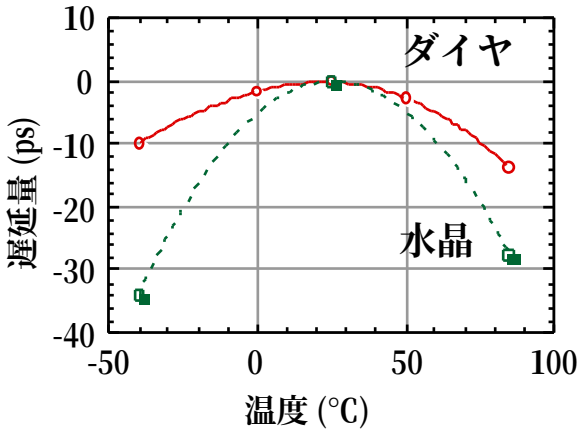


図５-４．　ＳＡＷデバイスの遅延特性の比較

（２）光通信用光受信モジュールへの適応

こうして作製したタイミング抽出用ダイヤモンドＳＡＷフィルタを、2.488Gbpsの高速光受信モジュール適応した場合の性能を、モジュール設計者と共に調査し、水晶のＳＡＷフィルタを用いた場合と比較をした。図５-５に受信モジュール回路を示す。受信部は、等化増幅用アンプ、識別再生用IC、タイミング抽出用IC、およびダイヤモンドＳＡＷフィルタで構成される。実装基板にはセラミック基板を用い、識別再生用ICとタイミング抽出用ICはベアチップ実装した。図５-６に本モジュールの外観を示す。外形寸法は58.4mm×26.8mm×8.5mm (13.3cc)、消費電力は1.5Wである。

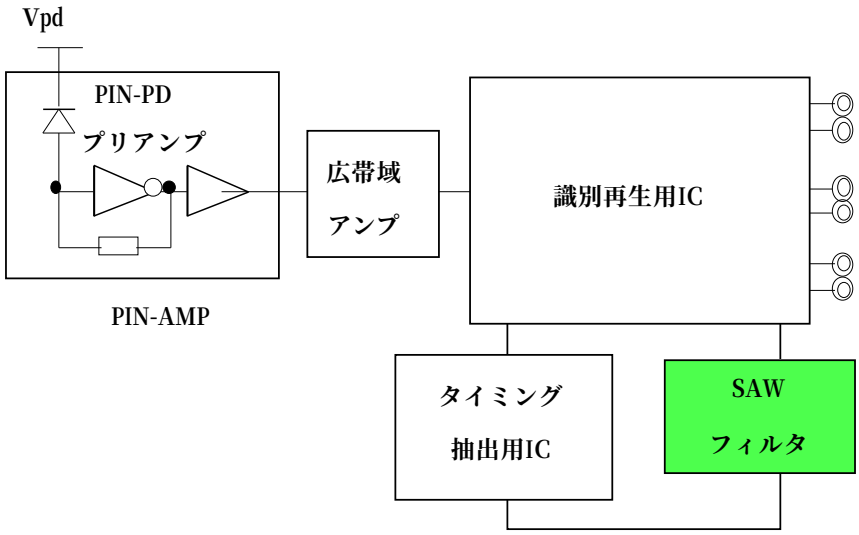


図５-５．　2.488Gbps受信モジュールの回路構成

図５-６．　2.488Gbps受信モジュールの概観

ダイヤモンドＳＡＷを用いた場合、損失が少ないため後段のアンプの増幅率が少なくて済み、識別再生回路へ導入されるタイミングパルスの雑音レベルが低い。その結果最小受信感度が低く、また温度特性がよいため温度変動が小さくなった。その様子を図５-７に示す。

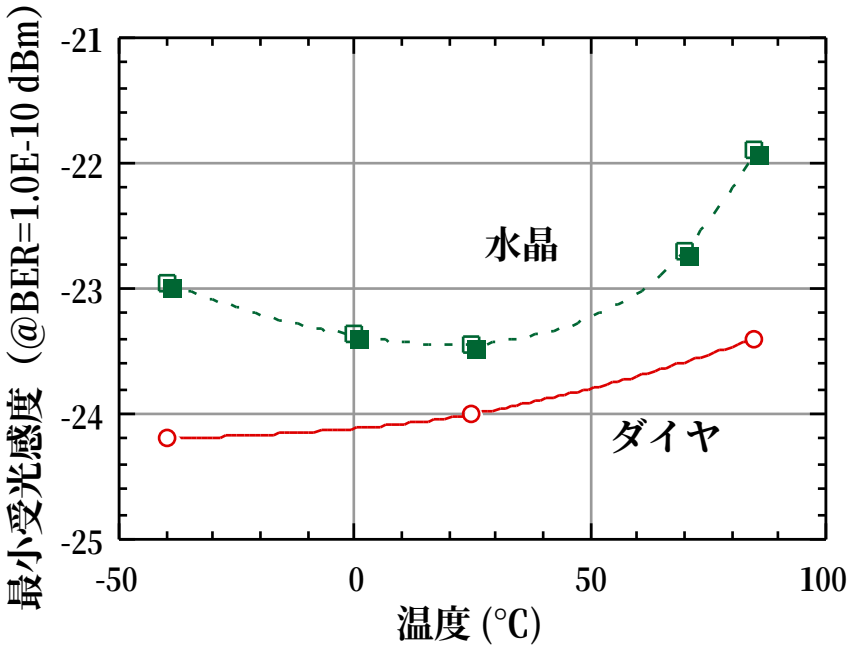


図５-７．　2.488Gbps光受信モジュールの最小受光感度の温度特性

誤り率特性から、温度範囲-40℃～85℃においてビット誤り率1×10^{-10}を満たす受光レベルは、-22～0dBmでITU-Tで決められた規格を満足することを確認した。上記の特徴はジッタ特性にも表れており、図５-８、９にビットレートトレランス及びジッタトレランスの結果について記す。前者については受信感度がよい事、温度変動がよい事により、ビットレートの上限下限の差が大きく、トレランスが広く取れている事がわかる。また後者のジッタについても、例えばジッタの周波数が10^{5}～10^{6}KHzのところで見ると、水晶ＳＡＷフィルタを用いたものでは規格値に対してぎりぎりのトレランスを示すのに対して、ダイヤモンドＳＡＷを用いたものでは余裕を持って取れる事がわかる。以上、受信モジュールの全特性において、水晶によるものを凌駕する事がわかった［10］。 ITU　G958規格を満足しており、-40℃～85℃の広い温度範囲の動作が可能である。

以上により、本研究で作製したダイヤモンドＳＡＷフィルタを小型2.488Gbps光受信モジュールに適用し、-40℃～85℃の温度範囲の広動作と全特性で水晶ＳＡＷを用いたモジュールの特性を凌駕する良好な特性を得た。

５-３． 無線通信用フィルタ及び発振器用共振器への応用

（１）無線通信用狭帯域フィルタ

無線通信の狭帯域用途にフィルタへ応用した例について述べる。１章で説明した移動体通信の次期有力候補で第３世代（3G）携帯通信の代表とされる、WCDMA用の基地局通信用パイロット信号抽出フィルタである。WCDMAは世界標準のCDMAシステムで、上り、下り各々60MHzを使用帯域とする。これは基地局と端局（携帯機器）の通信帯域であり、基地局間ではパイロット信号を用いて、制御関連の通信が行われる。SiO_2／IDT／ZnO／ダイヤモンドＳＡＷフィルタで作製したのは、通信帯域から５ＭＨｚ離れた周波数を用いるパイロット信号抽出フィルタである。

ＳＡＷフィルタの設計として、下記が目指す目標仕様である。

- 周波数2.100GHz±100ppm
- 下り（2110～2170ＭＨｚ）の抑圧20dBc以上
- -10～85℃の周波数変動が100ppm以下
- 高電力ＷＣＤＭＡ信号投入耐性
- VSWR (Votage Standing Wave Ratio) <1.8

設計は光通信用と同様、２ポート共振器型で反射器を有する設計とし、5MHz離調のところの抑圧を20dBc以上確保するために、３章で述べた線幅制御技術を用いた。また５章で述べた優れた耐電力性が、高い出力のWCDMA信号投入耐性確保に有効であると判断した。実際に作製したデバイスのS_{21}特性を図５-１０に示す。実際に電力耐性を確認するために、実際のWCDMA信号を投入して劣化加速試験を行なった結果を、図５-１１に示す。105℃で500時間印加し続けて、周波数変動は5ppm以下、挿入損失は0.03dB以下ともに変動がなかった。以上を、特性表として表５-４にまとめて示す。

表５-４.ＷＣＤＭＡ基地局通信用パイロット信号抽出フィルタ特性

項目	条件	規格
中心周波数	2100MHz	±200ppm以内
中心周波数温度変動	0～80℃	100ppm以下
Q値	——	800 ±150
挿入損失	なるべく小さく	7.5±1.5dB
帯域外減衰量	2110～2180MHz	20dBc以上
VSWR	なるべく小さく	1.6以下
耐電力	WCDMA信号耐性	WCDMA信号耐性

（２）発振器用共振器

ここではまず始めに、最近の通信の高度化に伴い発振器に求められている課題について述べる。まず図５-１２に示すように、光通信においては、システムの大容量化に伴い、マスタークロックや受信信号から再生抽出されたクロックを、各種伝送機器に再分配するのに、クロックジッタ特性の改善が必須であり、10Gや40Gシステム（OC768）では2.488GHzクロックが求められてきている。
また無線通信でも、狭チャネル化などによって、高性能の高周波発振器が求められており、特にLMDS（Local Multipoint Distribution System）などのミリ波通信では、高性能の局部発振LO（Local Oscillator）が要求されている。さらに通信に限らず、サーバーやＰＣなどＯＡ機器においても、クロックの高速化に伴い、ジッタの少ない直接発振の可能な高周波SOやVCSOが求められている。

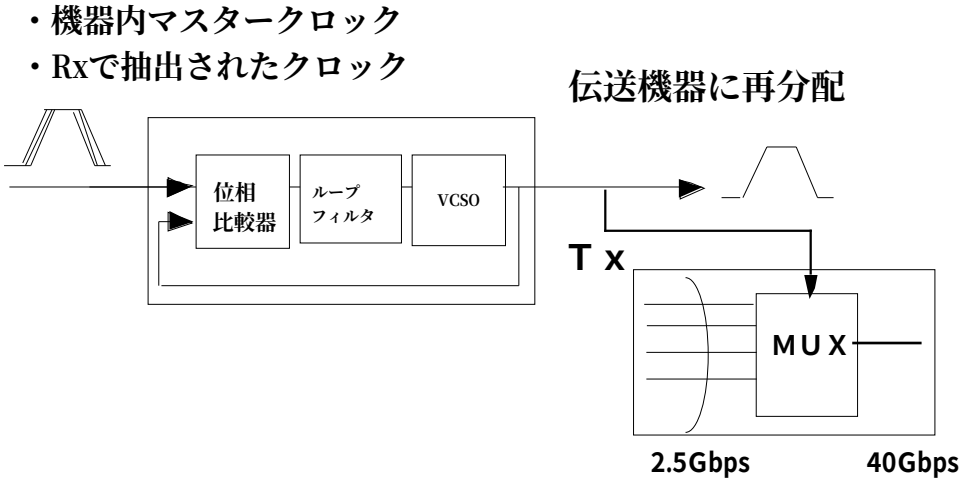


図５-１２．ジッタフィルタの模式図

従来の低周波の逓倍方式では

ａ）逓倍による20logNの位相雑音増加
ｂ）逓倍によるジッタ成分の増加
ｃ）逓倍回路による大型化
ｄ）逓倍駆動用の高電力が必要
ｅ）フロア雑音が高い

といった多くの問題がある。特に発振器の性能に関わるａ）やｂ）は大きな影響を及ぼす。図５-１３に逓倍数を増やした時の位相雑音の増加を示す。例えば8逓倍で約18dB、12逓倍で約22dBも増加するような、大きな影響があることが見て取れる。こういった問題を解決させるため、高周波ＳＡＷを用いた直接発振方式が期待されている。

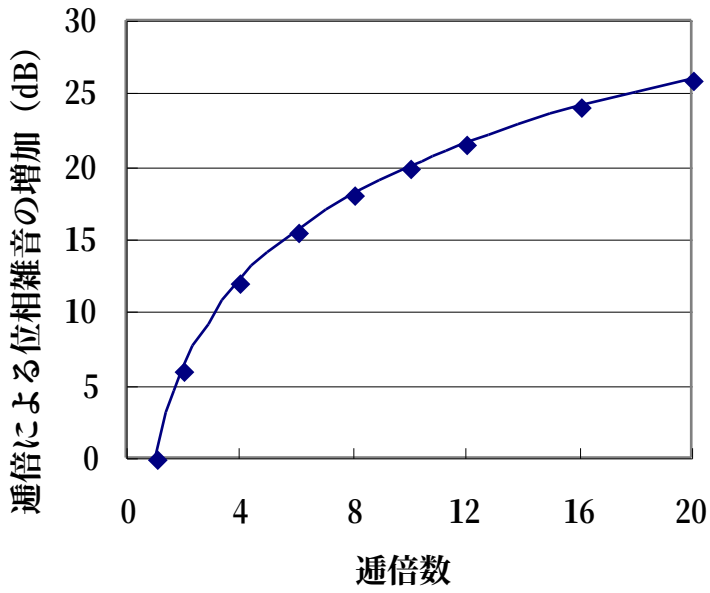


図５-１３．発振器の逓倍による位相雑音の増加

これらの用途のＳＡW共振器には、

Ａ）高周波　Ｂ）低損失　　Ｃ）低温度変動　Ｄ）通過帯域内位相線型性

Ｅ）高Ｑ　　Ｆ）小型低背化　Ｇ）安定性

などの特性が求められる。

従来の水晶では損失が大きく、周波数がせいぜい1GHzまでしか対応できていなかった。SiO_2／IDT／ZnO／ダイヤモンド構造によるＳＡWは、これまで述べたように水晶に比べて高周波化が可能、温度特性がよい、挿入損失が小さいといった特徴があり、水晶で不可能な1GHz以上の共振器が期待される。

この共振器は、仕様に応じて周波数調整幅との兼合いで、低いQ値のものから高いQ値のものまで使用される。ここではその中で高いQ値を実現した例を示す。図５-１４に、ダイヤモンドＳＡWによる共振器試作の例を２つ示す。１つは2.5GHzでQ値が1600の共振器の高Q値共振器であり、もう１つは3.7GHzでQ値が600の例である。両方とも２ポート共振器型で反射器を設置した設計である。これらは高Q、高周波で低挿入損失を図るために、３章で述べた微粒ダイヤモンドにより伝搬損失を低減した。以上より、1.8から3.7GHzの周波数で、水晶では不可能な周波数と性能の共振器の作製が可能になった。

最後にこれらダイヤモンドＳＡW共振器を用いたVCSOについて述べる。用いたＳＡW発振器は、VCSOの周波数調整域を広く取るために、Q値が比較的低く600程度のものである。実装は小型化が必須なため3×3×1.8mmのセラミックスパッケージに実装した。これによりVCSOとしてサイズが10×10×3.8mmという超小型の直接発振器を実現できている。　回路は位相器型の設計による発振器である。その位相雑音特性の例を図５-１５に示す（セイコーエプソン殿御提供）［11］。発振周波数から離調した時にどれくらい位相雑音があるかを示したもので、片側だけを図示してあるが、基本的に左右対象であり、周波数がマイナス側にも同様の雑音を有する。これを見ると2.5GHzの高周波発振器で、例えば10KHz離調時に120dBc／Hz以下の、大変低い位相雑音が得られている。これは上述のように低周波数水晶ＳＡW発振器の逓倍方式では得られない、低い値である。
なお、表５-５にVCSOの特性をまとめた。動作温度は-40～85℃の広い範囲を確保でき、直接発振の特徴を活かしてスプリアスが極めて低い、高周波VCSOが得られている事がわかる。

５-４．まとめ

SiO_2／IDT／ZnOダイヤモンド構造を用いた高周波狭帯域ＳＡＷデバイスに関して、光通信用フィルタ、無線通信用フィルタ及び発振器用共振器デバイスの作製例を３つ述べた。

まず光通信用の受信信号再生に用いるタイミング抽出フィルタであるが、２ポート共振器の設計により、スプリアスを抑圧させた2.488GHzの狭帯域フィルタを実現した。水晶に比べて温度変動、遅延変動が半分以下と小さく、6dB台の低損失のフィルタが出来た。これを2.488Gbpsの光通信用受信モジュールに適応し、受信感度、各種ジッタ特性とそれらの温度特性に優れる性能を得た。

次に、無線通信用狭帯域フィルタへの適応例として、WCDMA基地局間通信用パイロット信号抽出フィルタを作製した。携帯機器の通信に用いる60MHz帯域での抑圧を確保し、耐電力性に優れるダイヤモンドＳＡＷデバイスの特徴を充分に活かし、WCDMAの高電力投入に耐えるデバイスを作製した。

最後に、発振器用共振器への適応をおこなった例について述べた。従来の低周波信号の逓倍による位相雑音及びジッタ成分の増加や、逓倍回路そのものによる大型化や電力増大、などを抜本解決する直接発振方式が、光、無線通信及びＯＡ各種機器で期待されている。ダイヤモンドＳＡＷを用いて、高いQ値を与える設計を行い、高周波共振器を作製し、実際に高周波VCSOとして、極めて高性能の発振器を得ることが出来た。

以上の成果は、いずれも通信システムの実機での採用に結び付く成果となり、これを元に量産するに至った。

５章　参考文献

［1］弾性表面波素子技術ハンドブック
日本学術振興会弾性表面波素子技術150委員会編　オーム社平成３年

［2］P.V.Wright and S.A.Wilkus, IEEE Ultrasonics Symp.Proc., 72 (1983)

［3］C.S.Hartmann, IEEE Ultrasonics Symp.Proc., 423 (1973)

［4］ M.F.Lewis, IEEE Ultrasonics Symp., Proc., 12 (1982)

［5］M.Hikita, T.Tabuchi, H.Kojima, A.Nakagoshi and Y.Kinoshita,
IEEE Ultrasonics Symp., Proc., 77 (1983)

［6］ Y.Satoh, O.Ikata, T.Miyashita, and H.Omori, "RF SAW Filters", Int'l Symp.
Acoustic Wave Devices for Future Mobile Communication Systems, 125 (2001)

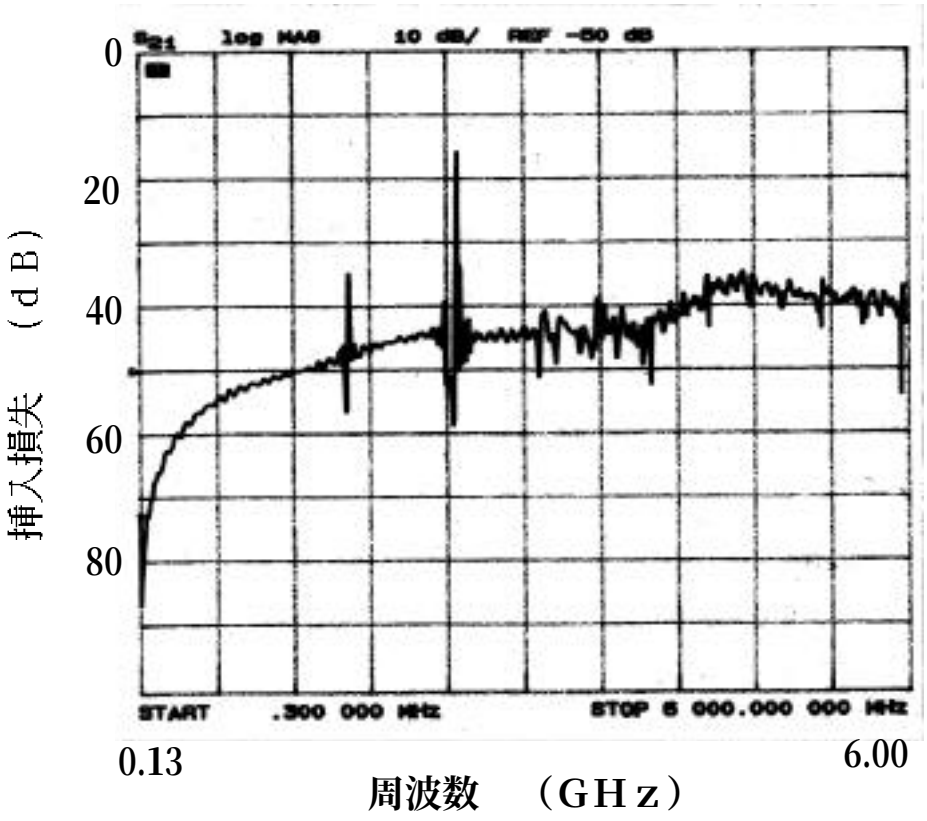
［7］Vectron社カタログ(1998)

［8］ S. Shikata , H.Nakahata, K. Higaki, H. Kitabayashi, K. Tanabe, S. Fujii, and Y. Seki
Int'l Symp. Advanced Materials (1997)

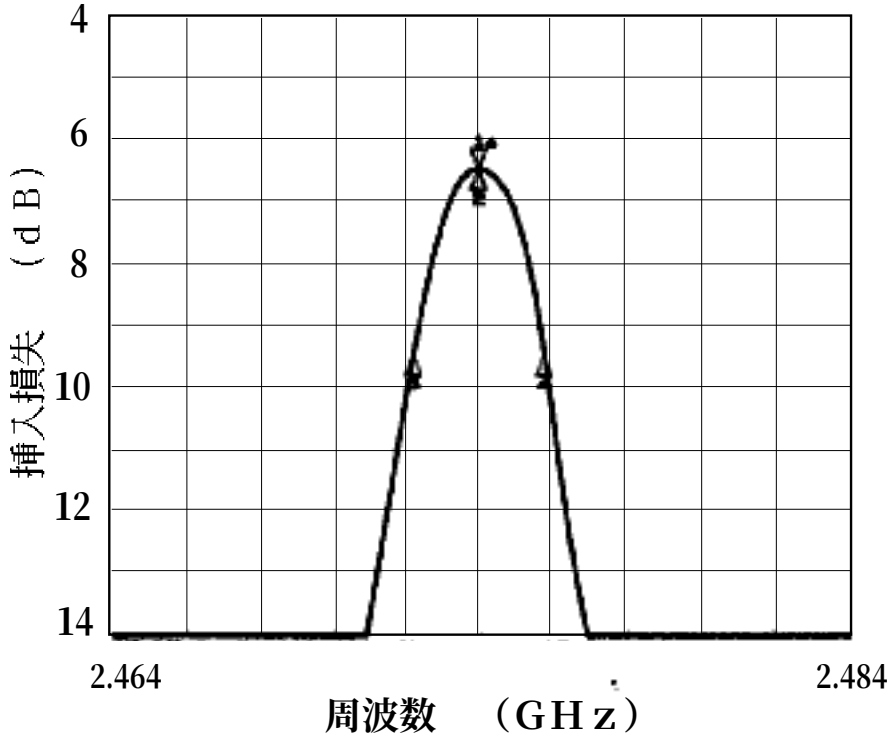
［9］ H. Nakahata, H. Kitabayashi, T. Uemura, A. Hachigo, K. Higaki, S. Fujii and
S. Shikata, IEEE Ultrason.Symp. Proc., 319 (1998)

［10］ 村田，高橋，西江，中幡，鹿田，
電子情報通信学会春季大会予稿集，B-10-184 (1998)

［11］S.Shikata, H.Nakahata, S.Fujii, T.Uemura, Y.Takada, T.Kano, N.Itoh,
and O.Iwamoto,
2nd Int'l Symp. Acoustic Wave Devices for Future Mobile Comm.Systems,
Proc., 89 (2004)



（ａ）広帯域特性
（注：主ローブは走査の関係で正しい損失を示していない）



（ｂ）狭帯域特性

図５-３． 光通信用タイミング抽出フィルタのＳ21特性

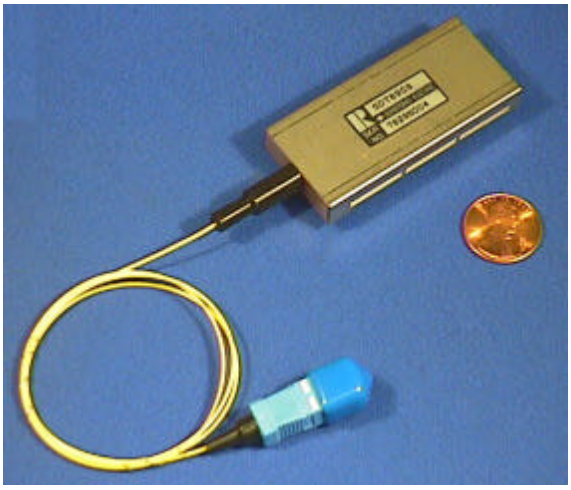
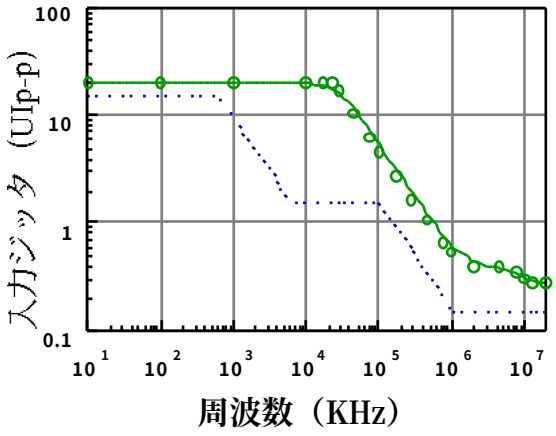
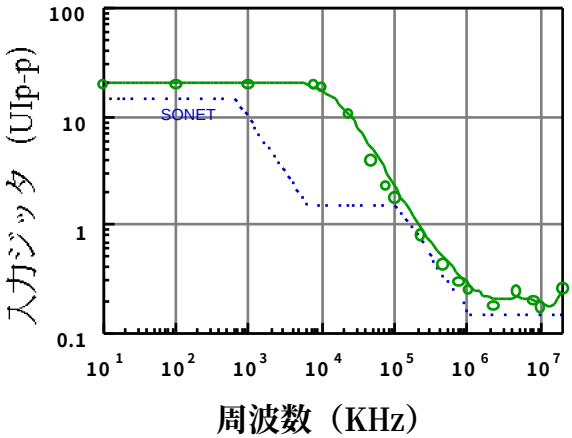


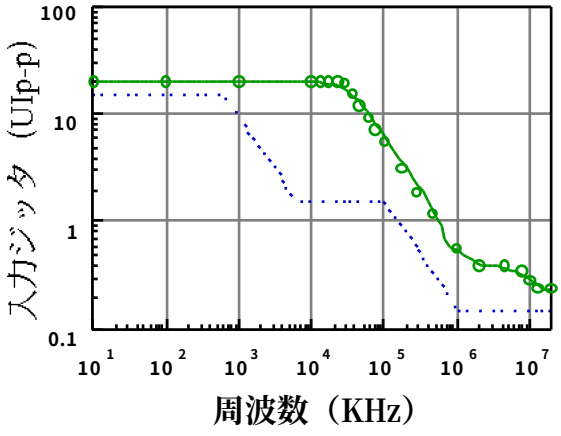
図６-７．　光通信用受信モジュールの外観



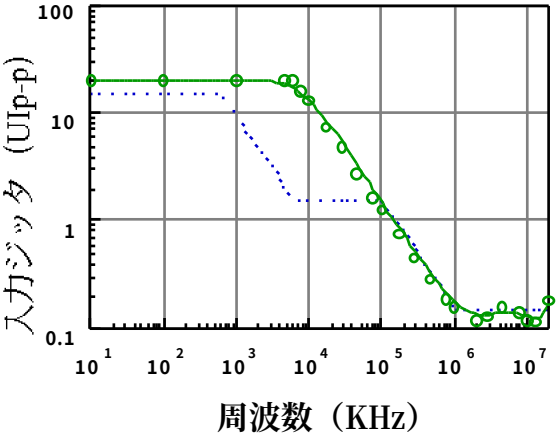
（ａ）ダイヤＳＡＷ（-40℃測定）



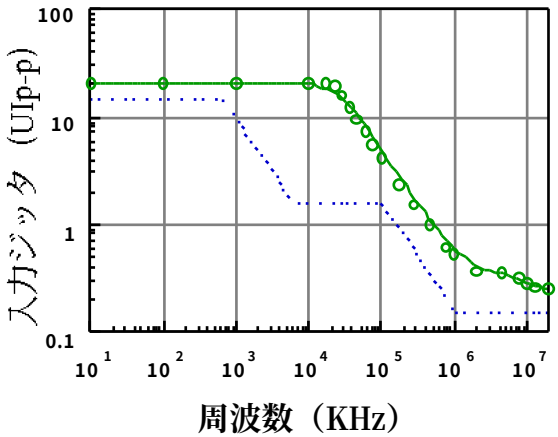
（ｂ）水晶ＳＡＷ（-40℃測定）



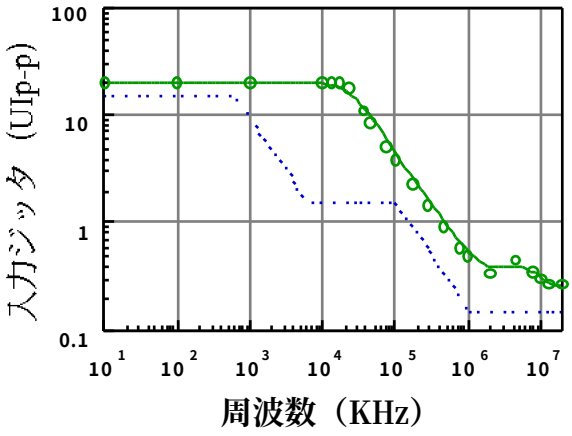
（ｃ）ダイヤＳＡＷ（25℃測定）



（ｄ）水晶ＳＡＷ（25℃測定）

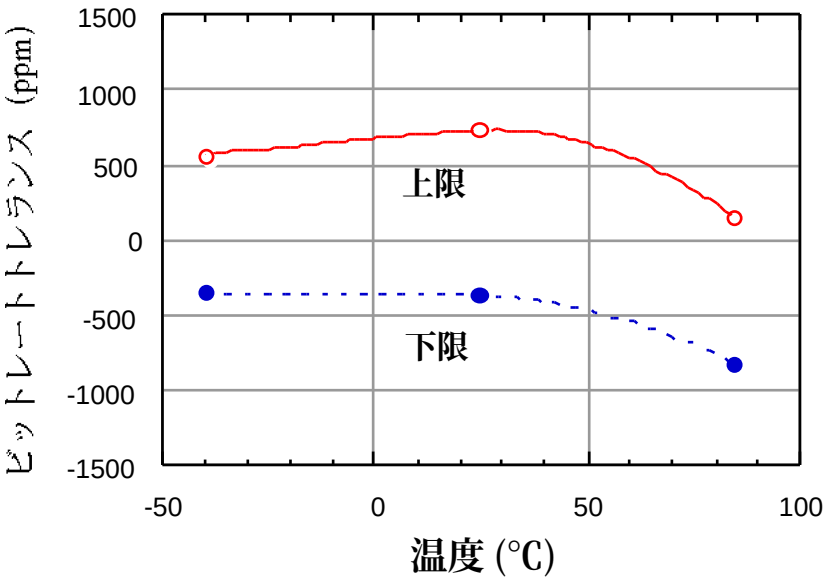


（ｅ）ダイヤＳＡＷ（85℃測定）

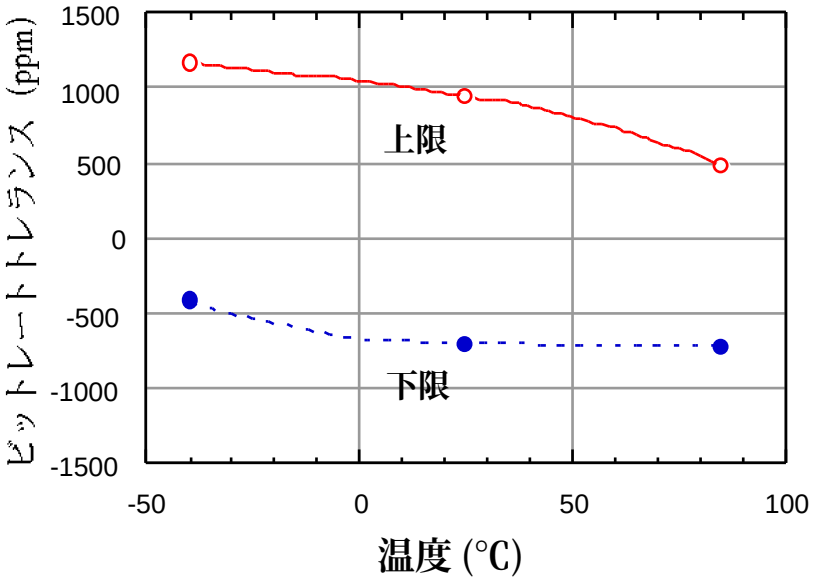


（ｆ）水晶ＳＡＷ（-85℃測定）

図５-８．ダイヤＳＡＷと水晶ＳＡＷをタイミング抽出回路に用いた
光受信モジュールのジッタトレランスの比較



（ａ）水晶ＳＡＷによるモジュール



（ｂ）ダイヤＳＡＷによるモジュール

図５-９．　ダイヤＳＡＷと水晶ＳＡＷをタイミング抽出回路に用いた光受信モジュールのビットレートトレランス比較

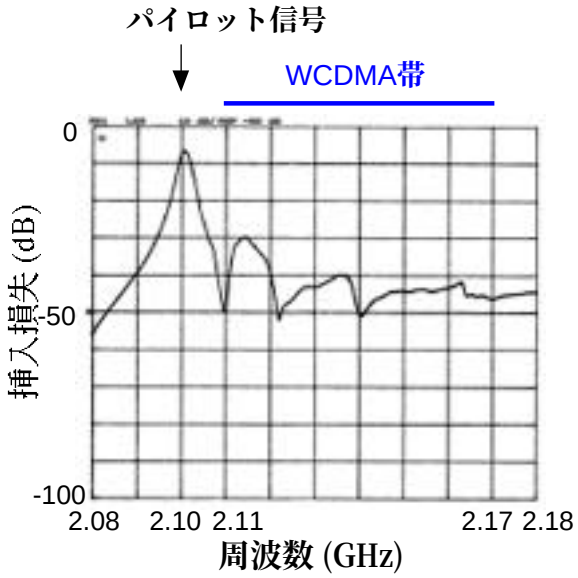
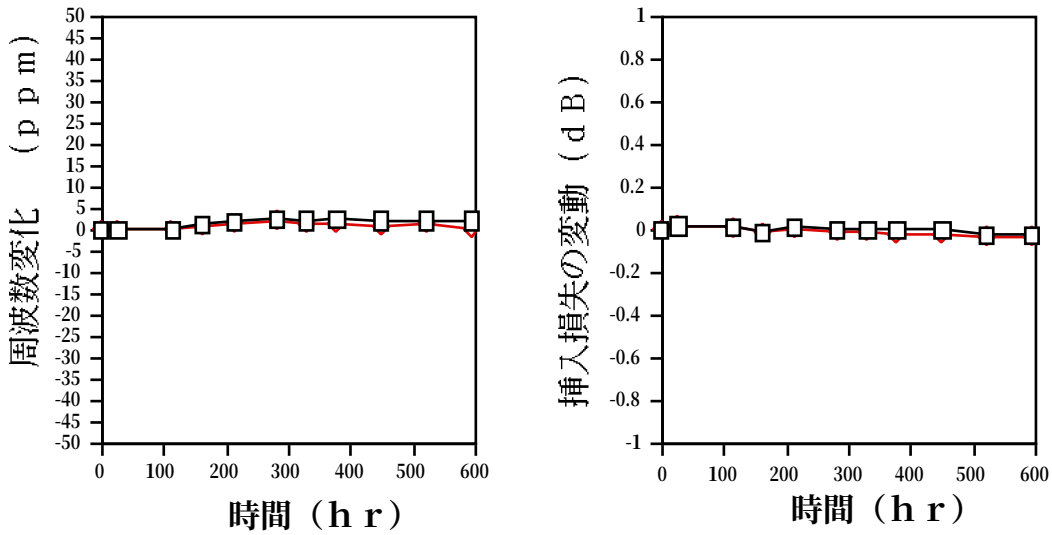
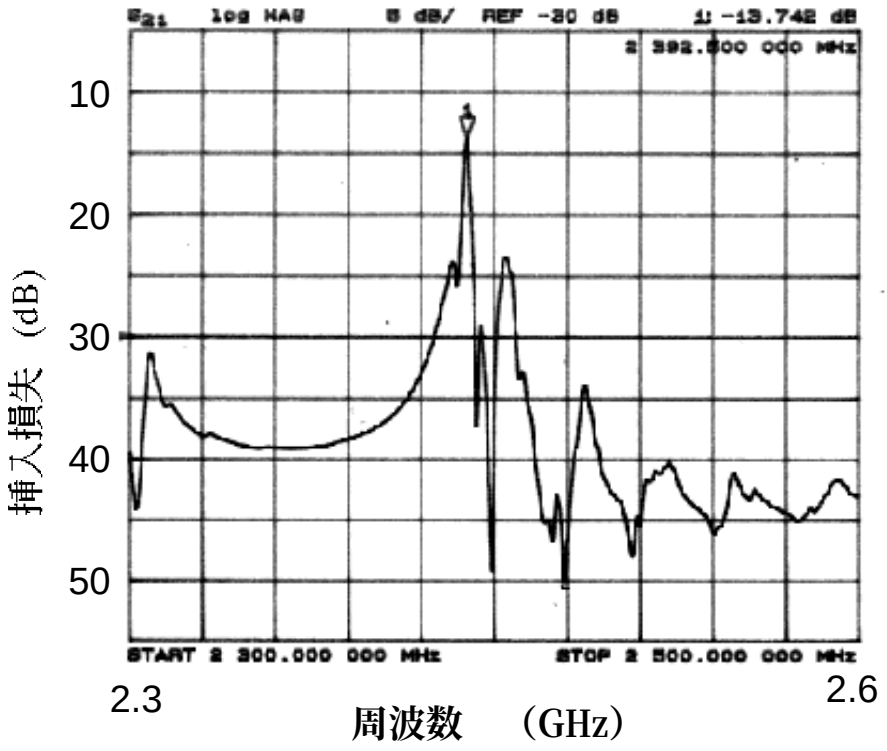


図５-１０．　WCDMA基地局用パイロット信号抽出フィルタのS21特性

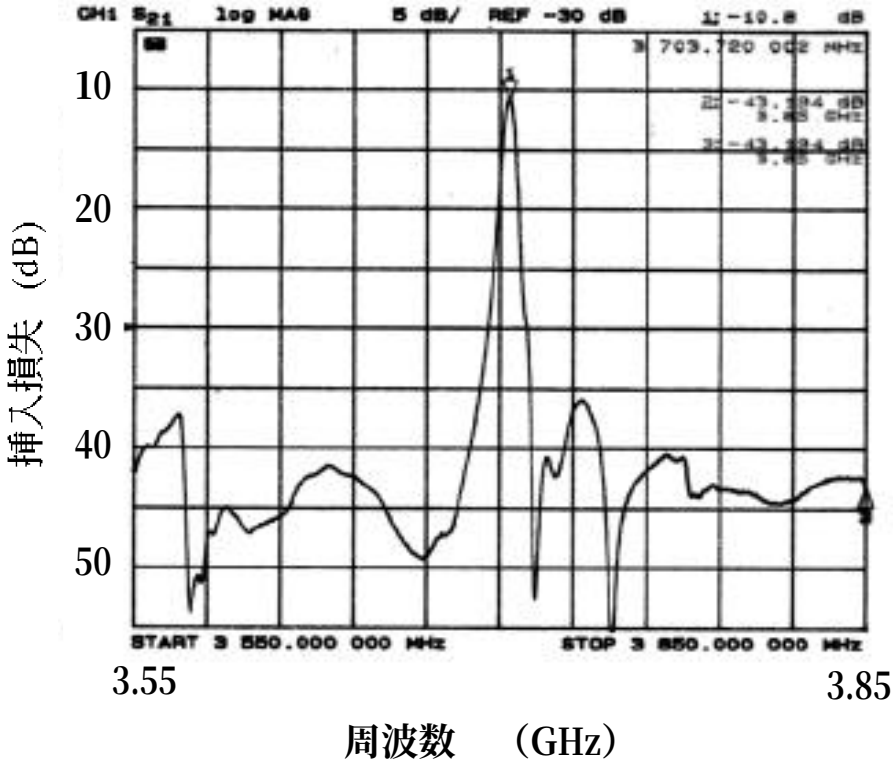


（ａ）周波数変化　　（ｂ）挿入損失変化

図５-１１．　WCDMA用フィルタの耐電力試験
（105℃　12dBm連続発振　f=2170MHz　）



（ａ）2.488GHz　Q=1600



（ａ）3.7GHz　Q=600

図５-１４．高Ｑ値設計及び高周波設計を施した
高周波ＳＡＷ共振器試作例

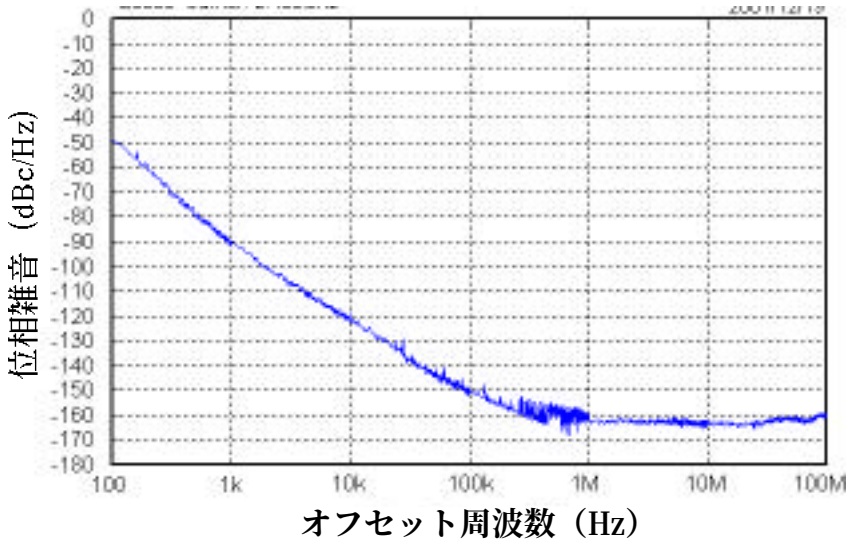


図５-１５．ダイヤモンドＳＡＷ共振器を用いた直接発振VCSOの位相雑音特性（2.488GHz）
（セイコーエプソン殿御提供）

表５-５．ダイヤモンドＳＡＷによるVCSOの特性表
（セイコーエプソン殿御提供）

項目		代表値	
中心周波数	fo	2488.32	MHz
動作温度	Tc	-40 ~ 85	C
印加電流	Icc	32	mA
印加電圧	Vcc	3	V
周波数調整域	f⊿	-330 ~ 140	ppm
出力レベル	Po	7	dBm
スプリアス抑圧	SP	-35	dBc
制御電圧	Vc	0 ~ 3	V

第６章　結論

本研究では、弾性表面波デバイスの高周波化の一つの有力な手段として、ダイヤモンド薄膜の高い位相速度を利用した新しいデバイスの検討を行い、実用に供するに至った研究の成果をまとめた。

１章では、本研究を開始するに至った背景について概観した。光通信、無線通信及び発振器分野で進む最近の状況を、またそれを支える周波数デバイスとして弾性表面波とＳＡＷデバイス材料について述べた。それらを前提に、本研究で取り上げるダイヤモンド系ＳＡＷデバイスの意義を述べた。

２章では、圧電薄膜／ダイヤモンド系ＳＡＷの特性をシミュレーションにより求めた。ＳＡＷ伝搬解析に広く用いられているCAMPBELL&JONES法を層構造に適応し、ＳＡＷデバイスとして必要なパラメータとして位相速度、電気機械結合係数と温度係数を求めた。計算は基板を選ばずｃ軸配向するZnOの利用という観点と、広くその他の圧電材料としてAlN、$LiTaO_3$、$LiNbO_3$を検討した。その結果、下記が明らかになった。

１）位相速度はどの圧電薄膜を用いても10,000m/s以上を確保出来、予想通りダイヤモンドを基板に用いたＳＡＷ材料は、高周波化に適する。

２）温度係数及び電気機械結合係数から総合的に判断して、下記材料系が適する。

○狭帯域用

SiO_2／IDT／ZnO／ダイヤモンド

セザワ波　２次モード

位相速度10,400m/s　電気機械結合係数1.4%　１次温度係数0ppm／度

○広帯域用

SiO_2／IDT／$LiNbO_3$／ダイヤモンド

セザワ波　１次モード

位相速度12,100m/s　電気機械結合係数10.1%　１次温度係数0ppm／度

３章では、ZnOが一般に基板を選ばず成膜すること、と狭帯域用途は高付加価値ＳＡＷデバイスの用途が多いこと　の２つの理由により、ZnOを圧電薄膜とSiO_2を温度補償膜とした材料系ＳＡＷデバイスを作製するための材料及びプロセスについて述べた。

まずダイヤモンドについては、実用化を考えて採用したフィラメントＣＶＤを用いて合成した。従来の応用と大きく異なるのはウェハ状のダイヤモンド合成となるため、反りを低減することであり、そのために設備上の電力制御や排気系を改善し

て、基板の温度制御をおこない、３インチで反りが20μm程度のウェハを合成した。また研磨についてはダイヤモンド砥粒を用いた乾式研磨を採用し、粗研磨とファイン研磨に分けて研磨することにより、欠陥密度が6個／cm^2の微細加工可能なウェハを得ることに成功した。
また実際にデバイス作製の結果をフィードバックしながら、伝搬損失低減に取組み、ラマン分光のダイヤモンドピークのＦＷＨＭと強い相関があることを見つけた。そして微粒ダイヤモンドを合成し、伝搬損失が0.02dB／λと極めて良好なウェハを得ることが出来た。

次に圧電薄膜としてＳＡＷデバイスの特性を決めるZnO薄膜について、マグネトロンスパッタリングによる成膜を検討した。挿入損失低減のために、バイアス印加によりｃ軸配向性を向上させる事と、異常成長領域を減らすために、RTAアニールを用いた２段階成長方式を開発し、良好なZnOを作製することが出来た。

またＳＡＷデバイスを作製するための一連のウェハプロセス及び実装プロセスを開発した。通常のＳＡＷデバイスにない工程としては、YAGレーザーによりダイヤモンドを除去した後にダイシングするチップ化工程を導入した。
また特にＳＡＷデバイス特性に影響を及ぼすIDT線幅制御の検討を行った。反応性イオンエッチングを用いたアルミ系電極のエッチングを行い、ZnOの上に薄いSiO_2層を導入することと、BCl_3にCl_2を添加することで、線幅制御できるようになり、ハーフミクロンの電極形成が出来た。以上により、2～5GHzのダイヤモンドＳＡＷデバイスを作製することができるようになった。

４章では、シミュレーションで求めたデバイスの基本性能の妥当性を実験により示した。まずZnO／ダイヤモンド系の２つの構造の位相速度及び電気機械結合係数の計測とシミュレーションとの比較を行い、位相速度は２％以内の精度で合致し、高周波化が可能あることを確認した。そして実際に、2.5から5GHzまでの周波数のダイヤモンドＳＡＷデバイスを作製する事に成功した。また電気機械結合係数も概ねよい一致を見ることを確認した。

次に温度補償については、ZnO／ダイヤモンドにSiO_2を積層した場合、シミュレーションより約30%膜厚を増やすことで、１次係数を零にできることを確認した。また実用上重要な２次係数については、ZnO及びSiO_2の膜厚を実験的に最適化を行い、SiO_2／ZnO／ダイヤモンド系が-0.017ppm／℃^{2}の２次係数を有し、従来の水晶の1／2以下となり、大きく凌駕することを見いだした。

またＳＡＷデバイス自体の課題でもある耐電力性について、高温での加速実験を行い、ダイヤモンド系ＳＡＷデバイスは従来材料より桁違いに優れていることを見いだした。これは弾性定数が高くＳＡＷ波の振幅が小さく、電極にダメージが少ないことと、熱伝導率が高く、電力から熱に変換されたエネルギがIDTの部分から素早

く放出されることと推測される。

伝搬損失の観点からは、ダイヤモンド上にZnOを成膜するSiO_2／IDT／ZnO／ダイヤモンド構造が優れていることがわかった。最後に信頼性試験と対策を行い、最も厳しい規格を満足する事を確認した。

以上、ZnOを圧電材料として用いたダイヤモンドＳＡＷデバイスは、シミュレーション通り高周波化が可能であり、また耐電力に富むこと、そしてSiO_2で温度補償すると水晶より温度特性に優れることを見いだした。伝搬損失の観点も考慮し、SiO_2／IDT／ZnO／ダイヤモンド構造が優れていることがわかった。

５章では、SiO_2／ZnO／ダイヤモンド構造を用いた高周波狭帯域ＳＡＷデバイスとして、光通信用フィルタ、無線通信用フィルタ及び発振器用共振器デバイスの作製例を述べた。

まず光通信用の受信信号再生に用いるタイミング抽出フィルタであるが、２ポート共振器の設計により、スプリアスを抑圧させた2.488GHzの狭帯域フィルタを実現した。水晶に比べて温度変動、遅延変動が半分以下と小さく、6dB台の低損失のフィルタが出来た。これを2.488Gbpsの光通信用受信モジュールに適応し、受信感度、各種ジッタ特性とそれらの温度特性に優れる性能を得る事に成功した。

次に、無線通信用狭帯域フィルタへの適応例として、WCDMA基地局間通信用パイロット信号抽出フィルタを作製した。携帯機器の通信に用いる60MHz帯域での抑圧を確保し、耐電力性に優れるダイヤモンドＳＡＷデバイスの特徴を充分に活かし、WCDMAの高電力投入に耐えるデバイスを作製出来た。

最後に、発振器用共振器への適応をおこなった例について述べた。従来の低周波信号の逓倍による位相雑音及びジッタ成分の増加や、逓倍回路そのものによる大型化や電力増大、などを抜本解決する直接発振方式が、光、無線通信及びＯＡ各種機器で期待されている。ダイヤモンドＳＡＷデバイスを用いて、高いQ値を与える設計を行い、高周波共振器を作製し、実際に高周波VCSOとして、極めて高性能の発振器を得ることが出来た。以上の成果は、いずれも通信システムの実機での採用に結び付く成果となり、これを元に量産するに至った。

将来、上記のSiO_2／IDT／ZnO／ダイヤモンドを用いた狭帯域フィルタ、共振器のさらなる用途展開を行うと共に、本研究で行った5GHzまでの周波数を、さらに10GHzまで上げる事が重要な課題となる。また本研究でシミュレーションを行い有望と思われる広帯域用のSiO_2／IDT／$LiNbO_3$／ダイヤモンドを実現していく事が重要であり、それが達成されれば高周波で、狭帯域と広帯域の双方にダイヤモンドを利用する事が可能になる。

付録

ここには、第２章で記載したＳＡＷ伝搬の取扱い理論の計算について付録として記載する。

（１）構成方程式の詳細

ＳＡＷの伝搬は６種類の構成方程式より決定される。６種類の構成方程式は２種類の圧電方程式、２種類のマクスウェル方程式、運動方程式、及び歪みと変位の関係式からなり、これらを境界条件を満足する条件下で連立させる事により求められる。［1,2,3］

＜圧電方程式＞

$$T_{ij} = c_{ijkl}S_{kl} - e_{kij}E_k \qquad (A1)$$

$$D_i = \varepsilon_{ik}E_k + e_{ikl}S_{kl} \qquad (A2)$$

ここで歪みは２次テンソル、スティフネスは４次テンソルである。

＜マクスウェル方程式＞

▽・**D**＝　q　で圧電体は絶縁体であり0とすると

$$\frac{\partial D_i}{\partial x_i} = 0 \qquad (A3)$$

$$E_i = -\frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \qquad (A4)$$

<運動方程式>

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial x_i} = \rho\frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} \qquad (A5)$$

＜歪みと変位の関係＞

$$S_{kl} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k}\right) \qquad (A6)$$

ここで、Tは応力、Sは歪み、Eは電界強度、Dは電束密度、φはポテンシャル、そしてuは粒子変位を示す。また、c、e、ε、ρは材料定数であり、それぞれ弾性スティフネステンソル、圧電テンソル、誘電率テンソル、密度である。また、サブスクリプト1はx方向、2はy方向、3はz方向を意味する。（Ａ１）から（Ａ６）においてテンソルの記述はEinsteinの記述に併せている。即ち、式の中で同じ記号が現われた場

合、1から3までの総和を意味する。例えば、式（Ａ３）の場合、

$$\frac{\partial D_1}{\partial x_1} + \frac{\partial D_2}{\partial x_2} + \frac{\partial D_3}{\partial x_3} = 0 \qquad (A7)$$

を意味する事になる。

式（Ａ１）から（Ａ６）をまとめ、対称性を考慮すると、６種類の構成方程式を変位uとポテンシャルφの関数として次の様にまとめられる。

$$c_{ijkl}\frac{\partial^2 u_k}{\partial x_i \partial x_l} + e_{kij}\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_k \partial x_l} = \rho\frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} \qquad (A8)$$

$$e_{ikl}\frac{\partial^2 u_k}{\partial x_i \partial x_l} - \varepsilon_{ik}\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i \partial x_k} = 0 \qquad (A9)$$

（２）境界条件

式（Ａ８）、及び（Ａ９）は境界条件の下で解が求められる。境界条件は、基板下面での剛性条件、及び、基板表面での境界条件からなり、基板表面では表面状態により、境界条件は異なる。以下境界条件を列挙する。

＜剛性条件、応力条件＞

機械的境界条件であり、基板表面の状態に依らず、満足される境界条件である。

$u_i = 0$　（基板下面での境界条件）　（Ａ１０）

$T_{i3} = 0$　（基板表面での境界条件）　（Ａ１１）

＜電気的境界条件（表面フリー）＞

電気機械結合係数を求める際に必要となる境界条件である。境界条件はラプラス方程式であり、基板表面での電束密度の連続性より求められるものである。

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_3^2} = 0$$

（基板表面での境界条件）　（Ａ１２）

＜電気的境界条件（表面ショート）＞

電気機械結合係数を求める際に必要とされる。基板表面を導電性の膜で覆った場合に相当する。

$\varphi = 0$　（基板表面での境界条件）　（Ａ１３）

バルクの場合には、以上の境界条件で求められるが、層構造の場合には、２章で記

載したように、各層間で粒子変位（u）、応力（T）、電束密度の法線成分（D）、及びポテンシャル（φ）が連続であるという条件が新たに加わる。例えば、ZnO／ダイヤモンド構造の場合、以下の条件が加わる事になる。

＜ダイヤモンドとＺｎＯとの界面＞

$$u_i^{dia} = u_i^{ZnO},\quad T_{i3}^{dia} = T_{i3}^{ZnO},\quad D_i^{dia} = D_i^{ZnO},\quad \varphi^{dia} = \varphi^{ZnO} \qquad (A14)$$

対称性

材料定数は上述の様に２次から４次のテンソルで表わされるが、対称性を考慮すると、テンソルの次数を低減出来る。一般的には、サブスクリプトijとklをペアとして扱い、表２-１の様にまとめられる。

表２-１．対称性の関係

ij or kl	11	22	33	23=32	13=31	12=21
対称性	1	2	3	4	5	6

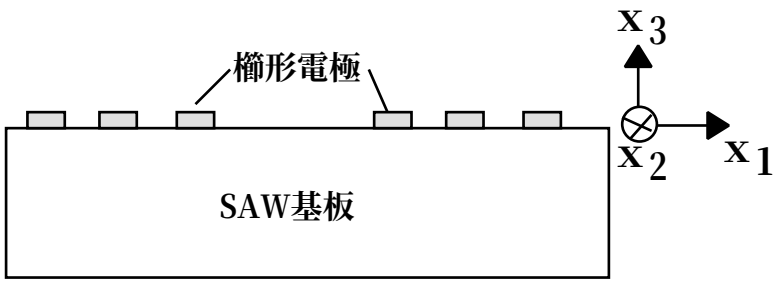
（３）CAMPBELL&JONES法

CAMPBELL ＆ JONES法は、１９６０年代に発表された解析手法であり、ＳＡＷの伝搬速度の解析に広く用いられている手法である［4］。この手法は構成方程式の一般解として変位、及びポテンシャルを次の関数で近似する手法である。

$$u_i = A_i \exp(jkbx_3)\exp\left[jk\left(vt-x_1\right)\right] \qquad (A15)$$

$$\varphi = A_4 \exp(jkbx_3)\exp\left[jk\left(vt-x_1\right)\right] \qquad (A16)$$

伝搬方向は図２-１の様に、x_1方向、深さ方向はx_3方向を仮定している。ここで、Ａは定数であり、jは複素数、kは波数、Vは位相速度を表わしている。また、y方向には一様とし、x_2方向の偏微分は零とする。



図Ａ１．座標系

式（Ａ１５）、及び、（Ａ１６）を（Ａ８）、及び（Ａ９）に代入すると次の様な特性方程式が得られる。

$$\begin{bmatrix} \Gamma_{11}-\rho v^2 & \Gamma_{12} & \Gamma_{13} & \Gamma_{14} \\ \Gamma_{12} & \Gamma_{22}-\rho v^2 & \Gamma_{23} & \Gamma_{24} \\ \Gamma_{13} & \Gamma_{23} & \Gamma_{33}-\rho v^2 & \Gamma_{34} \\ \Gamma_{14} & \Gamma_{24} & \Gamma_{34} & \Gamma_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{bmatrix} = 0 \qquad (A17)$$

ここで

$$\Gamma_{11} = c_{55}b^2+2c_{15}b+c_{11} \qquad (A18a)$$

$$\Gamma_{22} = c_{44}b^2+2c_{46}b+c_{66} \qquad (A18b)$$

$$\Gamma_{33} = c_{33}b^2+2c_{35}b+c_{55} \qquad (A18c)$$

$$\Gamma_{12} = c_{45}b^2+(c_{14}+c_{56})b+c_{16} \qquad (A18d)$$

$$\Gamma_{13} = c_{35}b^2+(c_{13}+c_{55})b+c_{15} \qquad (A18e)$$

$$\Gamma_{23} = c_{34}b^2+(c_{36}+c_{45})b+c_{56} \qquad (A18f)$$

$$\Gamma_{14} = e_{35}b^2+(e_{15}+e_{31})b+e_{11} \qquad (A18g)$$

$$\Gamma_{24} = e_{34}b^2+(e_{14}+e_{36})b+e_{16} \qquad (A18h)$$

$$\Gamma_{34} = e_{33}b^2+(e_{13}+e_{35})b+e_{15} \qquad (A18i)$$

$$\Gamma_{44} = -(\varepsilon_{33}b^2+2\varepsilon_{13}b+\varepsilon_{11}) \qquad (A18j)$$

式（Ａ１７）でＡが０以外の解を持つ為には、

$$\det\left(\Gamma_{ij}-\delta_{ij}\rho v^2\right) = 0 \qquad (i,j=1\sim4) \qquad (A19)$$

でなければならない。ここで、δ_{ij}は

$$\delta_{ij} = 1 \quad (i=j, i\neq4)$$

$$\delta_{ij} = 0 \text{（それ以外）} \qquad (A20)$$

式（Ａ１７）でb及びVは未知数である。Vとしてある値を仮定し、式（Ａ１９）を満足する条件は、式（Ａ１８）、及び（Ａ１９）より未知数bに対し８次方程式が得られ、８つの根が得られる。変位u_i、及びポテンシャルφはその結果、８つの波の

線形結合で次式の様に表わされる。

$$u_i = \sum_{n=1}^{8} C_n A_i^{(n)} \exp(jkb^{(n)} x_3) \exp\left[jk\left(vt - x_1\right)\right] \qquad (A21)$$

$$\varphi = \sum_{n=1}^{8} C_n A_4^{(n)} \exp(jkb^{(n)} x_3) \exp\left[jk\left(vt - x_1\right)\right] \qquad (A22)$$

ここで、c_nは定数である。通常良く用いられる圧電体基板（水晶、$LiTaO_3$等のバルク基板）では、SAWのエネルギーが表面付近に集中する為、半無限基板を仮定している。この条件では、x_3が$-\infty$でＳＡＷが存在しない事が前提となるので、real (b) > 0が必要条件となる。bは複素共役であるため、８つのbの解の内、４つの解が有効となり、変位、及び、ポテンシャルは４つの波の線形結合で表わされる。従って、

$$u_i = \sum_{n=1}^{4} C_n A_i^{(n)} \exp(jkb^{(n)} x_3) \exp\left[jk\left(vt - x_1\right)\right] \qquad (A23)$$

$$\varphi = \sum_{n=1}^{4} C_n A_4^{(n)} \exp(jkb^{(n)} x_3) \exp\left[jk\left(vt - x_1\right)\right] \qquad (A24)$$

また、表面での境界条件（T、Dまたはφに対する境界条件）は変位とポテンシャルの関数で表わされ、（Ａ２３）、（Ａ２４）式を用いる事により、応力Dで３種類、電束密度Ｄあるいはφに対し１種類の式計４種類の式が得られる。これらをまとめると、定数Cに関して次の関係を満足する。

$$[G]\ [C] = 0 \qquad (A25)$$

Ｇは４行４列のマトリクスであり、Ｃは$[C_1, C_2, C_3, C_4]^t$である。
ここでｔは行列の転置を表わす。式（２-２５）でCが零でない解を有する条件は、

$$\det(G) = 0 \qquad (A26)$$

が得られなければならない。従って、ＳＡＷの位相速度Vを変えて、条件（Ａ２６）を満足する様なVが得られれば、それが求めたい位相速度となる。

（４）層構造へのCAMPBELL ＆ JONES法の適用

以上の例がバルク基板の場合であるが、層構造の場合、さらに各層間での境界条件を満足する必要があり、半無限基板は最下層の基板のみしか適用されない為、最下層基板を除き、各層８つの未知定数が現われる。例えば、ZnO／ダイヤモンド構造を例に取ると、各層で特性方程式（Ａ８）、（Ａ９）を満足する様な変位、及びポテンシャルの一般解が次式で与えられる。

$$u_i^{Dia} = A_i^{Dia} \exp(jkb_{Dia} x_3) \exp(jk(vt - x_1)) \qquad (A27)$$

$$\Phi_i^{Dia} = A_i^{Dia} \exp(jkb_{Dia} x_3) \exp(jk(vt-x_1)) \quad (A28)$$

$$u_i^{ZnO} = A_i^{ZnO} \exp(jkb_{ZnO} x_3) \exp(jk(vt-x_1)) \quad (A29)$$

$$\Phi_i^{ZnO} = A_i^{ZnO} \exp(jkb_{ZnO} x_3) \exp(jk(vt-x_1)) \quad (A30)$$

但し、A_m^{Dia}、$A_m^{ZnO}(m=1\sim4)$は定数である。式（Ａ２７）、（Ａ２８）を式（Ａ８）、（Ａ９）に代入すると、未知数b_{Dia}に対し式（Ａ１９）を満足する８次方程式が得られ、８つの解が得られる。同様に、ZnO層に対しても、式（Ａ２９）、（Ａ３０）を式（Ａ８）、（Ａ９）に代入すると、未知数b_{ZnO}に対し８次方程式が得られ、８つの解が得られる。変位ｕｉ、及びポテンシャルφはその結果、８つの波の線形結合でそれぞれ次式の様に表わされる。

$$u_i^{Dia} = \sum_{n=1}^{8} C_n^{Dia} A_i^{Dia(n)} \exp(jkb_{Dia}^{(n)} x_3) \exp(jk(vt-x_1)) \quad (A31)$$

$$\Phi_i^{Dia} = \sum_{n=1}^{8} C_n^{Dia} A_4^{Dia(n)} \exp(jkb_{Dia}^{(n)} x_3) \exp(jk(vt-x_1)) \quad (A32)$$

$$u_i^{ZnO} = \sum_{n=1}^{8} C_n^{ZnO} A_i^{ZnO(n)} \exp(jkb_{ZnO}^{(n)} x_3) \exp(jk(vt-x_1)) \quad (A33)$$

$$\Phi_i^{ZnO} = \sum_{n=1}^{8} C_n^{ZnO} A_4^{ZnO(n)} \exp(jkb_{ZnO}^{(n)} x_3) \exp(jk(vt-x_1)) \quad (A34)$$

ダイヤモンド層はバルク基板を仮定するため、x_3が－∞でＳＡＷが存在しないためには８つのb_{Dia}の解の内、４つの解が有効となり、変位、及び、ポテンシャルは４つの波の線形結合で表わされる。従って、（Ａ３１）、（Ａ３２）は、

$$u_i^{Dia} = \sum_{n=1}^{4} C_n^{Dia} A_i^{Dia(n)} \exp(jkb_{Dia}^{(n)} x_3) \exp(jk(vt-x_1)) \quad (A35)$$

$$\Phi_i^{Dia} = \sum_{n=1}^{4} C_n^{Dia} A_4^{Dia(n)} \exp(jkb_{Dia}^{(n)} x_3) \exp(jk(vt-x_1)) \quad (A36)$$

の様に現すことが出来る。

式（Ａ３３）、（Ａ３４）、（Ａ３５）及び（Ａ３６）から１２の未知数に対し積層構造を考慮して、ZnO表面で応力の境界条件、表面でのポテンシャルあるいは電束密度の境界条件、ダイヤモンドとZnOの応力の連続性、変位の連続性、電束密度の法線方向の連続性、及びポテンシャルの連続性から計１２の方程式が得られ、解は一位に得られる事になる。これらをまとめると以下の関係が得られる。

$$[G]\ [C] = 0 \qquad (A37)$$

ここで、［G］は１２×１２のマトリクスであり、［C］は

$$[C] = [C1^{Dia}, C2^{Dia}, C3^{Dia}, C4^{Dia}, C1^{ZnO}, C2^{ZnO}, C3^{ZnO}, C4^{ZnO}, C5^{ZnO}, C6^{ZnO}, C7^{ZnO}, C8^{ZnO}]^{t} \qquad (A38)$$

で与えられる。

２-２-２と同様に、式（２-３７）でマトリクスＣが零行列でない解を有する条件は、

$$\det(G) = 0 \qquad (A39)$$

が得られなければならない。

従って、ＳＡＷの位相速度Vを変えて、条件（Ａ３９）を満足する様なVが得られば、それが求めたい位相速度となる。

（５）電気機械結合係数、温度係数の計算方法

ａ）電気機械結合係数

次に電気機械結合係数K^2の求め方について記す。一般的に圧電物質においては、

$$K^2 = (C_0 - C_s)/C_0$$
$$= \{(V_0)^2 - (V_s)^2\}/(V_0)^2$$
$$= 2*(V_0 - V_s)/V_0 \qquad (A40)$$

ここで、

C_0：表面が電気的にオープンの時のスティフネス
C_s：表面が電気的にショートしている時のスティフネス
V_0：表面が電気的にオープンの時の弾性波速度
V_s：表面電気的にショートしている時の弾性波速度

の関係があり、表面弾性波に関する変換効率の指標としても近似的にこの関係を準用する。V_0及びV_sは、前述のCampbell&Jones法より得られるので、これらよりK^2が計算できる。例えば、Ａ２図(d)の構造のK^2は、Ａ２図(a)の構造での表面波速度(V_0)とＡ２図(b)の構造での表面波速度（V_s）から（Ａ４０）式により導出される。同様に、Ａ２図(e)の構造のK^2は、Ａ２図(a)の構造での表面波速度（V_0）とＡ２図(c)の構造での表面波速度（V_s）から導出される。

ｂ）温度係数

次に温度係数の求め方について記す。弾性表面波特性の温度係数には、下記の２つが使用される。

ａ）遅延時間温度係数　ＴＣＤ（Temperature Coefficient of Delay）

ｂ）周波数温度係数　　ＴＣＦ（Temperature Coefficient of Frequency）

各々の定義は下記の通りである。

まずその前に速度温度係数ＴＣＶ（Temperature Coefficient of Velocity）は位相速度の温度係数につき（２-４１）で表される。

$$TCV = \frac{\partial V}{\partial T} \qquad (A41)$$

実際の素子ではこれに材料の熱膨張による変化を考慮し、ＴＣＶを用いて、遅延時間の係数として（２-４２）を求める。

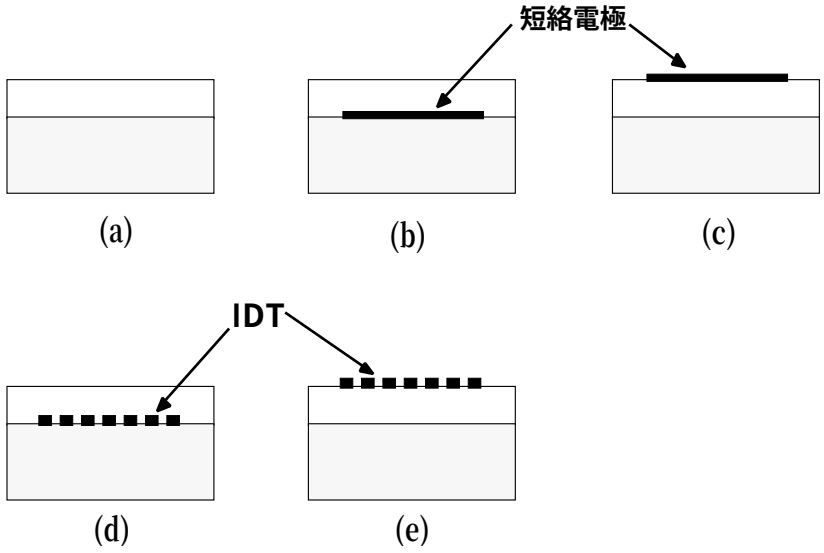
$$TCD = \frac{1}{\tau}\frac{\partial \tau}{\partial T} = \frac{1}{l}\frac{\partial l}{\partial T} - \frac{1}{V}\frac{\partial V}{\partial T} = \alpha - \frac{1}{V}\frac{\partial V}{\partial T} \qquad (A42)$$

ここでτは遅延時間、αは材料の熱膨張係数である。

なお、ＴＣＤは計測の容易さから周波数に換算して下記で議論する事も多い。

$$TCF = -TCD \qquad (A43)$$

実際の計算での数値は、δTを T30℃-T20℃ として、求めた。



図Ａ２．　３層構造ＳＡＷの各種配置

付録　参考文献

［1］ 弾性表面波素子技術ハンドブック
日本学術振興会弾性表面波素子技術150委員会編　オーム社平成３年

［2］ C.Campbell,
Surface coustic Wave Devices and their Signal Processing Applications,
Academic Press (1989)

［3］ D.P.Morgan,
Surface Wave Devices for Signal Processing,
Elsevier (1985)

［4］ J.J.Campbell and W.R.Jones,
"A Method for Estimating Optimal Crystal Cuts and Propagation Direction for Excitation of Piezoelectric Surface Waves",
IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics, 15, 209 (1968)

研究業績　リスト

１.論文　及び　国際学会

1) S. Shikata, H. Nakahata, A. Hachigo, and N. Fujimori,
" High-frequency bandpass filter using polycrystalline diamond,"
Diamond and Related Materials, 2, p. 1197~1202 (1993)

2) A.Hachigo,H.Nakahata,K.Higaki, S.Fujii, and S.Shikata,
"Heteroepitaxial growth of ZnO films on diamond (111) plane by magnetron sputtering", Appl.Phys.Lett.,65,p2556~2558 (1994)

3) H. Nakahata, K. Higaki, A. Hachigo, S. Shikata, N. Fujimori, Y.Takahashi, T. Kajiwara and Y. Yamamoto,
"High frequency surface acoustic wave filter using ZnO/diamond/Si structure,"
Jpn. J. Appl. Phys., vol. 33,No.1A, p. 324~328, (1994)

4) H. Nakahata, A. Hachigo, K. Higaki, S. Fujii, A. Hachigo, S. Shikata, and N. Fujimori, " Theoretical Study on SAW Characteristics of Layered Structures Including a Diamond Layer" IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 42, No. 2, p. 362~375 (1995)

5) K. Higaki, H. Nakahata, H. Kitabayashi, S. Fujii, K. Tanabe, Y. Seki and S. Shikata,
" High Power Durability of Diamond Surface Acoustic Wave Filter,"
IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 44, No. 6, p.1395 ~1400 (1997)

6) H. Nakahata, H. Kitabayashi, T. Uemura, A. Hachigo, K. Higaki, S. Fujii,Y. Seki, K. Yoshida and S. Shikata,
"Study on Surface Acoustic Wave Characteristics of SiO_2/IDT/ZnO/Diamond Structure and Fabrication of 2.5 GHznarrow band filter,"
Jpn. J. Appl. Phys., vol. 37, No.5B, p. 2918~2922, (1998)

7) S.Shikata, H.Nakahata and A.Hachigo,
"New Material Systems for Diamond Surface Acoustic Wave Devices"
New Diamond and Frontier Carbon Technology,9, p75~92 (1999)

8) M. Ishihara, T. Manabe, T. Kumagai, T. Nakamura, S. Fujiwara, Y. Ebata, S. Shikata, H. Nakahata, A. Hachigo and Y. Koga,
"Synthesis and Surface Acoustic Wave Property of Aluminum Nitride Thin Films Fabricated on Silicon and Diamond Substrates Using the Sputtering Method,"
Jpn. J. Appl. Phys., vol. 40, No. 8, p. 5065, (2001)

9) T.Uemura, S.Fujii, H.Kitabayashi, K.Itakura, A.Hachigo, H.Nakahata and S.Shikata,
"Low loss Diamond Surface Acoustic Wave Devices Using Small Grain Poly-Crystalline Diamond"
Jpn. J. Appl. Phys., vol. 41, No. 5B, p. 3476~3479, (2002)

10) H.Nakahata, A.Hachigo, S.Fujii and S.Shikata,
"Equivalent Circuit Paameters of Surface Acoustic Wave Interdigital Transducers for ZnO/Diamond/ and SiO2/ZnO/Diamond Structures"
Jap.J.Appl.Phys., 41, 3489-3493 (2002)
11) S.Shikata, H.Nakahata and A.Hachigo,
"Simulation of the Characteritics of SiO_2/c-axis Oriented $LiNbO_3$ on Diamond Surface Acoustic Wave"
IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control., received Sept.25. 2003
12) S.Shikata, A,Hachigo, H.Nakahata, and M.Narita,
"Simulation of the Characteristics of Single Crystal $LiNbO_3$ on Diamond Surface Acoustic Wave"
IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control., received Oct.31.2003
13) S.Fujii, S.Shikata, T.Uemura, and H.Nakahata,
"Influence of Crystalline Quality of Diamond on Propagation Loss of Diamond Surface Acoustic Wave Devices"
IEEE Electronic Materials, to be submitted March., 2004
14) S.Shikata, A,Hachigo, H.Nakahata, and M.Narita,
"Simulation of the Characteristics of Single Crystal $KNbO_3$ on Diamond Surface Acoustic Wave"
New Diamond and Frontier Carbon Technology, to be submitted Mar, 2004

1) H. Nakahata, A. Hachigo, S. Shikata and N. Fujimori,
"High Frequency Surface Acoustic Wave Filter Using ZnO/Diamond Structure,"
IEEE Ultrason.Symp. Proc., p. 377~380 (1992)
2) S. Shikata, H. Nakahata, K. Higaki, A. Hachigo, and N. Fujimori,
" 1.5GHz SAW bandpass filter using poly-crystalline diamond"
IEEE Ultrasonics Symp., p. 277~280, (1993)
3) S.Shikata, Y.Nishibayashi, T.Tomikawa, N.Toda, and N.Fujimori,
"Microfabrication Technique for Diamond Devices"
2nd Int'l Conf. Appl. of Diamond Films and Related Materials, p377~380 (1993)
4) S. Shikata, H. Nakahata, K. Higaki, S. Fujii, A. Hachigo, and N.Fujimori,
" 2.5GHz SAW bandpass filter using poly-crystalline diamond,"
4th Int'l Conf.New Diamond Science and Technol., p. 697~700 (1994)
5) H.Nakahata, K.Higaki, S.Fujii, H.Kitabayashi, Y.Seki, K.Tanabe, and S.Shikata,
"SAW Device on Diamond"
IEEE Ultrasonics Symp.p361~370 (1995)
(Invited)

6) S.Shikata, H.Nakahata, K.Higaki, S.Fujii, A.Hachigo, H.Kitabayashi, Y.Seki, K.Tanabe and N.Fujimori,
"SAW filters based on diamond" 3rd Int'l Conf. Appl. of Diamond Films and Related Materials, Proc, p21〜28 (1995)
(Invited)

7) H. Nakahata, H. Kitabayashi, S. Fujii, K. Higaki, K. Tanabe, Y. Seki and S. Shikata,
"Fabrication of 2.5 GHz SAW retiming filter with SiO_2/ZnO/diamondStructure,"
IEEE Ultrason. Symp. Proc., p. 285~288, (1996)

8) S. Fujii, Y. Seki, K. Yoshida, H. Nakahata, K. Higaki, H. Kitabayashi and S. Shikata,
"Diamond wafers for SAW application,"
IEEE Ultrason. Symp.Proc., p. 183~186 (1997)

9) H. Nakahata, H. Kitabayashi, T. Uemura, A. Hachigo, K. Higaki, S. Fujii and S. Shikata, "Diamond SAW filter for 2.488 Gbps retiming,"
IEEE Ultrason.Symp. Proc., p. 319~322 (1998)

10) H. Nakahata, A. Hachigo, K. Itakura, S. Fujii and S. Shikata,
"SAW Resonators of SiO_2/ZnO/diamond Structure in GHz Range,"
IEEE Freq.Cont. Symp. p. 315~320 (2000),

11) H. Nakahata, A. Hachigo, K. Itakura, and S. Shikata,
"Fabrication of High Frequency SAW Filters from 5 to 10 GHz using SiO_2/ZnO/Diamond Structure,"
IEEE Ultrason. Symp. Proc., p. 349~352 (2000)

12) T.Uemura, S.Fujii, H.Kitabayashi, K.Itakura, A.Hachigo, H.Nakahata, and S.Shikata
"Low Loss Diamond SAW Devices by Small Grain Size Poly-crystalline Diamond"
IEEE Ultrason. Symp. Proc.,p416~419 (2002)

２.国際学会　（査読なし）

1) H. Nakahata, K. Higaki, A. Hachigo, S. Shikata, N. Fujimori, Y.Takahashi, R. Kajihara, N. Sakairi and Y. Yamamoto,
" High-Frequency SurfaceAcoustic Wave Filter Using ZnO/Diamond/Si Structure,"
2nd Int`l Conf. on the Application of Diamond Films and Related Materials, p.361 (1993)

2) K. Higaki, H. Nakahata, H. Kitabayashi, S. Fujii, K. Tanabe, Y. Seki and S. Shikata,
"High frequency SAW filter on diamond,"
IEEE MTT-S Digest, p.829~832 (1997)

3) S. Shikata , H.Nakahata, K. Higaki, H. Kitabayashi, K. Tanabe, S. Fujii, and Y. Seki
"Diamond SAW Filter for Optical Fiber Communication Systems"
Int'l Symp. Advanced Materials (1997)
(Invited)

4) S.Shikata, H.Nakahata, S.Fujii, A.Hachigo, H.Kitabayashi, K.Itakura, T.Uemura, H.Toyoda, and N.Fujimori,
"High frequency SAW Devices using SiO_2/ZnO/Diamond",
Int'l Symp. Acoustic Wave Devices for Future Mobile Comm.Systems,
Proc.,227 (2001)
(Invited)

5) S.Shikata, H.Nakahata, S.Fujii, T.Uemura, Y.Takada, T.Kano, N.Itoh, and O.Iwamoto,
"High Frequency SAW Resonators by SiO_2/ZnO/Diamond and It's Application to Low Phase Noise VCSO"
2nd Int'l Symp. Acoustic Wave Devices for Future Mobile Comm.Systems,
Proc., 89 (2004)
(Invited)

6) S.Shikata, H.Nakahata, S.Fujii, A.Hachigo,H.Kitabayashi,K.Itakura, and T.Uemura
"Diamond SAW Device, Narrow Band and Wide Band" March (2004)
9th Int'l Conference for New Diamond Science and Technology
(Invited)

３.国内学会

1) 中幡，八郷，鹿田，藤森，
"ZnO/ダイヤモンド/Si三層構造を伝播する表面弾性波の検討",
1992年電子情報通信学会秋季大会予稿集， p. 1-232, (1992)

2) 鹿田、中幡、八郷、藤森
"ZnO / 多結晶ダイヤモンド構造の表面弾性波と高周波フィルタへの応用"
ダイヤモンドシンポジウム (1992)

3) 中幡，桧垣，八郷，鹿田，藤森，山本，高橋，坂入，
"ZnO/ダイヤモンド/Si構造の1.5GHzＳＡＷフィルタの試作",
電子情報通信学会秋季大会予稿集， p.1-258, (1993)

4)鹿田、中幡、桧垣、八郷、藤森
"ＺｎＯ／ダイヤモンド／Ｓｉ構造の高周波ＳＡＷフィルタ"
ダイヤモンドシンポジウム(1993)

5)桧垣， 中幡，藤井，八郷，鹿田，藤森，
"2.5GHzダイヤモンドＳＡＷフィルタの試作"
電子情報通信学会春季大会予稿集，p. 1-435, (1994)

6)高橋，坂入，山本，中幡，檜垣，藤井，八郷，鹿田，藤森，
"ダイヤモンド基板を用いたＳＡＷ共振器型フィルタの基礎検討",
電子情報通信学会秋季大会予稿集，p. A-227, (1994)

7)中幡，檜垣，藤井，八郷，鹿田，藤森、
"SiO_2/ZnO/ダイヤモンド構造を伝搬するSAWに関する理論計算",
電子情報通信学会秋季大会予稿集，p. A-228, (1994)

8)中幡，檜垣，藤井，鹿田，
"ｃ軸配向多結晶LiNbO3(LiTaO3)/ダイヤ/Si構造を伝搬するSAWに関する理論計算"，
電子情報通信学会秋季大会予稿集，p. A-146, (1995)
9)鹿田、中幡、桧垣、藤井、北林、関、田辺
"新構造の高周波ＳＡＷフィルタ"
ダイヤモンドシンポジウム(1995)
10)高橋，山本，坂入，中幡，檜垣，藤井，北林，鹿田，
"ダイヤモンド/Si基板を用いた1.5GHz帯トランスバーサル型SAWフィルタ"，
電子情報通信学会春季大会予稿集，p. A-315, (1996)
11)北林，中幡，檜垣，藤井，鹿田，山本，坂入，高橋，
"SiO2/ZnO/ダイヤモンド/Si構造SAWフィルタの検討"，
電子情報通信学会春季大会予稿集，p. A-316, (1996)
12)中幡，檜垣，北林，八郷，田辺，藤井，鹿田，山本，坂入，高橋，梶原，
"ダイヤモンドSAWフィルタ"，
電子情報通信学会技術報告，SAT96-42, MW96-53 (1996-07)
13)鹿田、中幡、桧垣、藤井、北林、関、田辺
"2.488GHz光通信用ダイヤモンドＳＡＷフィルタ"
ダイヤモンドシンポジウム(1996)
14)檜垣，中幡，北林，藤井，田辺，関，鹿田，
"ZnO/ダイヤモンドSAWフィルタの耐電力性"，
電子情報通信学会春季大会予稿集，p. A-286, (1997)
15)中幡，檜垣，北林，藤井，田辺，関，鹿田，
"ダイヤモンドSAWフィルタの特性と応用"，
電子情報通信学会春季大会予稿集，p. SA-502, (1997)
16) 成田，中幡，鹿田，
"LiNbO3/Diamond構造を伝搬するSAWに関する理論計算"，
応用物理学会予稿集秋季大会　（1997）
17) 鹿田、中幡、桧垣、藤井、関、村田、高橋
"ダイヤモンドＳＡＷフィルタを用いた高速光通信用受診モジュール"
ダイヤモンドシンポジウム(1997)
18) 中幡，桧垣，藤井，北林，関，吉田，上村，鹿田，
"ダイヤモンドＳＡＷフィルタの利点と応用"，
ダイヤモンドシンポジウム(1997)
19) 中幡，北林，桧垣，藤井，上村，関，鹿田
１８回超音波シンポジウムp. 47, (1997)
20) 中幡，桧垣，藤井，北林，関，鹿田，
"2.488 Gbps 光通信用ダイヤＳＡＷフィルタ"，
電子情報通信学会春季大会予稿集，A-11-25 (1998)
21) 村田，高橋，西江，中幡，鹿田，
"-40～85°C動作小型2.4Gbps　３Ｒ光受信モジュール"，
電子情報通信学会春季大会予稿集，B-10-184 (1998)
22) 八郷，中幡，板倉，鹿田，
"高調波を用いたZnO/diamond構造ＳＡＷフィルタ"，
第20回超音波シンポジウム　予稿集　ｐ.59　（1999）
23) 鹿田、中幡、桧垣、藤井、八郷、板倉
"高調波を用いた10GHzダイヤモンドＳＡＷフィルタ"
ダイヤモンドシンポジウム(1999)
24) 鹿田、気相ダイヤモンドによる高周波ＳＡＷフィルタ、先端技術シンポジウム
「圧電材料と弾性波デバイス」　ｐ165　（2000）
（招待講演）
25) 中幡，八郷，板倉，藤井，豊田，上村，鹿田，
"ZnO/ダイヤ系による薄膜SAWデバイス"，
第29回EMシンポジウム，p. 183 (2000)
26) 板倉，八郷，中幡，鹿田，
"SiO2/ZnO/ダイヤ構造によるGHz帯ＳＡＷデバイス"，

第21回超音波シンポジウム　予稿集p.155　（2000）
27) 板倉，八郷，中幡，鹿田，
"高調波を用いたSiO2/ZnO/ダイヤモンド構造による10GHzＳＡＷフィルタ"，
電子情報通信学会春季大会予稿集，A-11-26 (2000)
28)鹿田
"ダイヤモンド薄膜の形成とデバイス応用"
精密学会　学術講演会　(2001)
（招待講演）
29) 中幡，藤井，鹿田，
"ダイヤモンドＳＡＷデバイスの技術動向"，
平成14年電気学会　電子情報システム部門大会 講演論文集ＣＤ　TC3-3 (2002)
30) 鹿田、中幡、藤井、八郷、北林、上村、板倉、
高周波ダイヤモンドＳＡＷ共振器、
圧電材料・デバイスシンポジウム　55、（2003）
（招待講演）

４.雑誌

1) S.Shikata,
"The road to commercialization of Vapor Phase Grown Diamond"
MRS Bulletin, Vol.23, No.9 p61, (1998)
2) 鹿田，中幡，
"ダイヤモンドＳＡＷフィルタ"，
電子情報通信学会誌, vol. 81, No. 3, p. 240 (1998)
3) 鹿田，
"ダイヤモンド高周波ＳＡＷフィルタへの応用"，
セラミックス, vol.33, No.6, p. 458 (1998)
4) 鹿田，中幡，桧垣，藤井，関，北林，
"狭帯域ダイヤモンドＳＡＷフィルタと超高速光リンクへの適用"，
NEW DIAMOND, vol. 14, No. 2, p.22 (1998)
5) 鹿田、中幡、藤井、桧垣、八郷、北林、関、田辺、藤森、
"ダイヤモンドＳＡＷデバイス（１）"，
ＮＥＷ　ＤＩＡＭＯＮＤ, vol.15、No.2, p. 28 (1999)
6) 鹿田、中幡、藤井、桧垣、八郷、北林、関、田辺、藤森、
"ダイヤモンドＳＡＷデバイス（２）"，
ＮＥＷ　ＤＩＡＭＯＮＤ, vol.15、No.3, p. 19 (1999)
7) 鹿田，中幡，藤井，
"ダイヤモンドＳＡＷデバイス"，
応用物理 第71巻 第3号p.327　（2002）

５.著書

1) S.Shikata
Low-Pressure Synthetic Diamond
Chapter 14, "CVD Diamond for Surface Acoustic Waver Filters"
Springer　Verlag、 Berlin Heidelberg, 1998
共著

2)鹿田真一
高周波セラミックス材料とその応用、
４章, "ダイヤモンドを利用したＳＡＷフィルタ"
ＴＩＣ社 1998
共著

3) S.Shikata and N.Fujimori
Electric Refractory Materials,
Chapter 17, "Diamond Devices"
Marcel Dekker, Inc. New York, 2000
共著

4)鹿田真一
先端高機能材料
５編 "弾性表面波材料"
ＮＧＴ社 2001
共著

5) S.Shikata and H.Nakahata
Thin Film Diamond
Chapter 15 "SAW devices",
Academic Press, 2004
共著

6) 鹿田真一
弾性波デバイス技術
３章３　"ダイヤモンド"
オーム社 2004出版予定
共著

６.出願特許リスト

発明考案者　出願日　公開番号　　発明の名称

1) 八郷、中幡、鹿田、藤森
　1991.9.19　H05083078　　弾性表面波素子及びその製造方法
2) 八郷、中幡、鹿田、藤森
　1991.9.27　H05090871　　表面弾性波素子
3) 八郷、中幡、鹿田、藤森
　1991.9.27　H05090860　　表面弾性波素子の製造方法
4) 八郷、中幡、鹿田、藤森
　1991.9.27　H05090861　　表面弾性波素子の製造方法
5) 中幡、鹿田、八郷、藤森
　1991.9.26　H05090886　　表面弾性波素子
6) 中幡、鹿田、八郷、藤森
　1991.9.26　H05090887　　表面弾性波素子
7) 中幡、鹿田、八郷、藤森
　1991.9.26　H05090888　　表面弾性波素子の製造方法
8) 中幡、鹿田、八郷、藤森
　1991.9.26　H05090893　　表面弾性波素子
9) 鹿田、中幡、八郷、藤森
　1991.9.26　H05090874　　表面弾性波素子
10)鹿田、中幡、八郷、藤森
　1991.9.27　H05090872　　表面弾性波素子
11)鹿田、中幡、八郷、藤森
　1991.9.25　H05083068　　表面弾性波素子
12)中幡、鹿田、八郷、藤森
　1991.9.24　H05083067　　表面弾性波素子
13)中幡、八郷、鹿田、藤森
　1992.2.21　H05235683　　表面弾性波素子及びその製造方法
14)中幡、鹿田
　1992.3.16　H05260596　　超音波振動子
15)富川、鹿田
　1992.7.31　H06049668　　ダイアモンドのエツチング方法
16)富川、鹿田
　1992.7.31　H06049669　　ダイアモンドのエッチング方法
17)中幡、八郷、桧垣、鹿田、藤森
　1992.9.2　H05199065　　表面弾性波素子
18)鹿田、八郷、中幡、桧垣
　1992.9.11　H06097760　　表面弾性波素子および表面弾性波素子の製造方法
19)鹿田、中幡、八郷、藤森
　1992.9.22　H05199057　　表面弾性波素子およびその製造方法
20)西林、鹿田、富川、藤森
　1992.10.16　H06132254　　ダイヤモンドのエッチング方法
21)西林、鹿田
　1992.12.16　H06183893　　ダイヤモンド基板のクリーニング方法
22)檜垣、中幡、八郷、鹿田
　1993.1.29　H06232677　　表面弾性波素子
23)中幡、八郷、桧垣、鹿田
　1993.9.7　H06164294　　表面弾性波素子
24)藤井、桧垣、西林、鹿田
　1994.3.4　H07041388　　ダイヤモンドの平坦化法および研磨法
25)檜垣、中幡、八郷、鹿田
　1994.2.15　H06299359　　多結晶ダイヤモンド基板およびその製造方法

26)八郷、中幡、桧垣、藤井、鹿田、田辺
1994.3.25 H07273591 表面弾性波素子
27)鹿田、中幡、桧垣、藤井、八郷
1994.6.20 H08008686 表面弾性波素子用ダイヤモンド基材及び素子
28)八郷、中幡、桧垣、藤井、鹿田
1994.5.27 H07321596 配向性材料および表面弾性波素子
29)八郷、中幡、桧垣、藤井、鹿田
1994.6.10 H07330491 配向性材料および表面弾性波素子
30)中幡、桧垣、藤井、八郷、鹿田
1994.9.2 H08065088 表面弾性波素子
31)中幡、桧垣、藤井、八郷、鹿田
1994.9.2 H08032398 表面弾性波素子
32)檜垣、中幡、藤井、北林、鹿田
1994.11.29 H08154033 ダイヤモンド基材および表面弾性波素子
33)檜垣、中幡、藤井、北林、鹿田
1995.3.20 H08265098 複合体基材および表面弾性波素子
34)中幡、桧垣、藤井、北林、鹿田
1995.2.9 H08222990 表面弾性波素子
35)藤井、中幡、桧垣、北林、鹿田
1995.6.2 H08330882 表面弾性波素子基板及びその製造方法
36)檜垣、中幡、藤井、北林、鹿田
1995.4.3 H08274571 表面弾性波素子用ダイヤモンド基材及び素子
37)田辺、関、藤森、中幡、鹿田
1995.3.31 H07326553 ダイヤモンドウエハーとその製造方法
38)中幡、桧垣、藤井、北林、鹿田
1995.8.8 H09051248 表面弾性波素子
39)北林、中幡、桧垣、藤井、鹿田
1995.9.29 H09098059 表面弾性波素子
40)檜垣、中幡、藤井、北林、鹿田
1996.1.26 H09205340 表面弾性波素子用ダイヤモンド基材と素子及びその製造方法
41)中幡、成田、桧垣、藤井、北林、鹿田
1996.2.9 H09219632 表面弾性波素子
42)高橋、山本、坂入、鹿田、中幡、桧垣、藤井、北林
1996.2.19 H09223943 弾性表面波デバイス
43)鹿田、中幡、桧垣、北林、田辺、藤井、関
1998.1.8 H11201951 表面弾性波センサ
44)藤井、関、田辺、桧垣、中幡、吉田、鹿田
1998.4.7 H11292692 硬質炭素膜および硬質炭素基板
45)藤井、関、吉田、中幡、桧垣、北林、上村、鹿田
1997.10.6 H11116387 ダイヤモンド基板及びダイヤモンド表面弾性波フィルタ
46)中幡、上村、桧垣、藤井、北林、鹿田
1997.11.7 H10276061 表面弾性波素子及び製造方法
47)檜垣、豊田、上村、藤井、中幡、鹿田
1998.6.29 2000-021819 ダイヤモンドウェハのチップ化方法
48)上村、中幡、桧垣、藤井、豊田、八郷、鹿田
1998.3.20 H11274883 圧電体複合基板および表面弾性波素子
49)中幡、桧垣、八郷、鹿田
1998.8.7 2000-054111 パターニング用マスク及びその製造方法
50)関、石橋、藤井、鹿田
1999.11.10 2001-138232 ダイヤモンド膜の研磨砥石とその研磨方法
51)関、石橋、藤井、鹿田
1999.11.11 2001-138184 ダイヤモンド膜の研磨砥石とその研磨方法
52)関、石橋、藤井、鹿田
1999.11.11 2001-138243 ダイヤモンド膜の研磨砥石とその研磨方法

53)藤井、上村、石橋、関、中幡、鹿田
　　1999.9.7　　2000-203822　硬質炭素膜および表面弾性波素子用基板
54)中幡、成田、八郷、鹿田
　　2000.2.9　　2000-307379　表面弾性波素子
55)中幡、八郷、辰巳、今井、鹿田
　　2000.8.9　　2002-057549　表面弾性波素子用基板及び表面弾性波素子
56)八郷、板倉、中幡、藤井、鹿田
　　2000.8.25　2001-185989　表面弾性波素子
57)板倉、八郷、中幡、藤井、鹿田
　　2001.3.21　2001-339269　表面弾性波素子
58)板倉、八郷、中幡、藤井、鹿田
　　2001.3.21　2001-339270　表面弾性波素子

謝辞

本研究は、大阪大学大学院電気工学専攻　杉野隆教授の懇切御丁寧な論文御指導の元になされたものであり、深謝申し上げます。

また大阪大学大学院電気工学専攻　佐々木孝友教授、伊藤利道教授、そして大阪大学超伝導フォトニクス研究センター斗内政吉教授に論文の御審査を頂き、御指導頂いたものであり、深謝申し上げます。

住友電気工業（株）にて、本研究のきっかけを頂き､その後も製品化まで御指導・激励頂きました上司の藤森直治博士（現産業技術総合研究所）に深謝申し上げます。

住友電気工業（株）にて、基礎研究から実用化まで１０年間、日夜共に切磋琢磨しながら研究を行ってきた中幡英章氏と藤井知氏に深謝致します。また基礎研究から実用化までの様々な段階で、一緒に研究開発及び製品化を担当頂いた桧垣賢次郎氏、田辺敬一郎氏、関裕一郎氏、八郷昭広博士、北林弘之博士、上村智喜氏、板倉克裕氏、石橋恵二氏に感謝致します。

住友電気工業（株）にて、ダイヤモンド合成、ＣＡＥなどで一緒に開発頂いた高橋俊也氏、吉田健太郎氏、今井貴浩氏、富川唯司氏、西林良樹博士、塩見弘博士、成田雅士氏に感謝致します。高周波デバイスニーズの探索、実用化にご協力頂いた武田氏、長井氏、高橋氏、村田氏、森氏に感謝致します。基礎研究から製品化段階で一緒に開発頂いた豊田博士、西出氏、田辺氏、野本氏、宮地氏、中野氏､田中(秀)氏、岡野氏、田中（良）氏、池田氏、佐伯氏に感謝致します。

ダイヤモンド合成の基本特許を使用させて頂き、また研究遂行を激励頂いた科学技術庁無機材料研究所の加茂主任研究官（当時、現物材機構理事）に感謝致します。

ＮＥＣ（株）にて一部共同研究をして頂いた山本課長（当時）、坂入主事（当時）に感謝致します。

大阪大学工学部にてラマン分光測定に御協力頂き、御教示頂いた中島信一教授(当時）、播磨助教授（当時）に深謝申し上げます。

セイコーエプソン（株）にて、発振器のデータを頂いた高田氏、伊藤氏、岩本氏、加納氏に深謝申し上げます。

住友電気工業（株）にて、本テーマ遂行に当たりご指導・激励頂いた、中原恒雄副社長（当時）、古川伸雄専務取締役（当時）、油本暢勇専務取締役（当時）、吉田健一常務取締役（当時）、矢津修二取締役（当時）、三宅雅也所長（当時）、野村俊夫所長（当時）、鴻野事業部長（当時）に深謝申し上げます。