



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ウエハの合成と研磨	45
(1) 合成及び研磨方法の検討	
(2) ダイヤモンドウエハの伝搬損失低減	
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) 楕形電極形成	
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、まさに様変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ットデバイス、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、LiTaO₃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。最近では光ファイバを有効に用いる技術が進展し、1.55 μ m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。

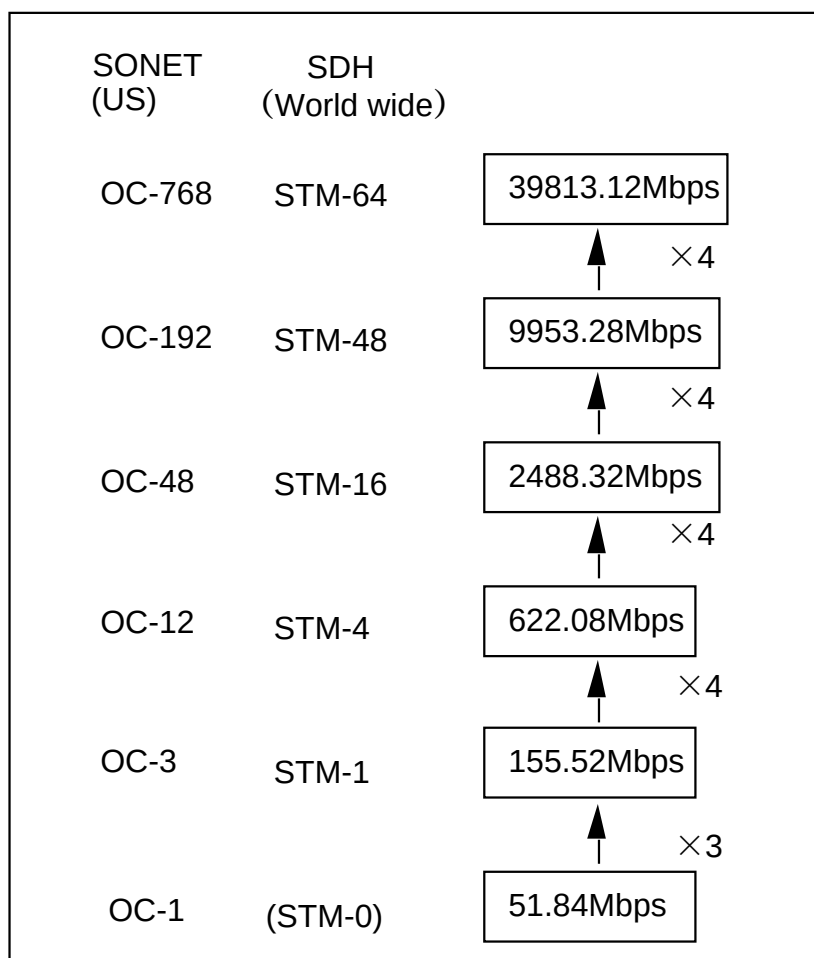


図1-1. 光通信の世界規格（SDH）及び米規格（SONET）のハイアラキ

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（VCSSO）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 Communication) 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。

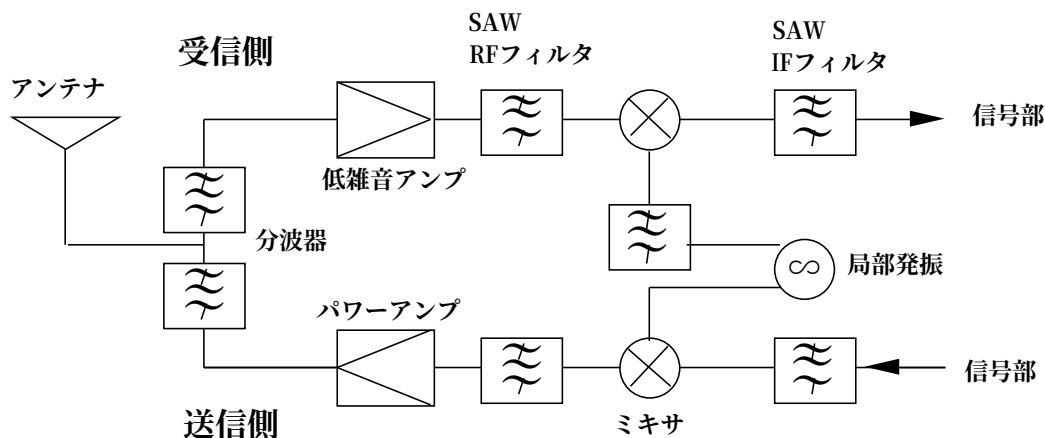


図1-2 通信機器におけるSAWデバイスの使用例

（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の水晶発振器から逡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、逡倍そのものによる位相雑音の増加、電力やサイズの増大、また逡倍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、逡倍後の高周波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

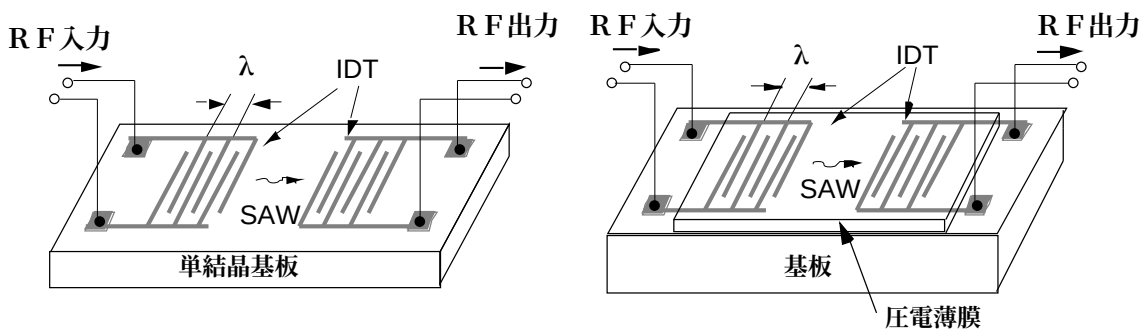
次に本研究の対象とするSAWデバイスについて概観する。固体表面を伝搬する音波を総称して弾性表面波といい、それを利用したデバイスをSAWデバイスという。誘電体デバイス、セラミックフィルタなどと同様に通信の基本デバイスとして多用されている。TV用のフィルタを始めとして、通信機器の発振器、送受信モジュールに用いるRFフィルタ、IFフィルタ、レーダー遅延線などの用途に用いられている[3,4,5]。弾性表面波の中では、地震波で古くから研究されているレイリー(Rayleigh)波が最もよく利用されている。その波の変位の例を図1-3に示すが、表面から1波長以内の深さにほぼ90%のエネルギーが集中しており、表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。

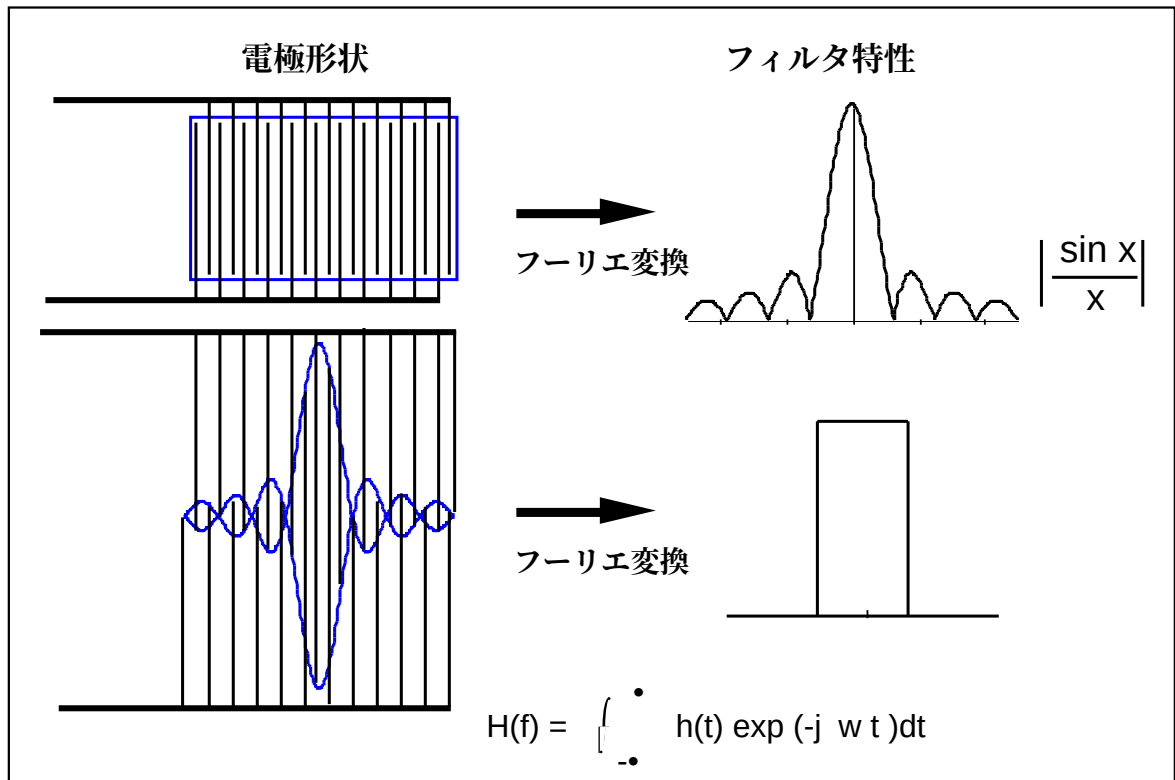
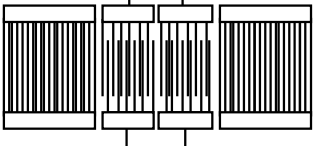
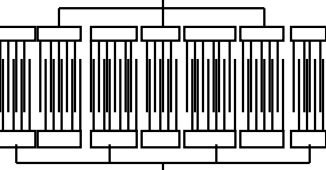
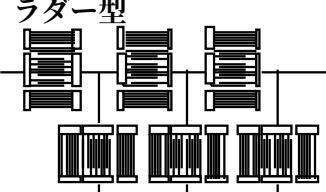
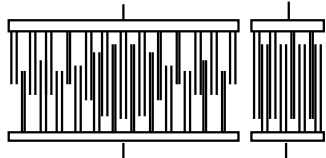
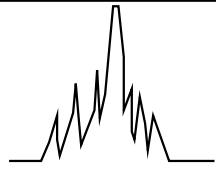
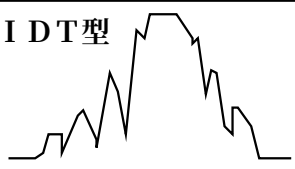
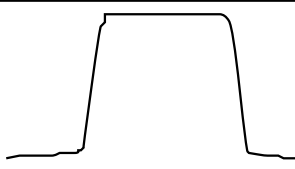


図 1-5. SAWデバイスの数学的表現

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ー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 	I I D T 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		I I D T 型  ラダー型 	
主な用途例	光通信共振器	携帯電話 R F	I F フィルタ 交通、無線 L A N、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、フィ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、O A 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 ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) 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 $70\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 程度と大きい。これは -40 から 85°C 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。

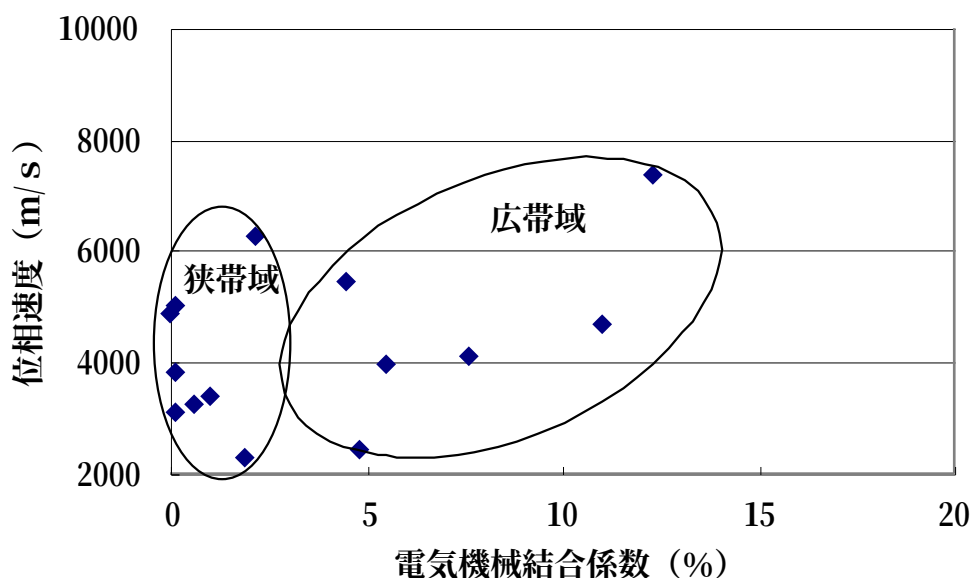
b) 積層材料

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。

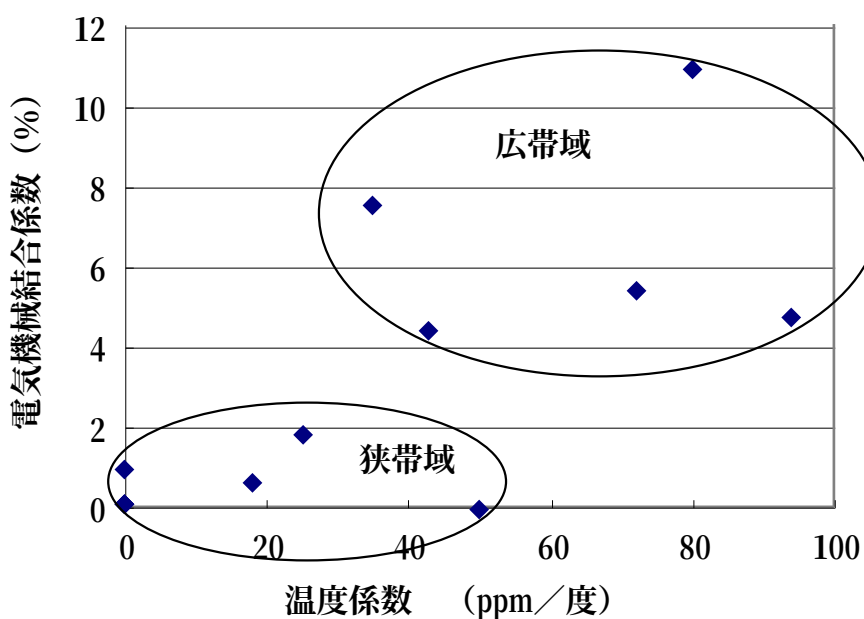
ZnO ／ガラスがTV用IFフィルタとして実用化されている他、 ZnO ／サファイア [8] が移動体通信用RFフィルタなどで2GHz帯で使用されている。サファイアR面では、

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S AW材料系位相速度と電気機械結合係数



(b) 従来S AW材料系の電気機械結合係数と温度係数

図1-6. 従来S AW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 ₂ B ₄ O 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 と楕型電極周期 λ を用いて、

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

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LiTaO₃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械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]

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

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、LiTaO₃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、LiTaO₃、LiNbO₃の圧電薄膜と温度補償用のSiO₂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SiO₂/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SiO₂/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、LiTaO₃、LiNbO₃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LiTaO₃、LiNbO₃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、LiTaO₃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、楕形電極、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。

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

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。

$$u_i = A_i \exp(jk b x_3) \exp[jk(vt - x_1)] \quad (2-2)$$

$$\phi = A_4 \exp(jk b x_3) \exp[jk(vt - x_1)] \quad (2-3)$$

層構造の場合、例えば、ZnO／ダイヤモンド構造を例にとると、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。

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

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

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

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

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) LiTaO₃／ダイヤモンド
- (d) LiNbO₃／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、 $kh_{\text{圧電薄膜}}$ ($k=2\pi/\text{波長}$ 、 $h_{\text{圧電薄膜}}$ =圧電薄膜層の厚み)を導入した。実際の計算は概ね $kh_{\text{圧電薄膜}}=0\sim 4$ 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。

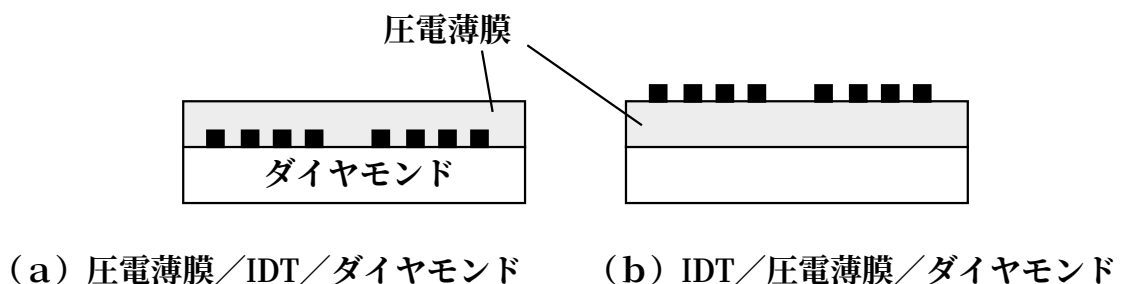


図2-1 計算に用いた電極配置図

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SiO₂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LiNbO₃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) SiO₂/ZnO/ダイヤモンド

B) SiO₂/LiNbO₃/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がわかる。上記で魅力的材料系とわかったLiNbO₃に関して、単結晶LiNbO₃/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。これについても順次述べる。

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 kh_{ZnO} 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 kh_{ZnO} が小さくなるほど大きくなるが、これは kh_{ZnO} 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 kh_{ZnO} 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。

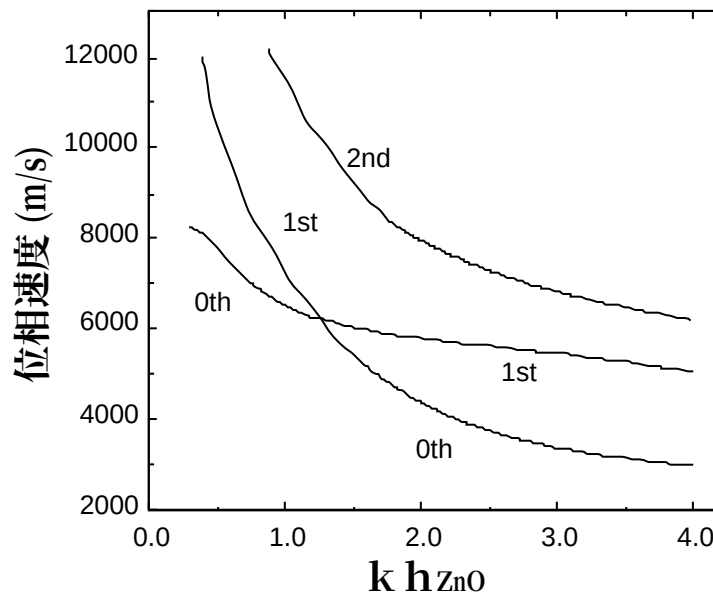
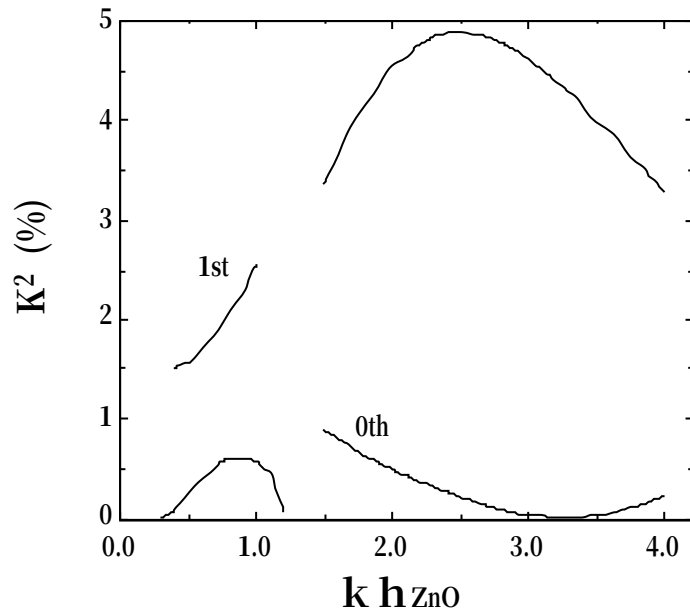


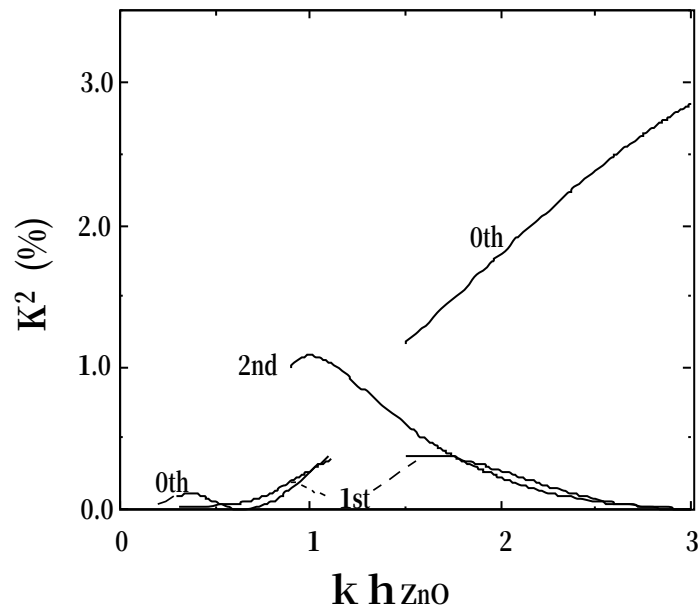
図2-2. ZnO／ダイヤモンドの位相速度の規格化ZnO膜厚依存性

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通りの電極配置における電気機械結合係数の kh_{ZnO} 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 $kh_{\text{ZnO}}=2.5$ 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 $kh_{\text{ZnO}}=0.5$ 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/ダイヤモンド



(b) IDT/ZnO/ダイヤモンド



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、 kh_{ZnO} 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

khZnO=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場所は表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	khZnO	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. SiO₂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SiO₂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SiO₂を積層して温度補償できるかの目安をkhZnOを変えて計算した例を図2-4に示す。SiO₂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SiO₂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。SiO₂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、khZnO=0.8と設定した。その時の1次温度係数のSiO₂依存性を図2-5に示す。

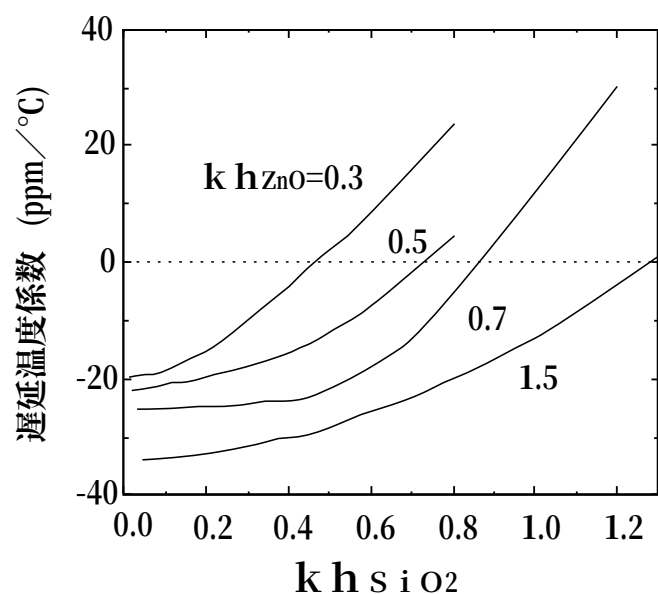


図 2-4. SiO₂積層によるZnO／ダイヤモンド系SAWの温度補償
(kh_{ZnO} が0.3、0.5、0.7、1.5の場合)

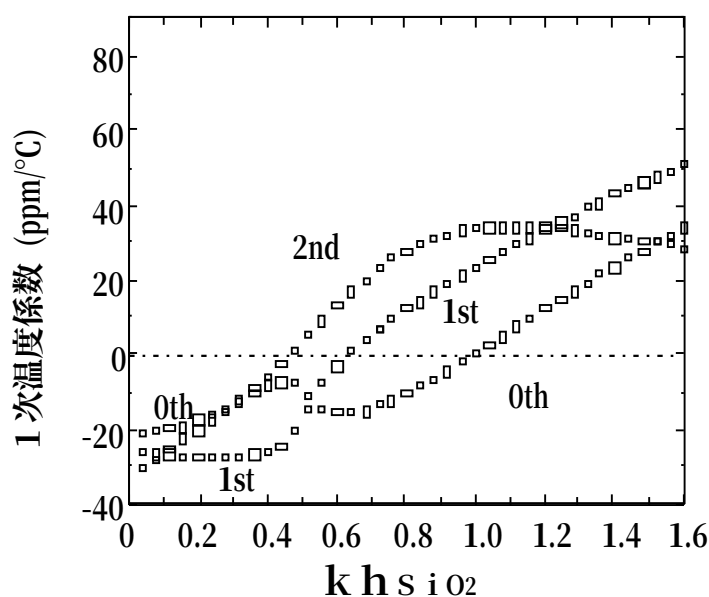
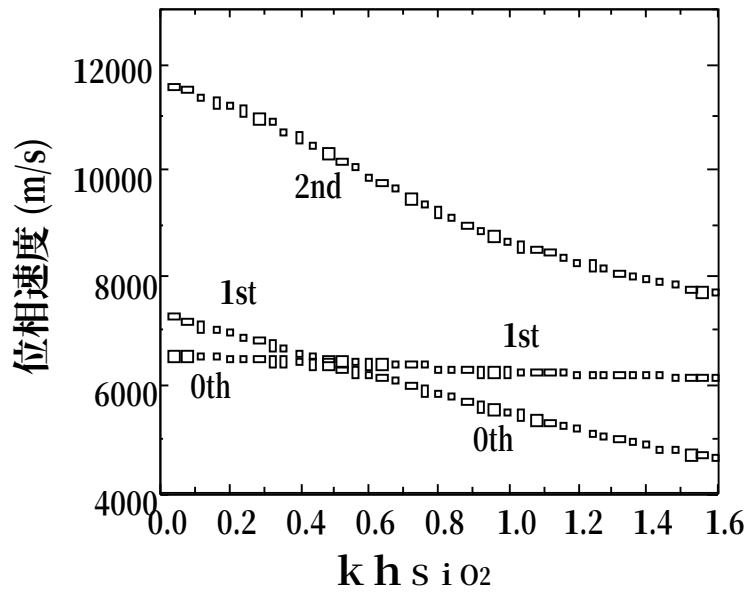


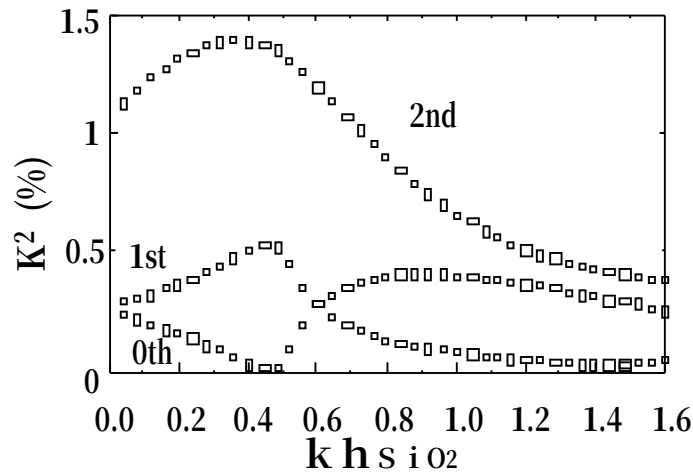
図 2-5. SiO₂／ZnO／ダイヤモンド系の温度係数
($kh_{ZnO}=0.8$)

また、位相速度、電気機械結合係数のSiO₂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 SiO₂／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. SiO₂/ZnO/ダイヤモンド系の位相速度と電気機械結合係数
(khZnO=0.8)

以上により、SiO₂/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SiO₂/ZnO/ダイヤモンド構造 SAWの波と特性

構造	モード	khZnO	khSiO ₂	位相速度 m/s	K ² %	温度係数 ppm/°C
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SiO₂/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、LiTaO₃、LiNbO₃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、LiTaO₃、LiNbO₃は点群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と同じ点群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LiNbO₃/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、SiO₂積層による温度補償を行ったSiO₂/LiNbO₃/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LiNbO₃/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。

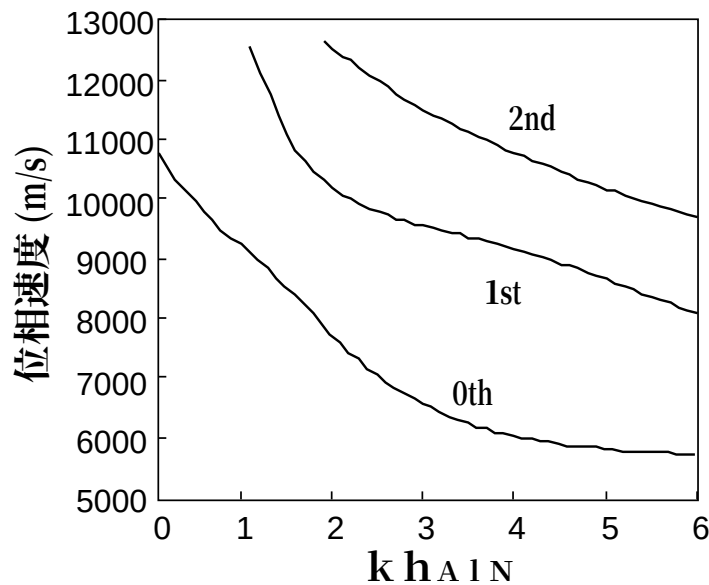
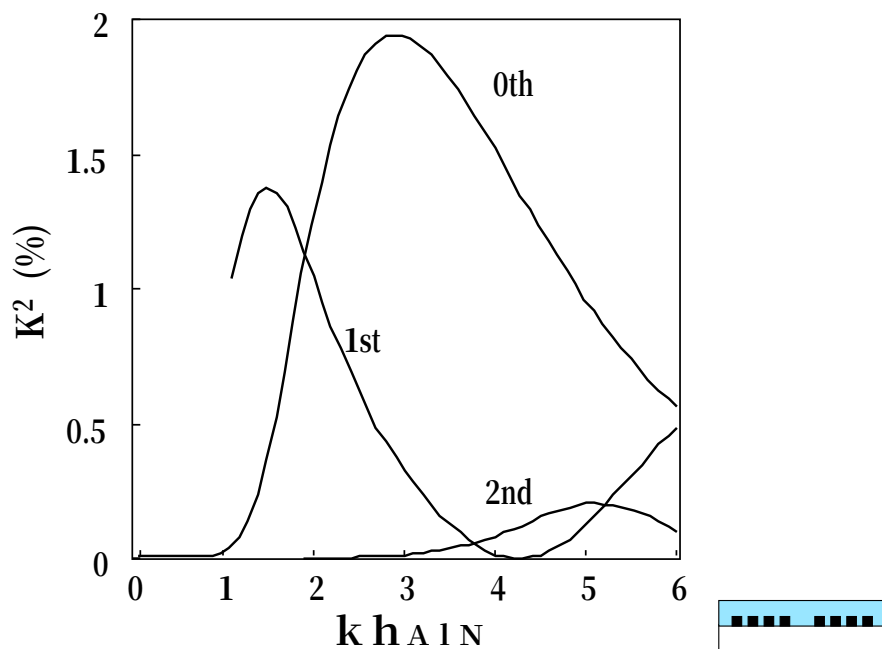
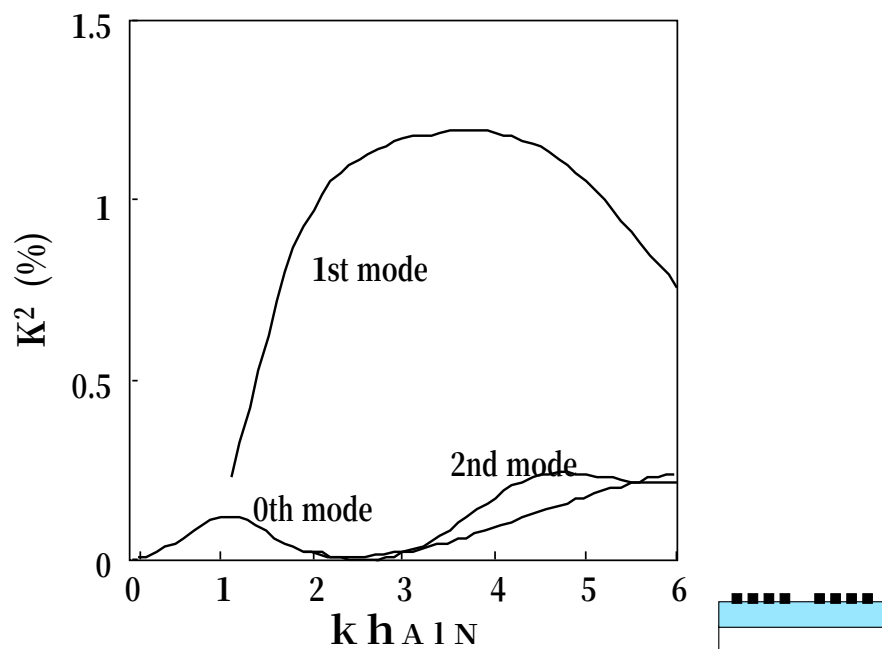


図2-7. AlN/ダイヤモンド系の位相速度のAlN規格化膜厚依存性

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 kh_{AlN} 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) LiNbO₃/ダイヤモンド

次に K^2 の大きな材料として知られるLiNbO₃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。

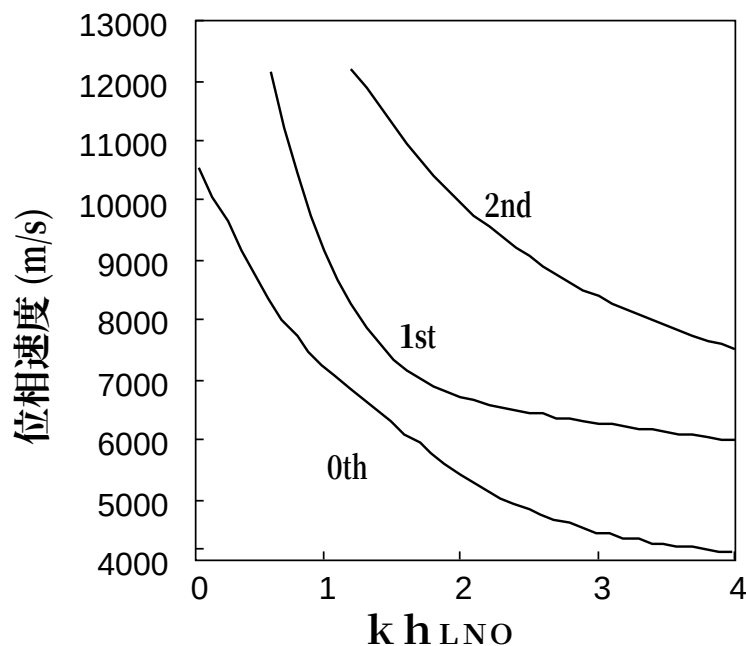
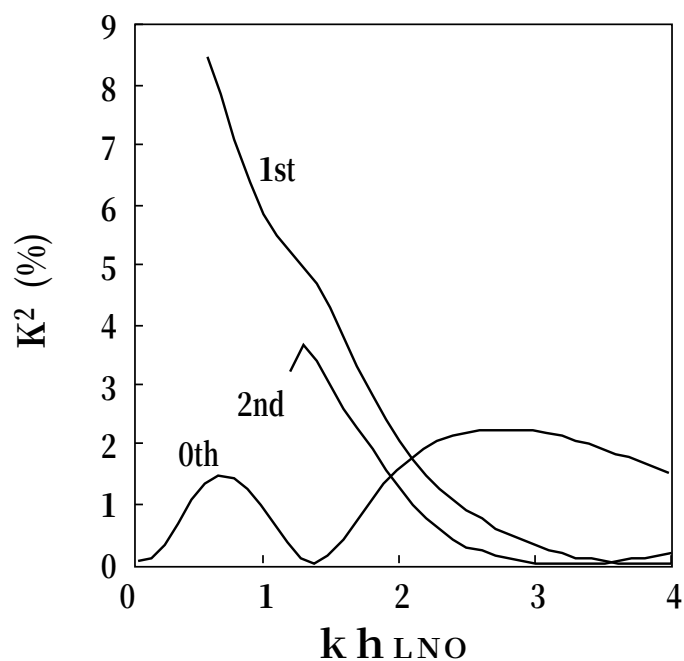
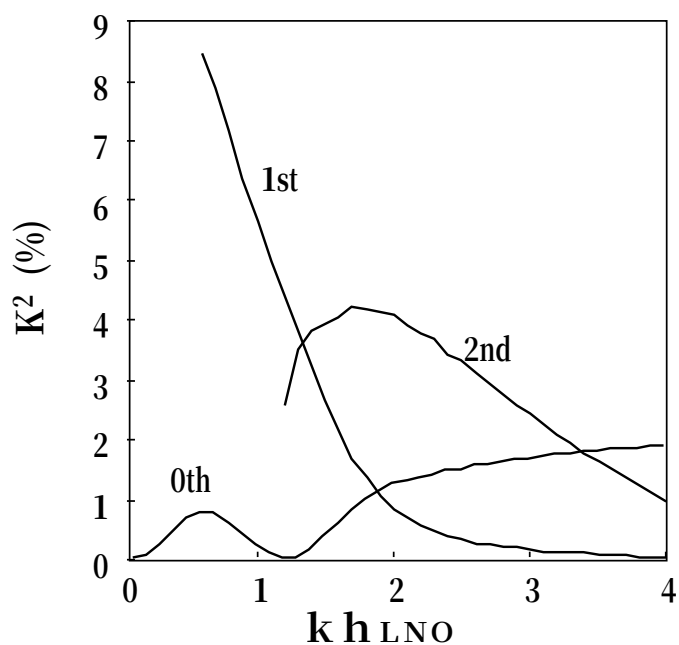


図2-9. LiNbO₃/ダイヤモンド系の位相速度のLiNbO₃規格化膜厚依存性

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LiNbO₃/IDT/ダイヤモンド、(b)にはIDT/LiNbO₃/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) LiNbO₃/IDT/ダイヤ



(b) IDT/LiNbO₃/ダイヤ

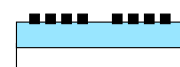


図2-10. LiNbO₃/ダイヤモンド系の2つの構造の電気機械結合係数のLiNbO₃規格化膜厚依存性

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LiNbO₃/ダイヤモンド系SAWの波を記載する。LiNbO₃/IDT/ダイヤモンドもIDT/LiNbO₃/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LiNbO₃/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) LiTaO₃/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。

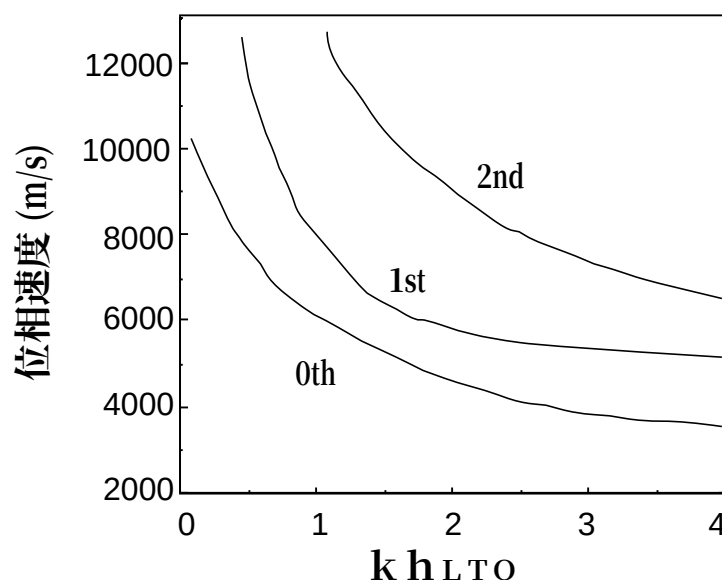


図2-11. LiTaO₃/ダイヤモンド系の位相速度のLiTaO₃規格化膜厚依存性

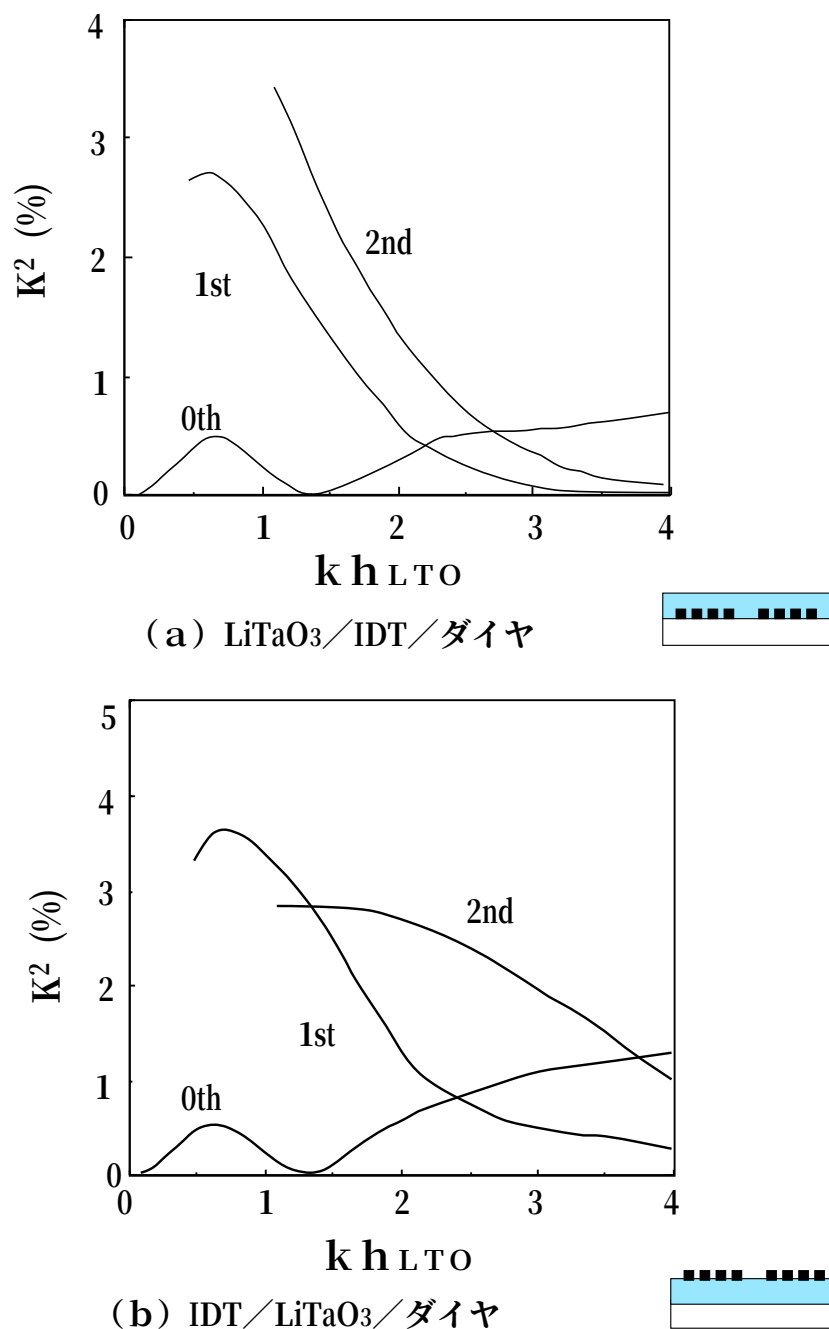


図 2-1 2. LiTaO₃/ダイヤモンド系の 2 つの構造の電気機械結合係数の LiTaO₃規格化膜厚依存性

次に、図 2-1 2 (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 kh_{LTO} 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LiNbO₃/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LiTaO₃/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) SiO₂/LiNbO₃/ダイヤモンド

以上(1)から(3)で検討したように、この中でLiNbO₃/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、SiO₂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SiO₂/LiNbO₃/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LiNbO₃のkh_{LNO}を0.4、0.6、0.8、1.0について実施し、SiO₂層のkh_{SiO₂}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。

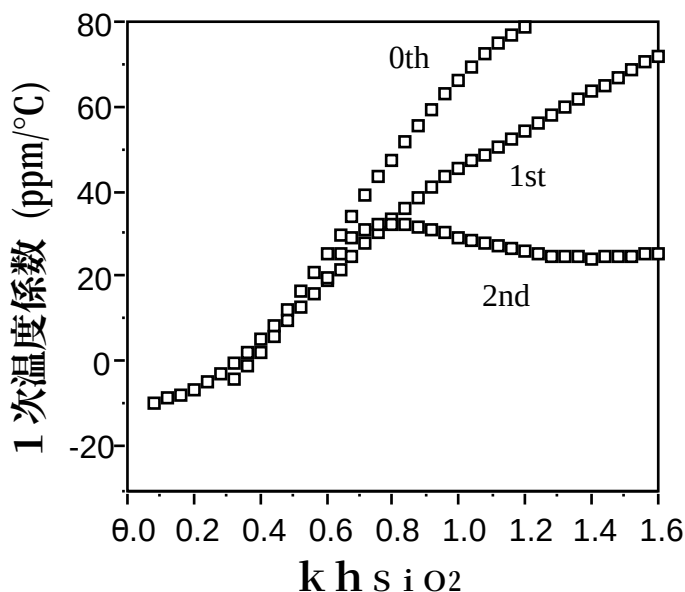
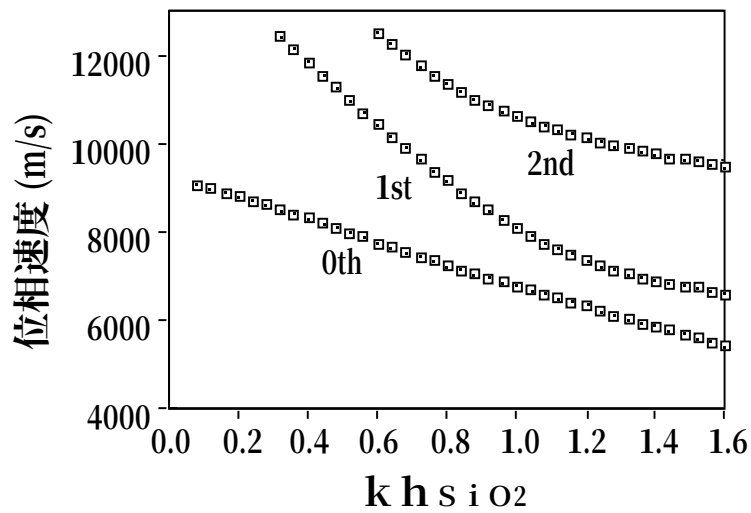
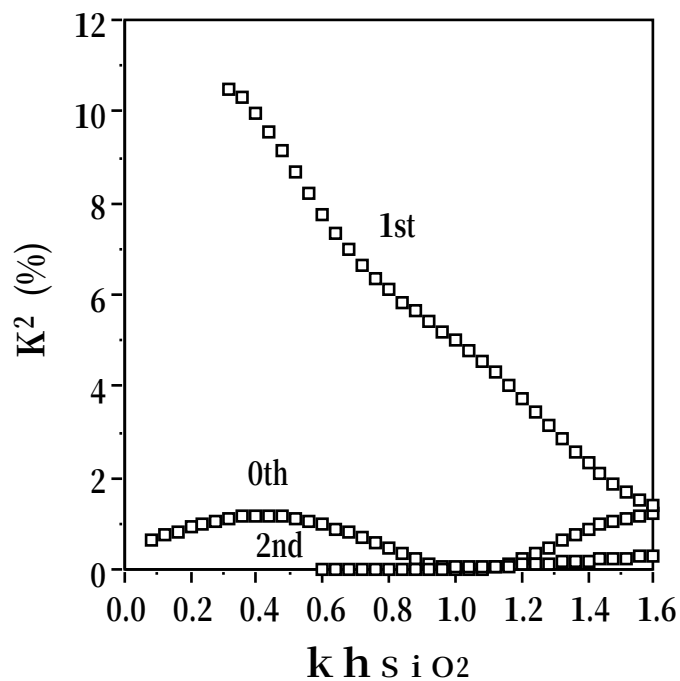


図2-13. SiO₂/LiNbO₃/ダイヤモンドの温度係数のSiO₂膜厚依存性 (kh_{LNO}=0.4)



(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 ($kh_{LiNO}=0.4$ 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 $-10\sim 10\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 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SiO₂/LiNbO₃/ダイヤモンド構造のSAWの波と特性

構造	モード	khLNO	khSiO ₂	位相速度 m/s	K ² %	温度係数 ppm/°C
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ィの特性が可能であることが判明した。

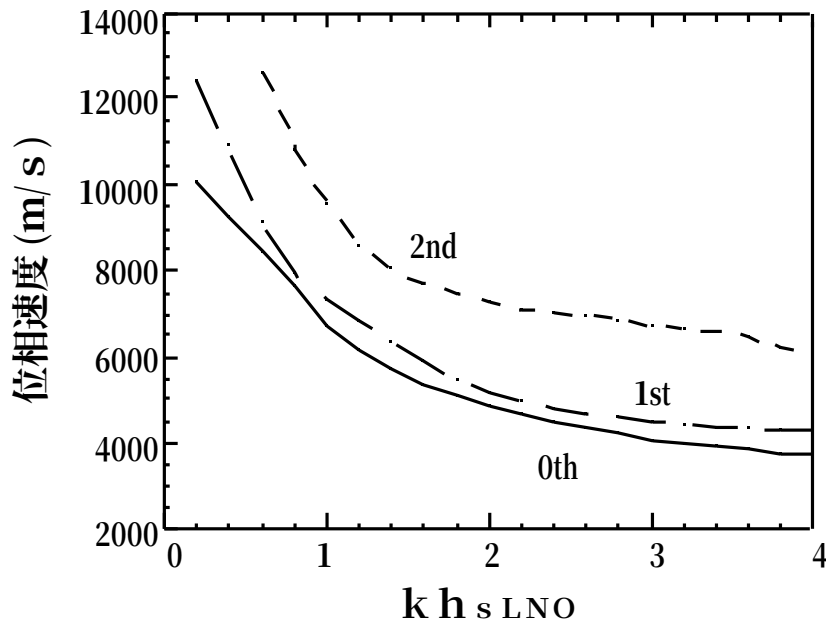
表 2-7. 零温度係数を有するSiO₂/LiNbO₃/ダイヤモンド構造のSAWの波と特性

構造	モード	khLNO	khSiO ₂	位相速度 m/s	K ² %	温度係数 ppm/°C
SiO ₂ /IDT/ LiNbO ₃ /ダイヤ	1次	0.4	0.37	12,100	10.1	0

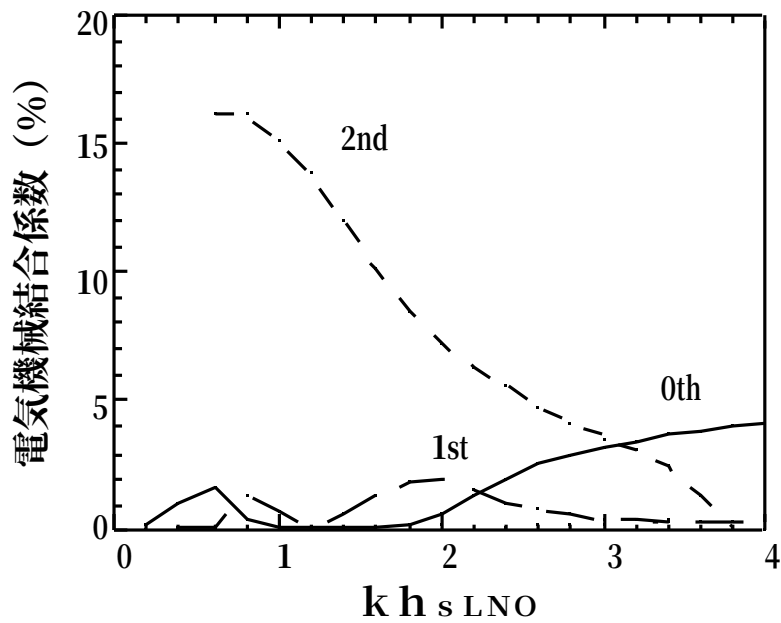
(5) 単結晶LiNbO₃/ダイヤモンド

これまで見たように、c 軸配向のLiNbO₃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。LiNbO₃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る、実現は難しいと思われるが、最近の張り合わせ技術のSAWにおける例を見てみると、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。ここではグラウンド（GRと略記）電極の入った構造も考え、IDT/単結晶LiNbO₃/ダイヤモンド構造とIDT/単結晶LiNbO₃/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LiNbO₃の規格化膜厚kh_SLNO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LiNbO₃/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。



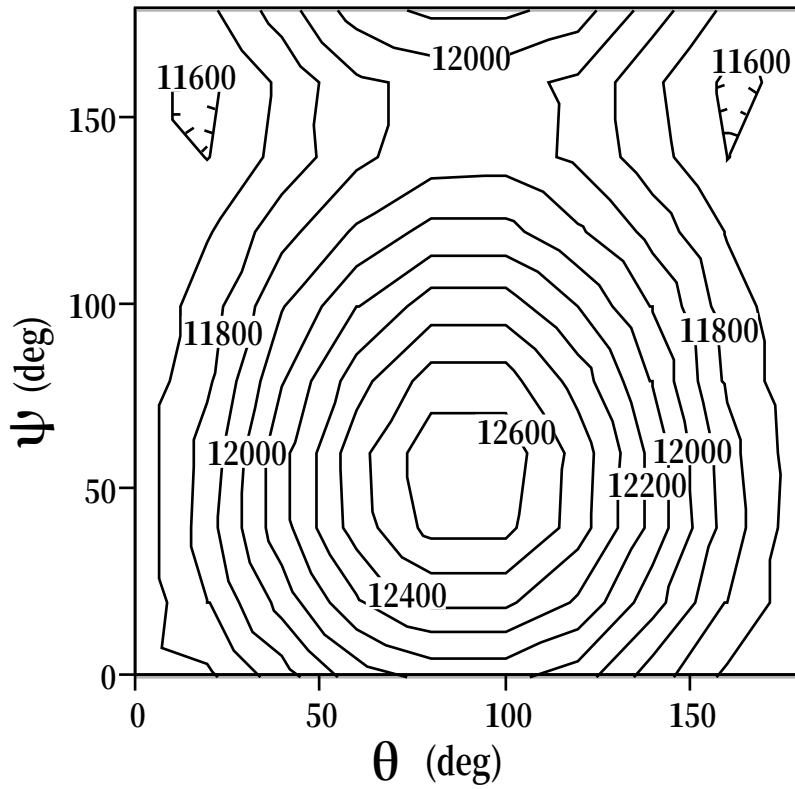
(a) 位相速度



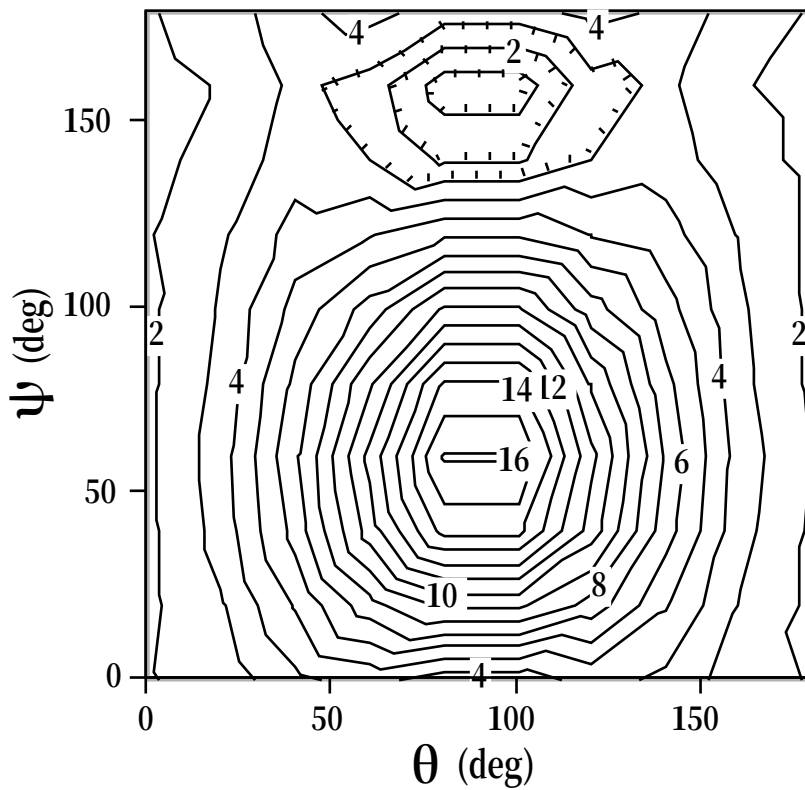
(b) 電気機械結合係数

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
($\phi=30^\circ$, $\theta=80^\circ$, $\psi=60^\circ$)

図 2-16 には、 $k h_{sLNO}=0.6$ で、 $\phi=30$ 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LiNbO₃/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 ($k_{\text{hSLNO}}=0.6$, $\phi=30^\circ$)

位相速度は $\theta=90^\circ$ 、 $\psi=50^\circ$ 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、 $\theta=90^\circ$ 、 $\psi=55^\circ$ 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 $\theta=85^\circ$ 付近、 $\psi=30^\circ \sim 60^\circ$ 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。LiNbO₃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。

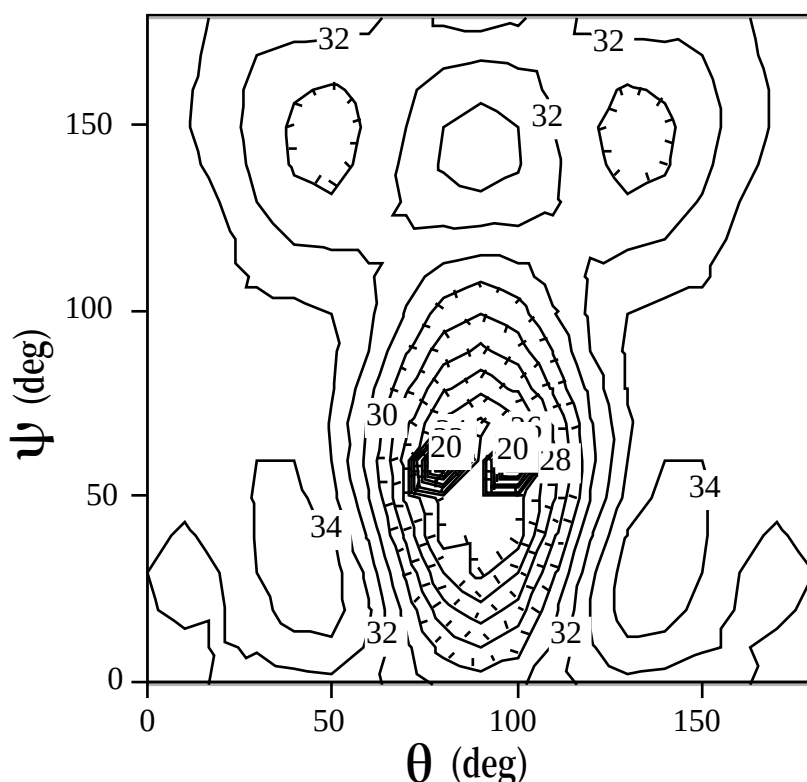


図2-17.IDT/単結晶LiNbO₃/GR/ダイヤモンド構造の
温度係数 (°C/deg) の θ - ψ のマップ ($k_{\text{hSLNO}}=0.6$ 、 $\phi=30^\circ$)

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LiNbO₃とダイヤモンドの間に挿入する形になる。

表 2-8. 単結晶LiNbO₃/ダイヤモンド構造のSAWの波と特性

構造	モード	$k h_{\text{LNO}}$	オイラー角	位相速度 m/s	$K^2\%$	温度係数 ppm/°C
IDT/単結晶LiNbO ₃ /GR/ダイヤ	2次	0.6	$\theta=90^\circ$ $\psi=60^\circ$ $\phi=30^\circ$ 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 ₂ B ₄ O 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、LiNbO₃、LiTaO₃など圧電材料と温度補償膜であるSiO₂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。

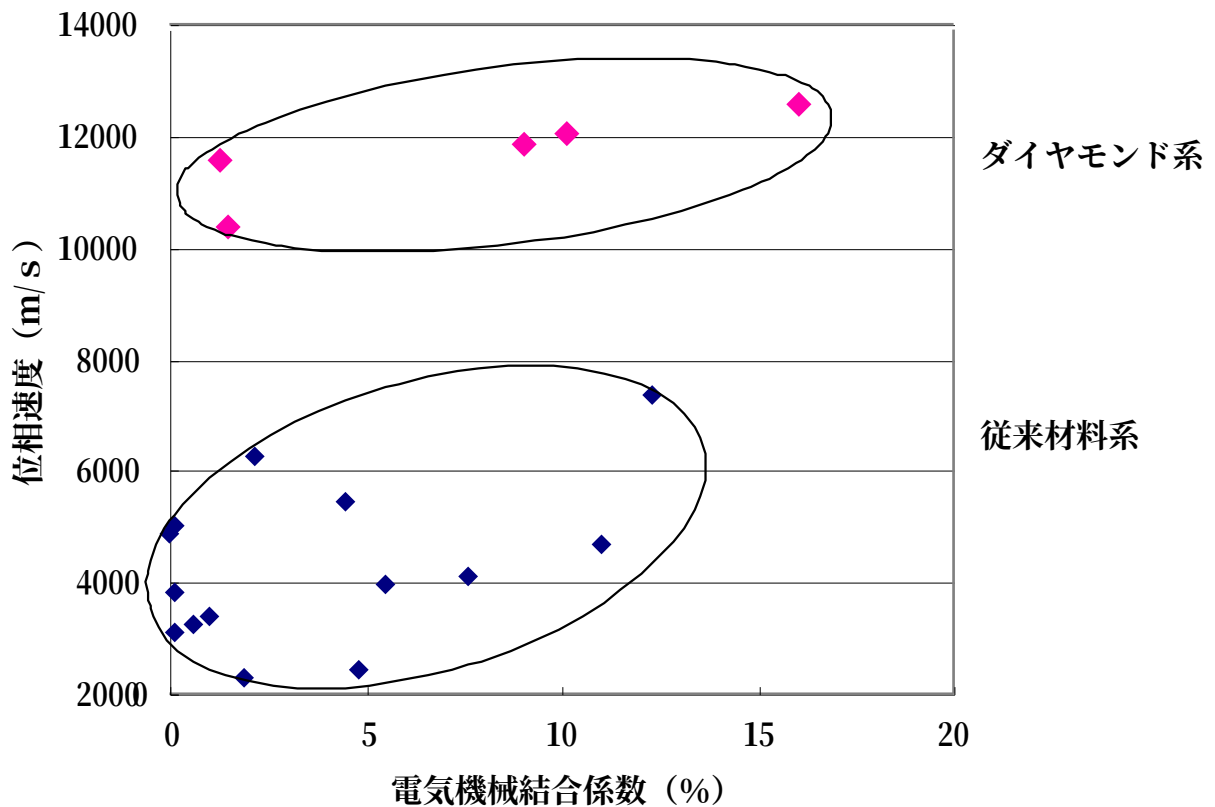


図2-18.ダイヤモンドSAW材料系と従来材料の比較図
位相速度と電気機械結合係数

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。

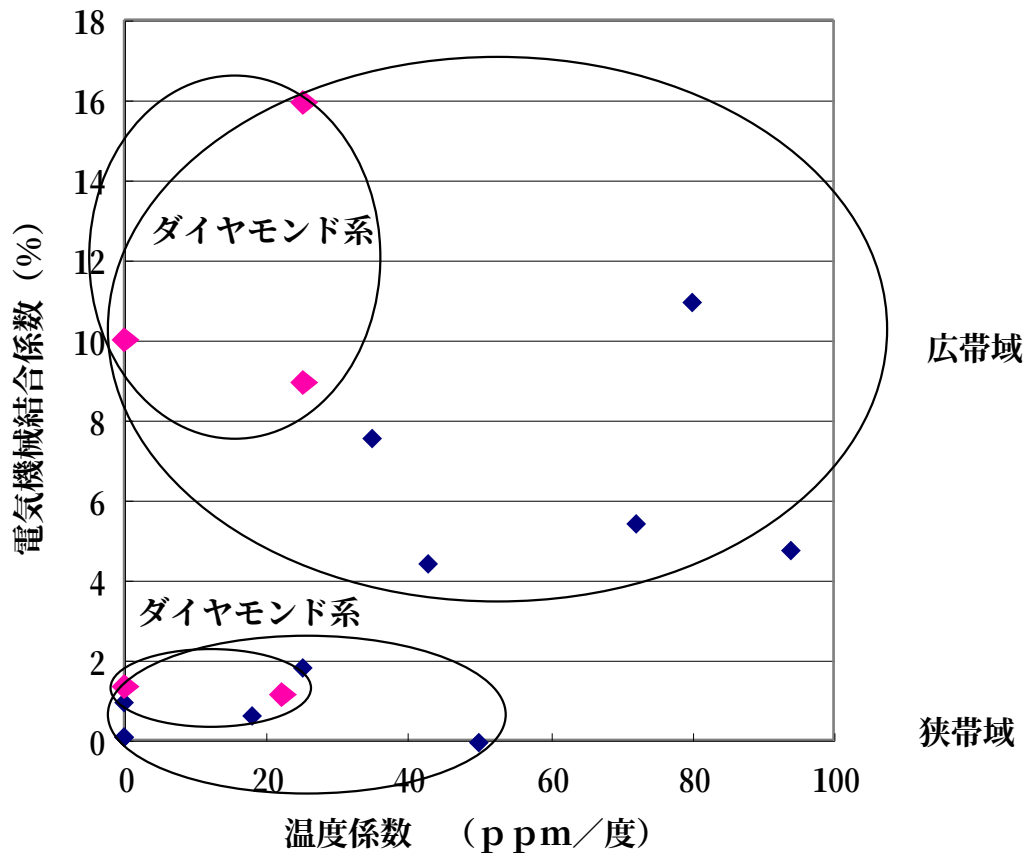


図 2-19.ダイヤモンド SAW 材料系と従来材料の比較図
電気機械結合係数と温度係数

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

SiO₂/IDT/ZnO/ダイヤモンド

波 セザワ波 2次モード

khZnO=0.8

khSiO₂=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

SiO₂/IDT/LiNbO₃/ダイヤモンド

波 セザワ波 1次モード

khLiNO=0.4

khSiO₂=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LiNbO₃/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LiNbO₃/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

khSLNO=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った影響を受けるかを、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 $H_1(f)$ と出力関数 $H_2(f)$ を用いて、次式で表される。

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

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

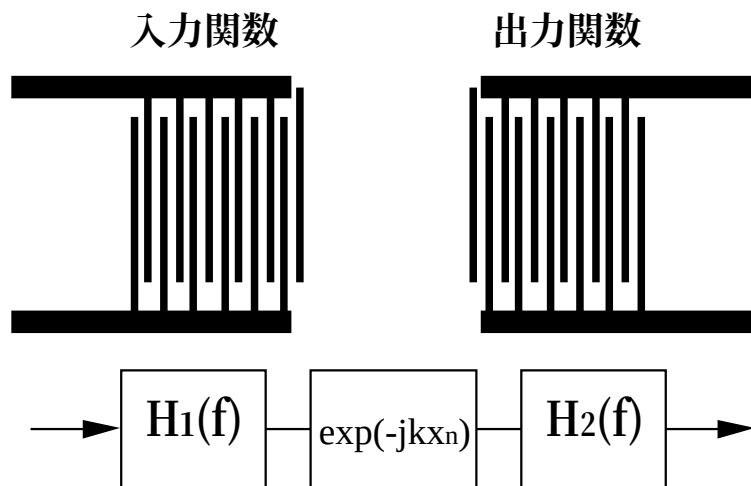


図2-20.SAWデバイスの伝達関数モデル

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、

$$H(f) = \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} (-1)^n A_n \exp(-jkx_n) \quad (2-9)$$

と表わせる。 A_n 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、

$x_n = n\lambda/2$ を入れて下記のようになる。

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

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、

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

を入れて変形すると、

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

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。

$$V_g = d\omega/dk = dkV_p / dk = V_p + dV_p / dk = V_p + kh \, dV_p / dhk \quad (2-13)$$

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 $k = 2p / l$ 、 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。

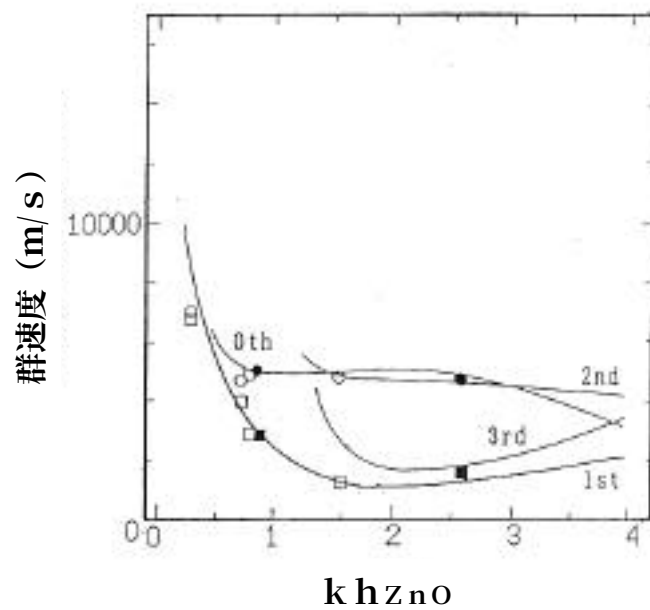


図 2 - 2 1 速度分散性が群速度に与える影響

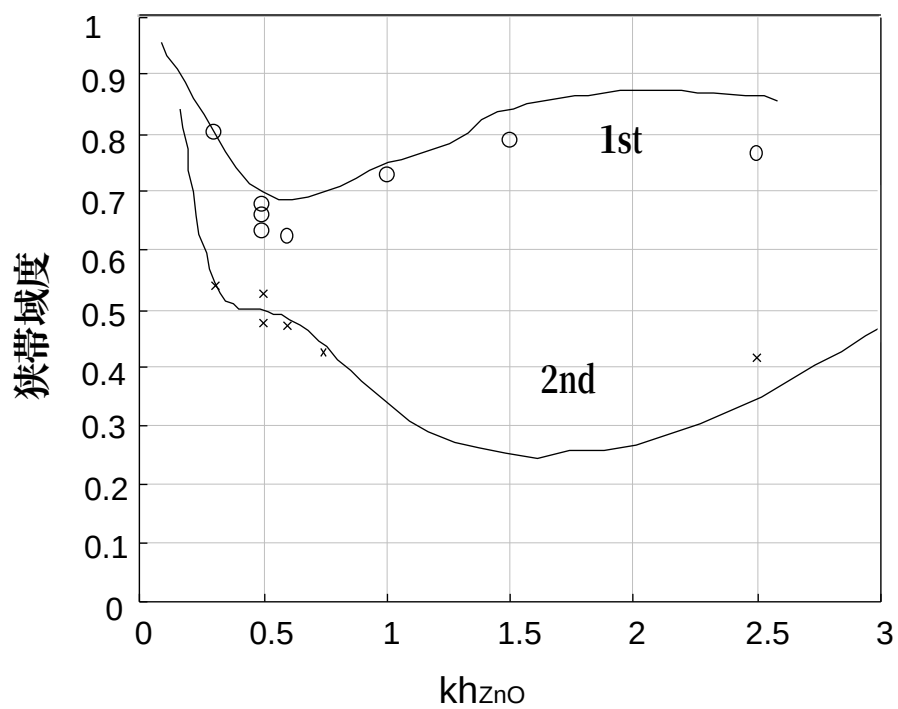


図 2 - 2 2. ZnO／ダイヤモンド系の速度分散性に起因する狭帯域度
(実線は計算値、○△×は計測値)

2-8. まとめ

以上、本章では第2章で述べた理論に基づき、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、LiTaO₃、LiNbO₃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

SiO₂／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

SiO₂／IDT／LiNbO₃／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LiNbO₃／ダイヤモンド

セザワ波 2次モード

オイラー角 $\theta=90$ 、 $\psi=60$ 、 $\phi=30$ 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、SiO₂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SiO₂/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 ($\times 10^{11} \text{N/m}^2$)

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

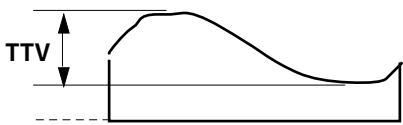
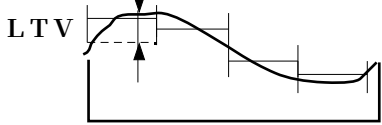
という3点の理由と多結晶膜でも良質の膜が得られることがわかってしたこと [1,2] から、多結晶膜ダイヤモンドによる合成のみを検討した。一方、ダイヤモンドの気相合成法は、マイクロ波CVD法 [3,4,5]、フィラメントCVDに代表される熱CVD法 [6,7]、DCプラズマ及びDCプラズマジェット法 [8,9,10]、RFプラズマ法 [11,12] など多岐に渡る。原料もガスからアルコールなどの有機材料まで使用されていて、C-H-O元素のダイアグラム上で統一的な解釈がなされ、ダイヤモンドの生成可能な領域がわかっており、成長速度の比較がなされている [13,14]。これらの手法の中で高速成膜に関してはDC及びRFプラズマ法が最も高く数10～100 $\mu\text{m}/\text{h}$ 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 $\mu\text{m}/\text{h}$ 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 $\langle 111 \rangle$ 、 $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 110 \rangle$ 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4 μm となり、4波長では約16 μm 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	300 μm ～ 1000 μm
ウェハそり	$\text{TTV} < 25 \mu\text{m}$  $\text{LTV} < 2 \mu\text{m}$ 
ダイヤ厚さ	周波数に依存(概ね20 μm 以上)
欠陥密度	$< 10\text{cm}^{-2}$
表面粗さ	$< 5\text{nm}$
抵抗	$> 10^6 \Omega\text{cm}$

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プ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プ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。

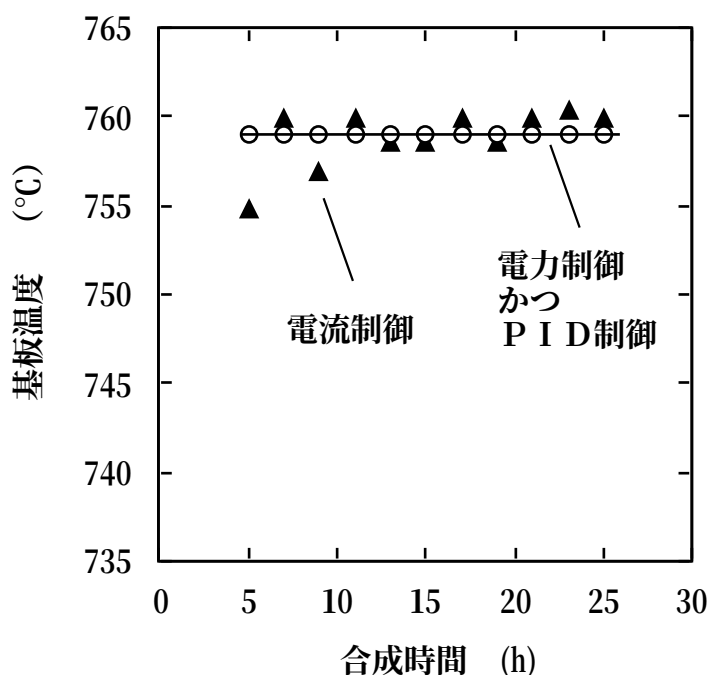


図3-1. P I D制御による基板温度の経時安定化

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

$$\Delta P = Q_i / C_i \quad (i=1 \sim n) \quad (3-1)$$

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°C の温度差のあったものが 8°C 内に収まる事を確認した。

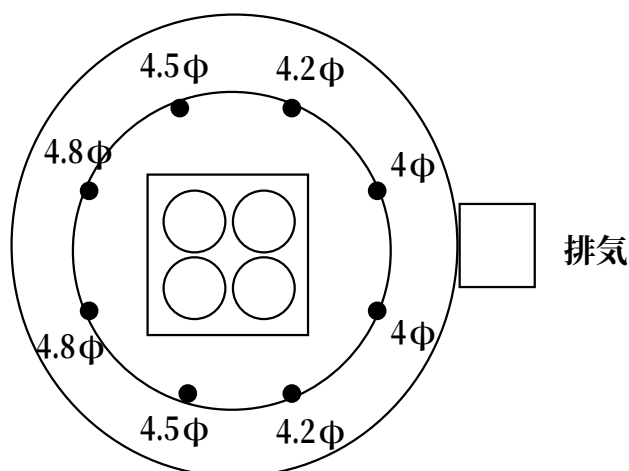


図3-2. C V D装置内の排気系配管コンダクタンス調整

以上の2つにより、ウェハのそり量TTVを半分以下の $20\mu\text{m}\pm 10\mu\text{m}$ 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、 $1\mu\text{m}$ から $0.5\mu\text{m}$ 幅で、厚みが $30\sim 50\text{nm}$ 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 $50\text{個}/\text{cm}^2$ 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、ダストバックグラウンドを含んで $6\text{個}/\text{cm}^2$ のデバイス加工可能レベルの良好な結果を得た。

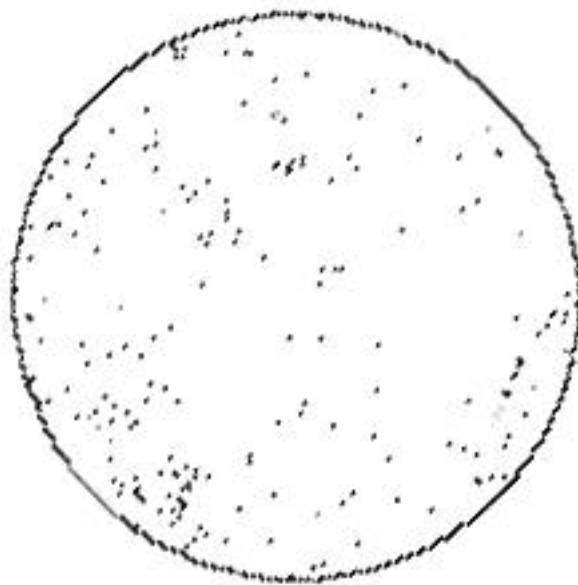


図3-3. 研磨後のウェハ欠陥

欠陥数 6 cm^{-1} (500nm レベルの欠陥 ダスト ($< 1\text{ cm}^{-1}$)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 $800\mu\text{m}$ 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。

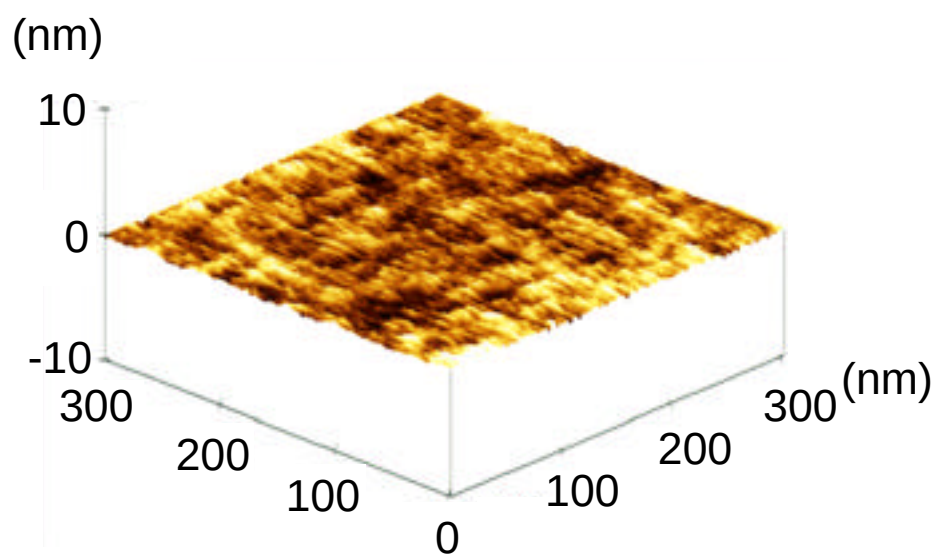


図3-4. ダイヤモンドウェハ表面のAFM像

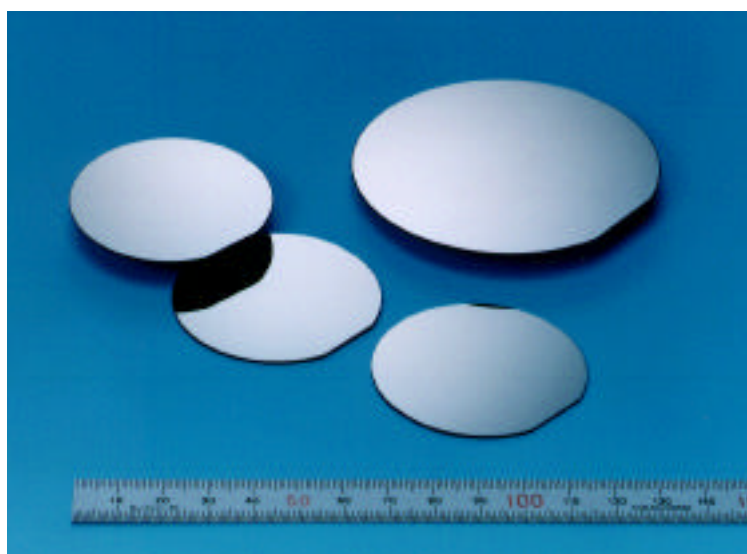


図3-5. 2及び3インチφのダイヤモンドウェハの外観写真

(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（ $\sim 1\mu\text{m}$ ） ・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楕形電極の間隔を 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、どちらかというとも(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。

Intensity (Arb.U)

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} のダイヤモンドピークと、 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。

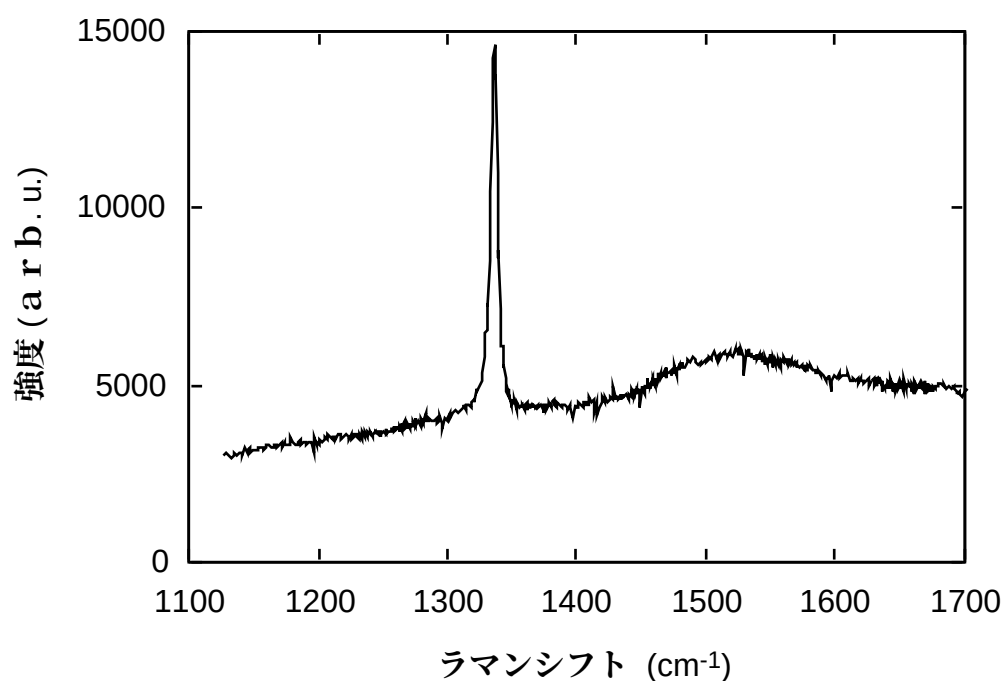


図3-7. ダイヤモンドウェハのラマン分光の例

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]。

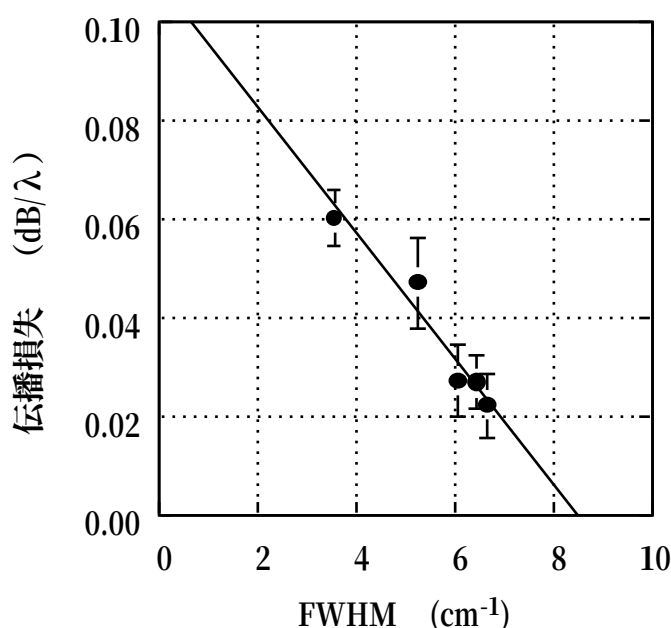


図3-8. ラマン分光のダイヤモンドピークのFWHMと伝搬損失の関連

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らであり、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

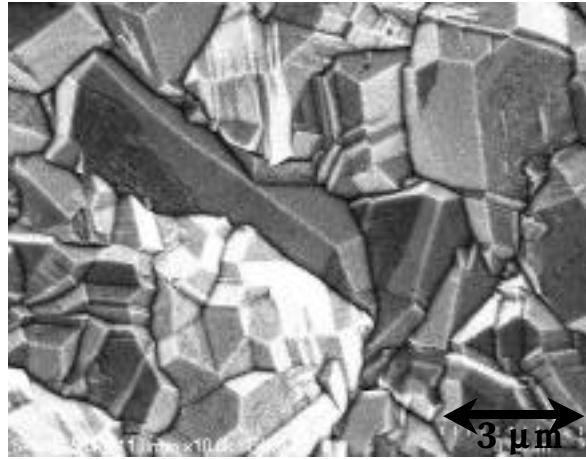
ダイヤモンドである事よりも、粒界の影響による伝搬損失の影響の方が遥かに大きい事がわかった。

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N₂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 $\sim 5\mu\text{m}$ 、 $\sim 3\mu\text{m}$ 、 $\sim 0.5\mu\text{m}$ 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H₂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。

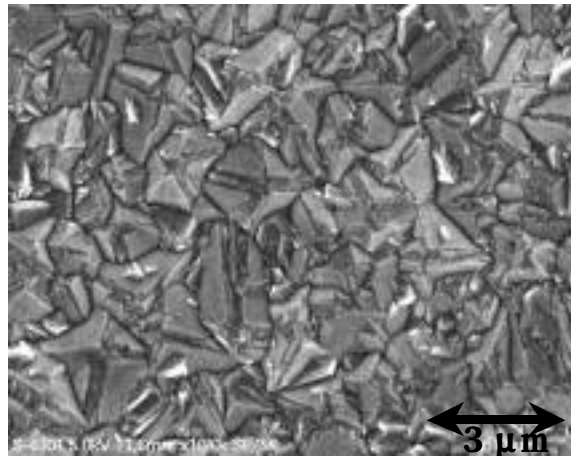
これを研磨したウェハを用いて実際にSAWのテストデバイスを試作し、伝搬損失を測定した。その結果を図3-10に示す。いくつかの周波数で作製しているが、例えば2.5GHzでの比較結果を示すと、上記の順番に0.035から0.02dB/ λ に下がっており、ダイヤモンドの粒径が伝搬損失に及ぼす効果が、非常に大きいものであることがわかる [26]。

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になりであるが、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ことから、微粒化に伴う問題はほぼ無視できると言える。

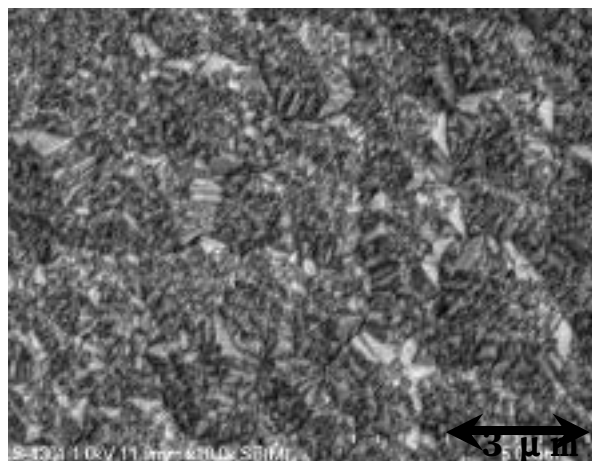
以上により、SAWデバイスプロセスが可能な形状を有し、かつ高い位相速度と低い伝搬損失を有するダイヤモンドウェハを作製する事ができた。



(a) 粒径 $\sim 5\ \mu\text{m}$



(b) 粒径 $\sim 3\ \mu\text{m}$



(c) 粒径 $\sim 0.5\ \mu\text{m}$

図3-9.粒径を変えて合成したダイヤモンドのSEM写真

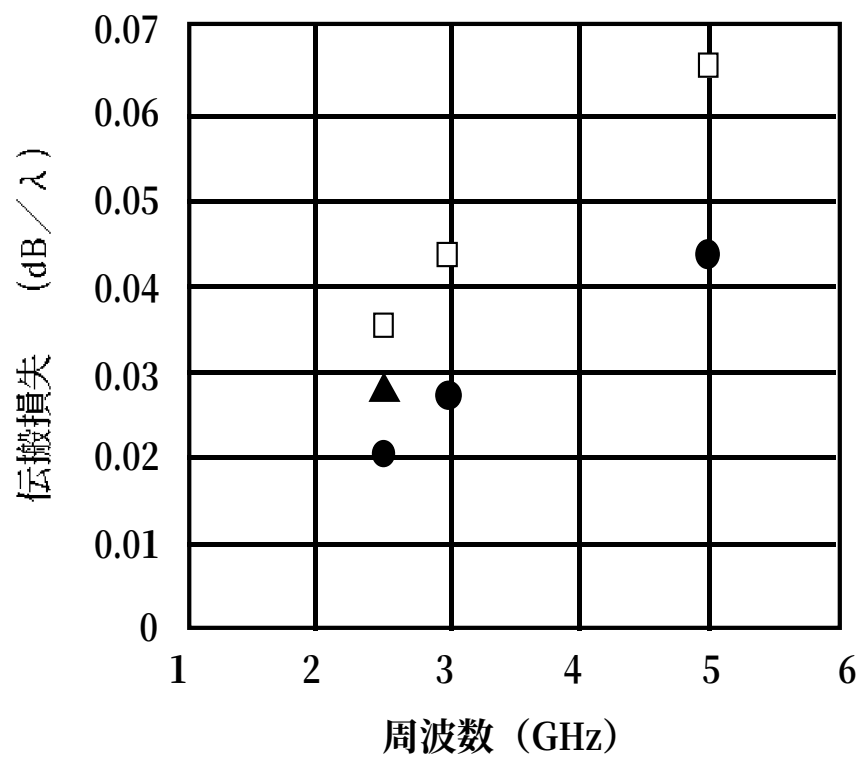


図3-10. 粒径を変えて合成したダイヤモンドの伝搬損失

□ A : $\sim 5 \mu\text{m}$ ▲ B : $\sim 3 \mu\text{m}$ ● C : $\sim 0.5 \mu\text{m}$

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、 $a=3.25\text{\AA}$ $c=5.12\text{\AA}$ 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、 $\text{SiO}_2/\text{ZnO}/\text{ダイヤモンド}$ 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。

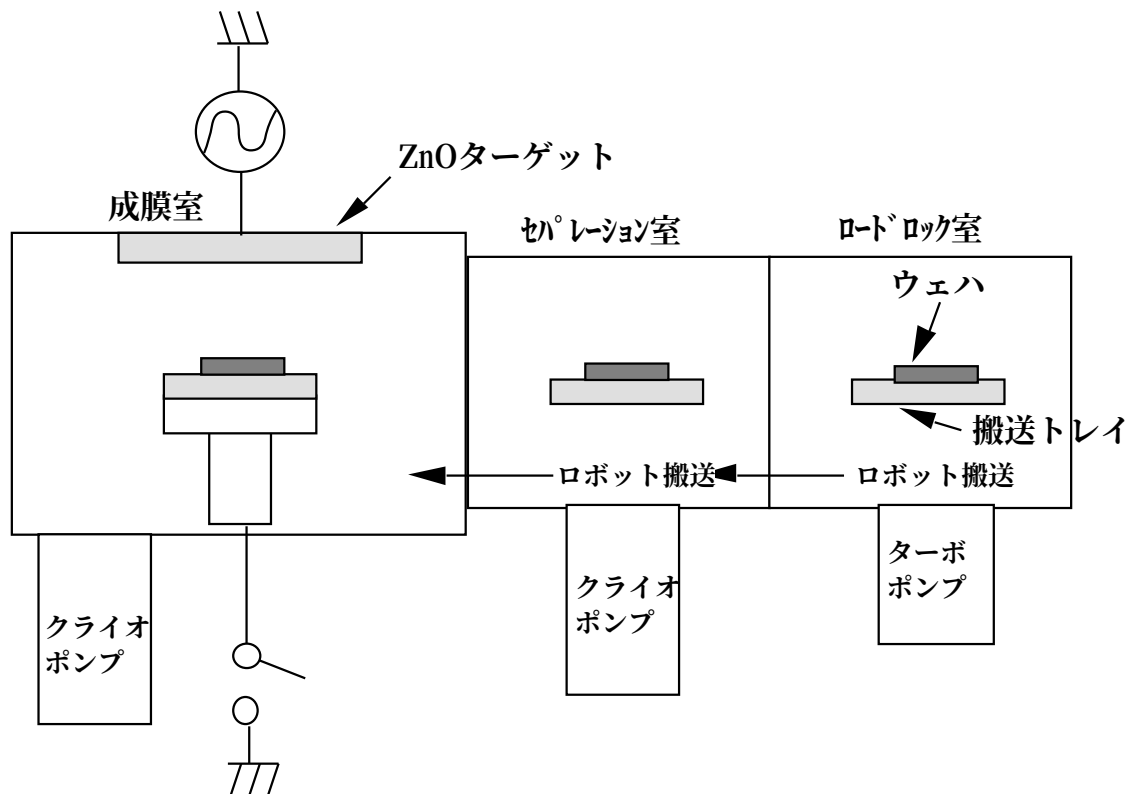


図3-11.マグネトロンスパッタリング装置概略図

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、O₂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 (°C)	200~350°C
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0.5 μmのZnOを成膜して、c軸配向性を調査した [33]。X線のロックングカーブによる(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、(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。

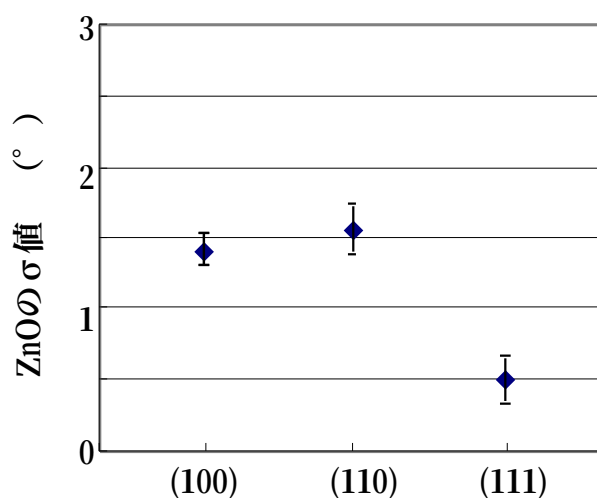


図3-12.ダイヤモンド単結晶上に成膜したZnOのX線のロックングカーブによるc軸配向のσ値

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。

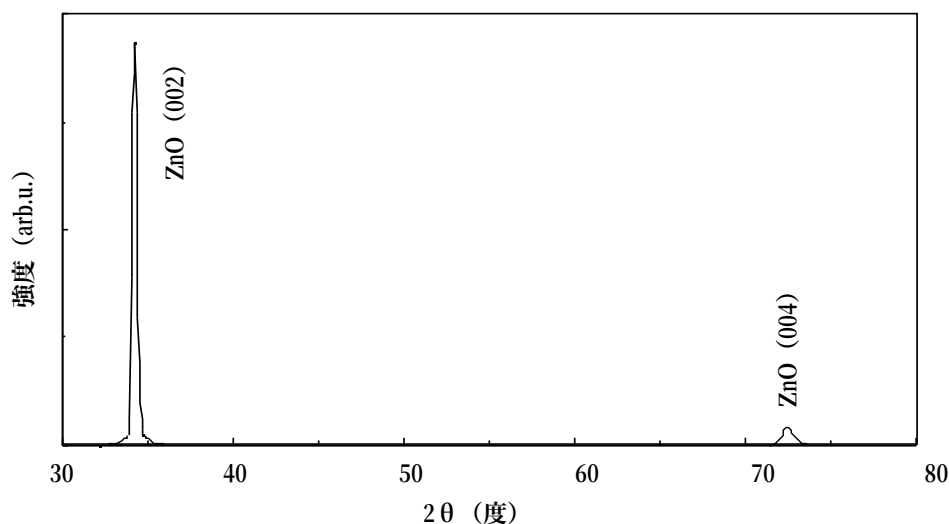


図3-13.多結晶ダイヤモンド上に成膜したZnOのX線回折

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、1 μ m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、0.5 μ m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。

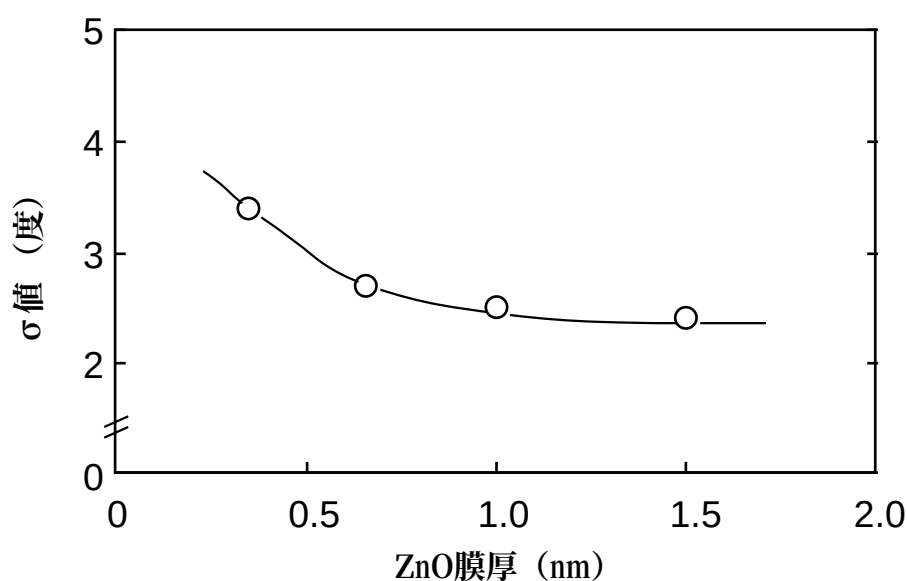


図3-14.多結晶ダイヤモンド上ZnOの σ 値の膜厚依存性

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、 $0.5\sim 2.0\ \mu\text{m}$ のZnOを 430°C 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

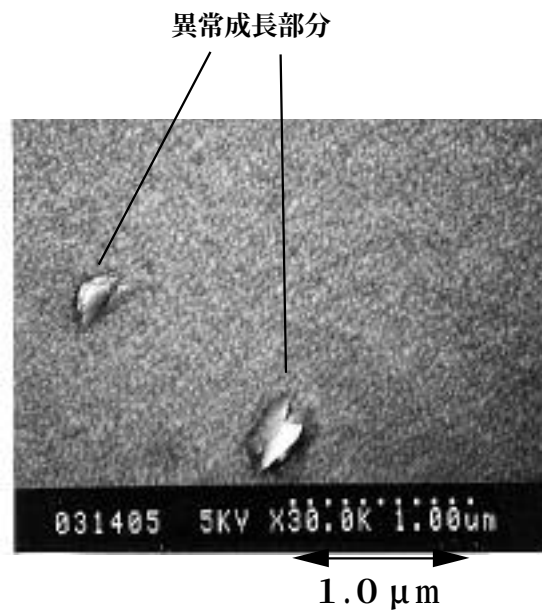


図3-15.多結晶ダイヤモンド上に成膜したZnOのSEM写真

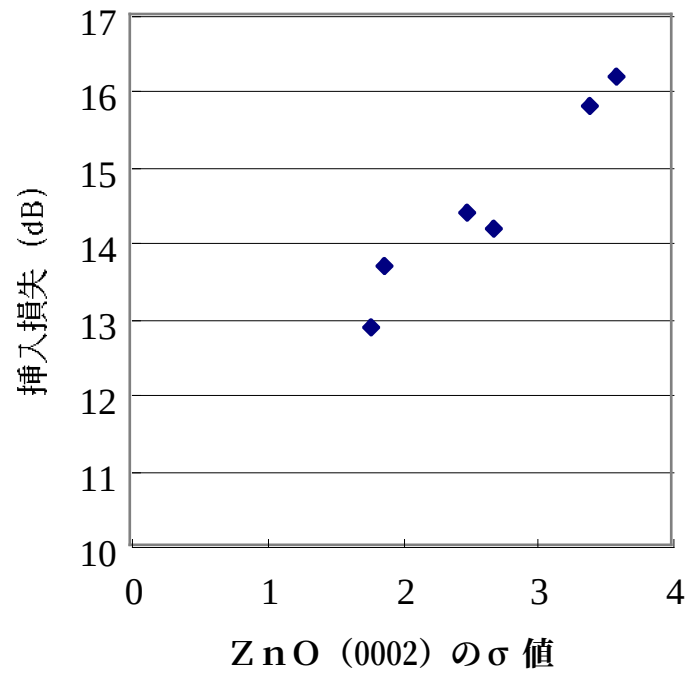


図3-16.ZnOのc軸配向の σ 値とデバイスの損失の関係

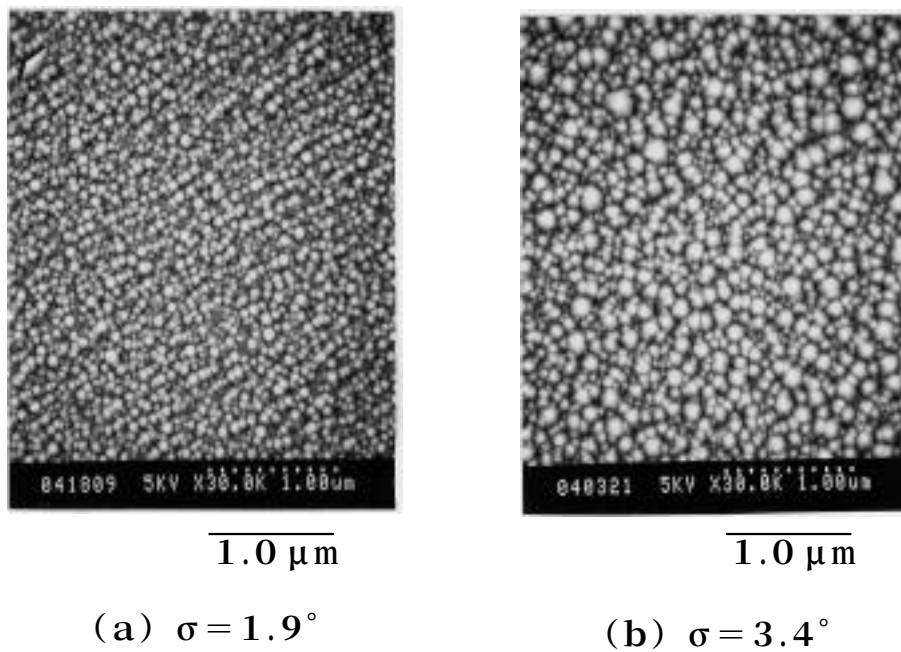


図 3-17. ZnO の S E M 像

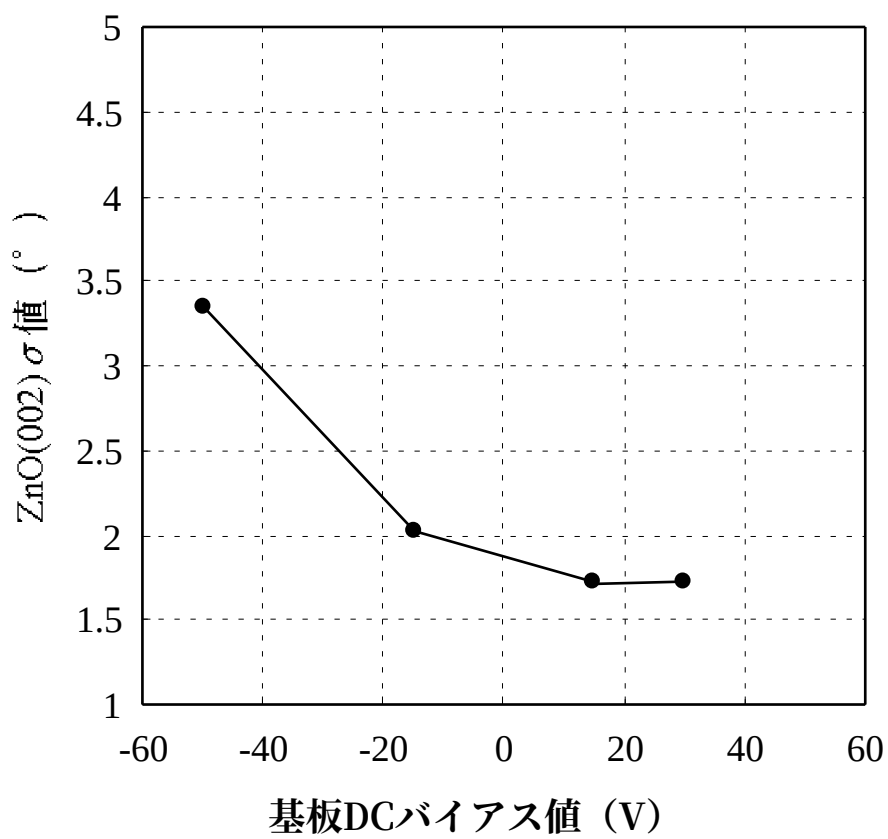


図 3-18. ZnO の成膜バイアスが σ 値に及ぼす影響

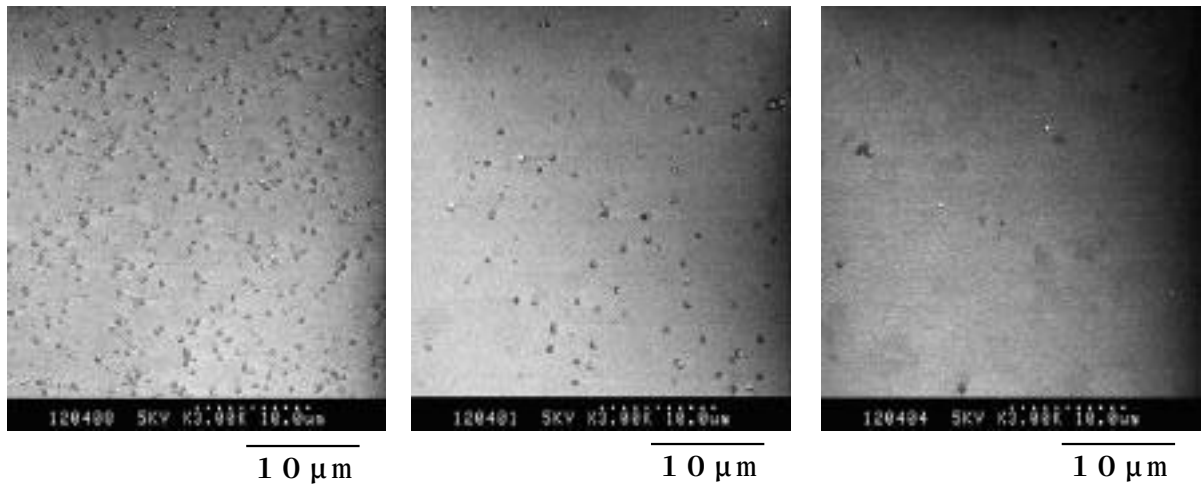
び成長させることに成功し、一方SiO₂をスパッタリングで形成し、その後、半導体の不純物の活性化に使われているRTA (Rapid Thermal Annealing) を行うことにより、界面準位が減少した例が報告されている [36]。SAWデバイスに必要とされているZnOの膜質はc軸配向性を優先させながら、結晶粒径があまり大きくならないようにすることである。結晶粒径があまり大きくなると個々の結晶の表面での凹凸が大きくなり、伝搬損失を増加させるからである。結晶粒径の成長エネルギーがc面優先配向エネルギーより小さいとすると、通常のアニールで低温からゆっくり温度を上げて行った場合、成長過程で粒径が大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
R F 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°Cアニール (c) 500°Cアニール

図3-19.アニールによる異常成長の低減

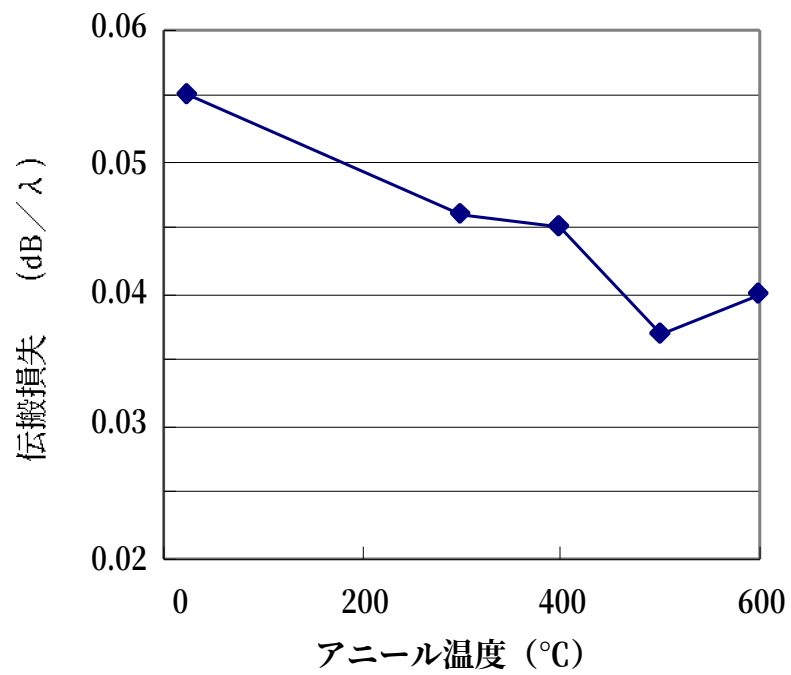


図3-20.伝搬損失のアニール温度依存性

0.055dB/λから、500°C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F E S E M写真



300nm

図 3-2 1.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 $\text{AlCu}_{0.5\%}$ 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 $\text{AlCu}_{0.5\%}$ によるIDT（Interdigital transducer）は25～50nm程度の薄い膜である。ここで $\text{AlCu}_{0.5\%}$ 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リソで形成し、反応性イオンエッチング（RIE-Reactive Ion Etching）を用いて $\text{AlCu}_{0.5\%}$ 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。 $\text{AlCu}_{0.5\%}$ 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 $\text{AlCu}_{0.5\%}$ 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、予めフォトリソ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。十分にベーク

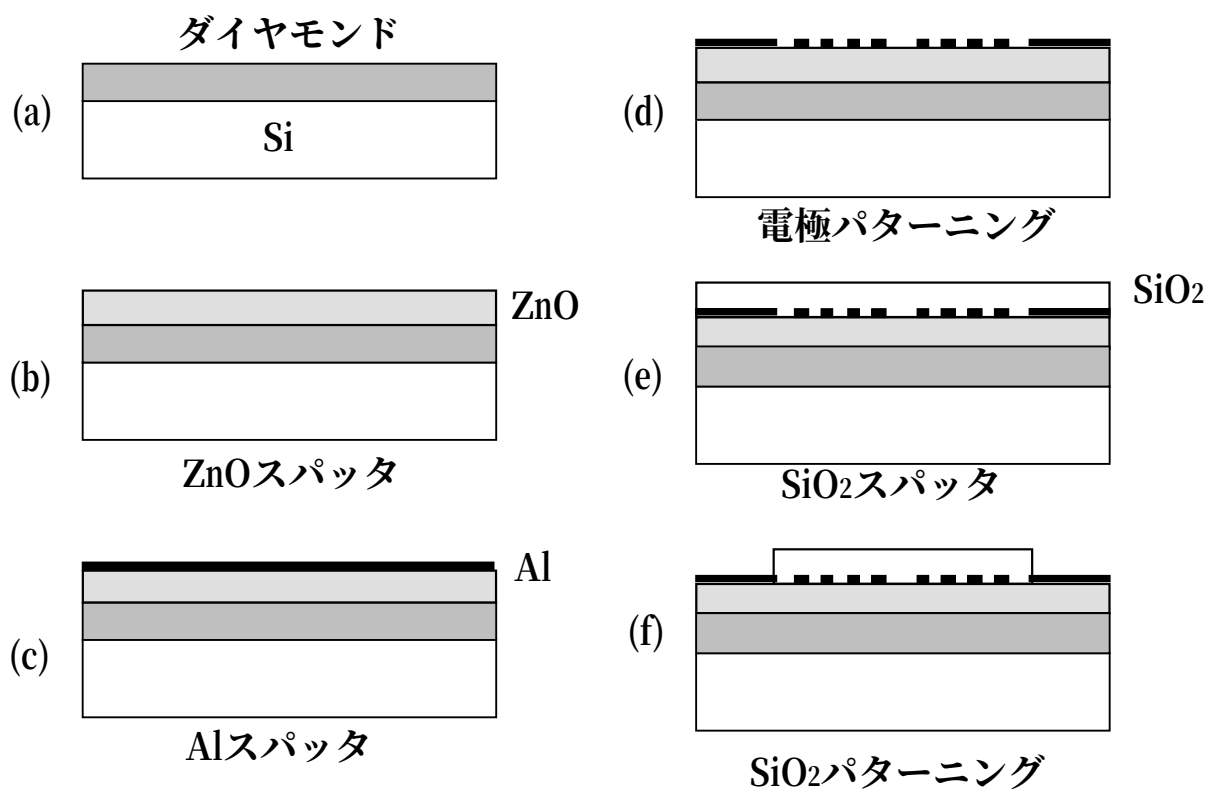


図3-2 2 ウェハプロセスのフロー図

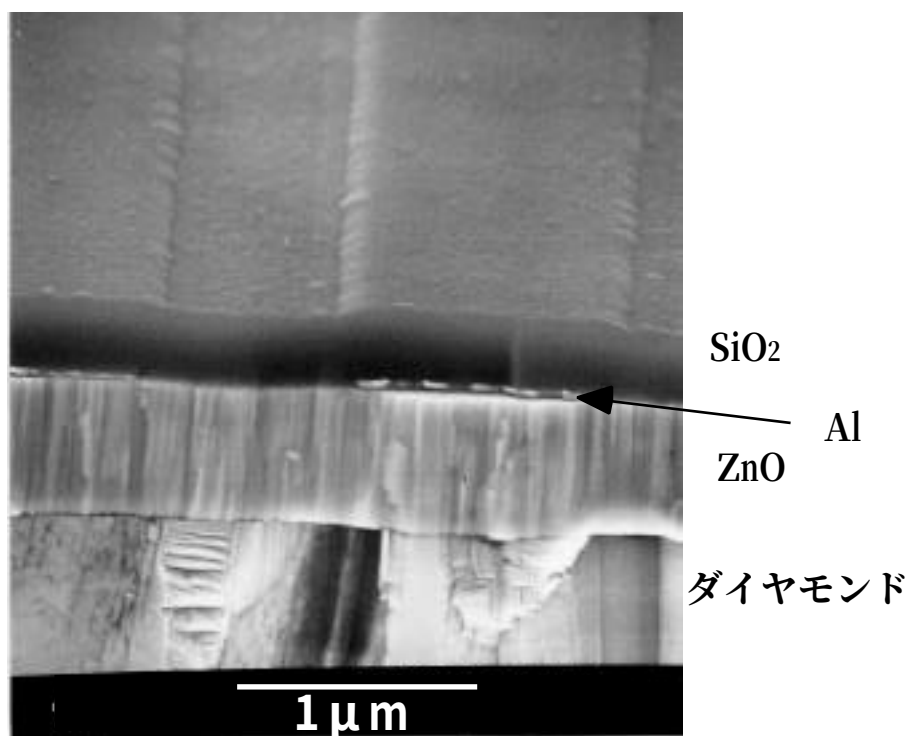


図3-2 3 ウェハプロセス済みのデバイス断面SEM像

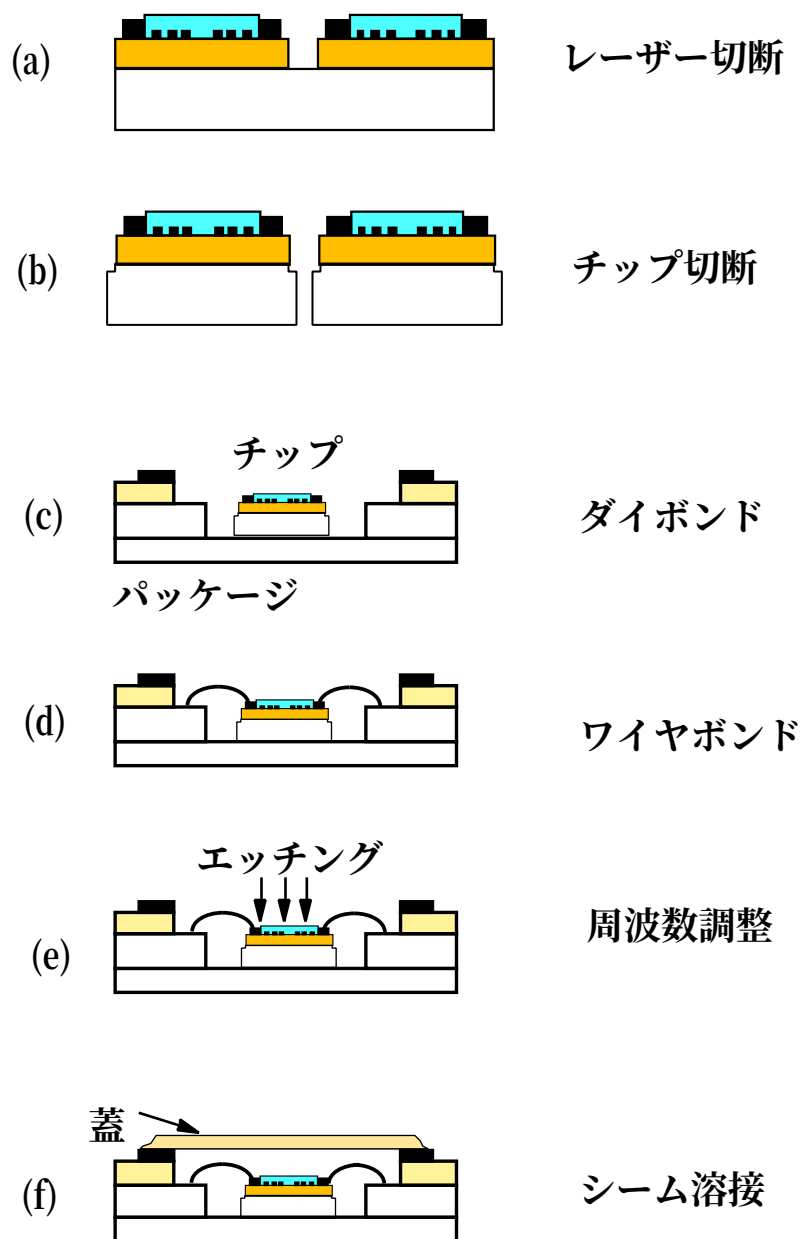


図 3-2 4 実装プロセスのフロー図

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、CHF₃とO₂ガスにより、素子最上層のSiO₂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）楕形電極形成

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]。

$$L_r = 10 \cdot \log (R_{\text{saw}} / (R_{\text{saw}} + R_{\text{idt}})) \quad (3-2)$$

ここで、R_{saw}：SAWとして消費されたエネルギーに相当する等価抵抗分

R_{idt}：IDTの直列抵抗である。

R_{saw}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。R_{saw}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。

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

ここでWはIDT交差幅である。

IDTの直列抵抗R_{idt}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]。

$$R_{\text{idt}} = (2 \rho l / 3dh) / N \quad (3-4)$$

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L_rの値はR_{saw}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、 $6.5 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}$ で1dB、30nmの場合 $5.5 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}$ で1dBとなる。

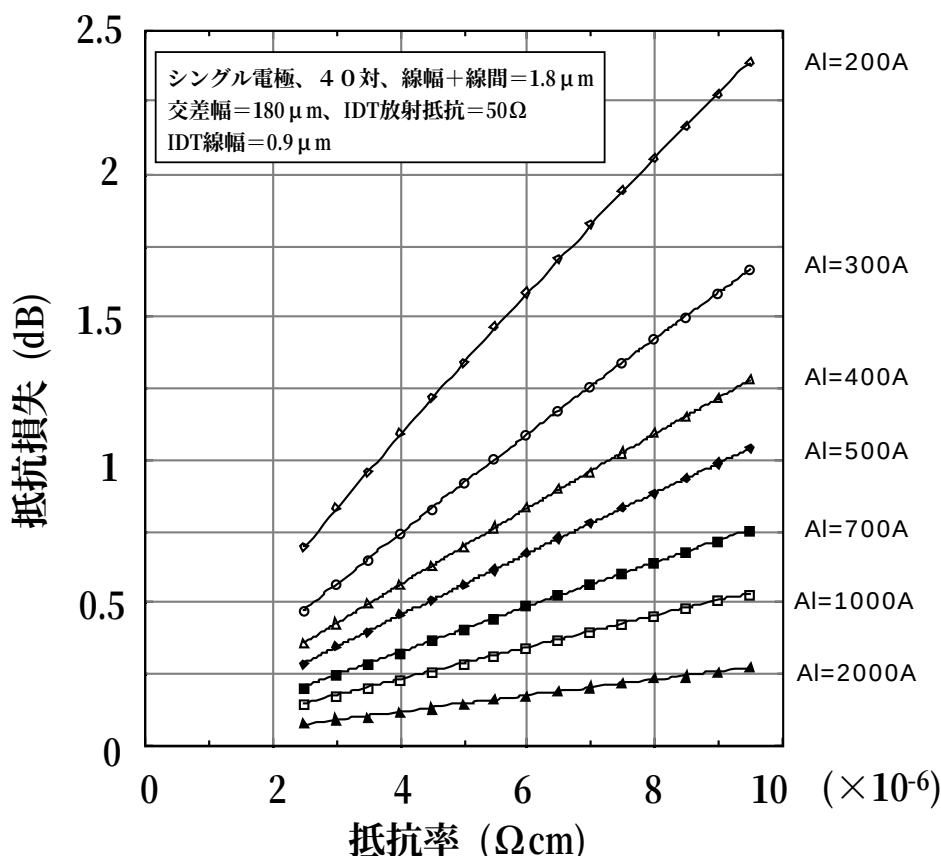


図3-25.電極抵抗率の抵抗損失への影響

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 $5.2 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}$ 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。

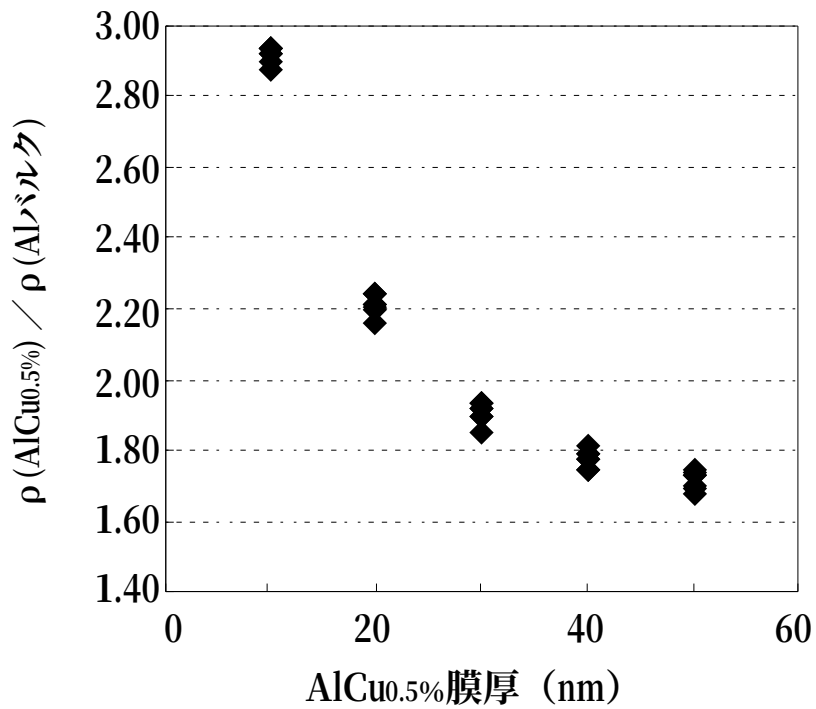


図 3-2 6.電極抵抗率の抵抗損失への影響

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、 $\text{SiO}_2/\text{IDT}/\text{ZnO}/\text{ダイヤモンド}$ 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。

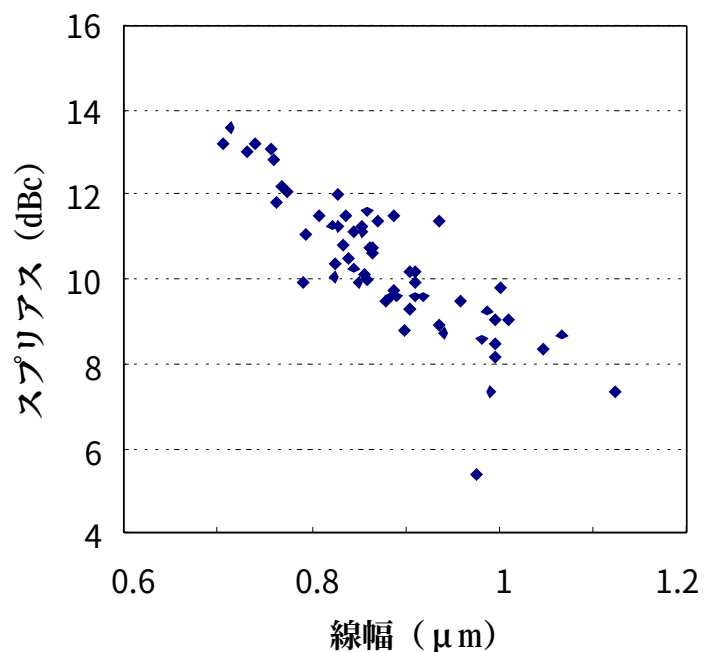


図 3-2 7 電極線幅と1次のスプリアス（2次主ピーク比）

ライン (L) とスペース (S) が $L+S=2.0\text{ }\mu\text{m}$ であるので、線幅 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ というのは $L=0.8\text{ }\mu\text{m}$ 、 $S=1.2\text{ }\mu\text{m}$ ということになる。この図からわかるように $L=1\text{ }\mu\text{m}$ の時にスプリアス 9dBc であるものが、 $0.7\text{ }\mu\text{m}$ 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、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。

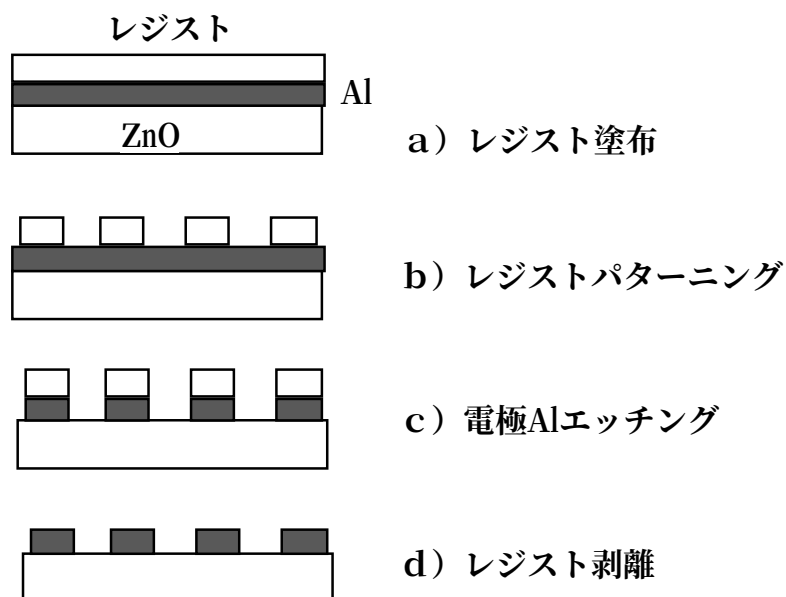


図 3-28. 電極形成プロセスフロー図

フォトリソレジストを塗布し (a)、i 線 (365nm) ステップ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 $\text{SiO}_2/\text{IDT}/\text{ZnO}/\text{ダイヤモンド}$ 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、十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AlCu0.5%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SiO₂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。AlCu0.5%電極の厚みが30nm、保護SiO₂層厚みが5nm程度と想定して、エッチング選択比(AlCu0.5%/SiO₂)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]。AlCu0.5%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。AlCu0.5%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AlCu0.5%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BCl₃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、SiO₂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、AlCu0.5%のエッチングを促進でき、SiO₂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BCl₃にCl₂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BBBr₃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。SiO₂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、AlCu0.5%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。

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。

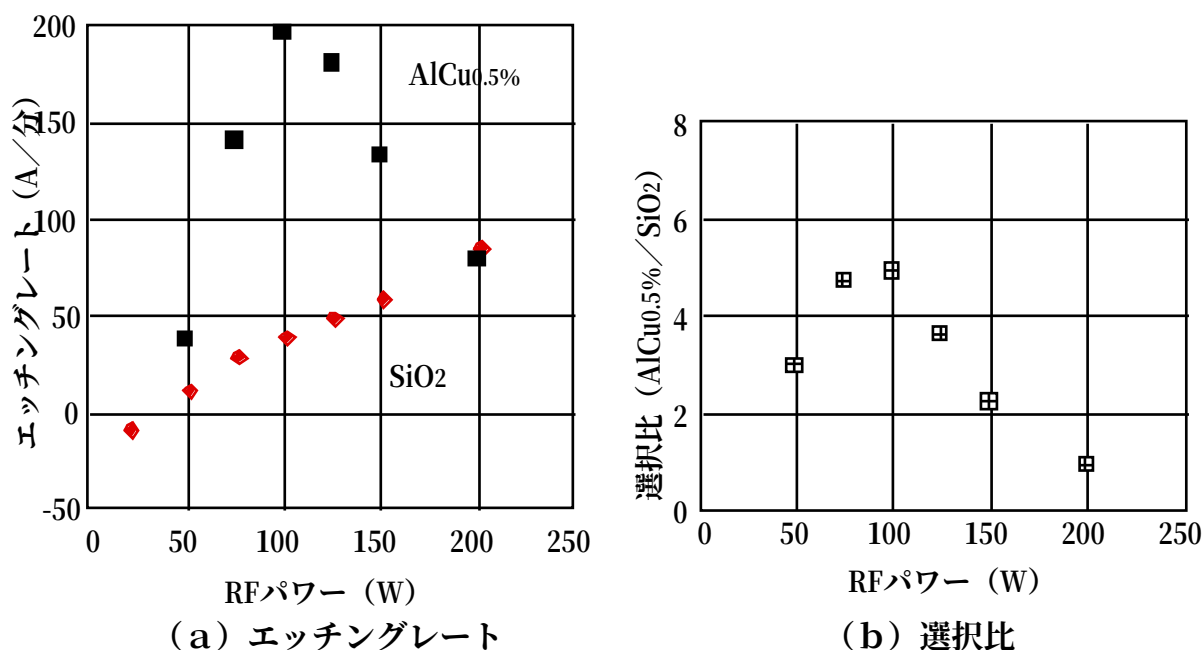


図 3-2 9. AlCu_{0.5%}とSiO₂エッチングレート及び選択比のRFパワー依存性

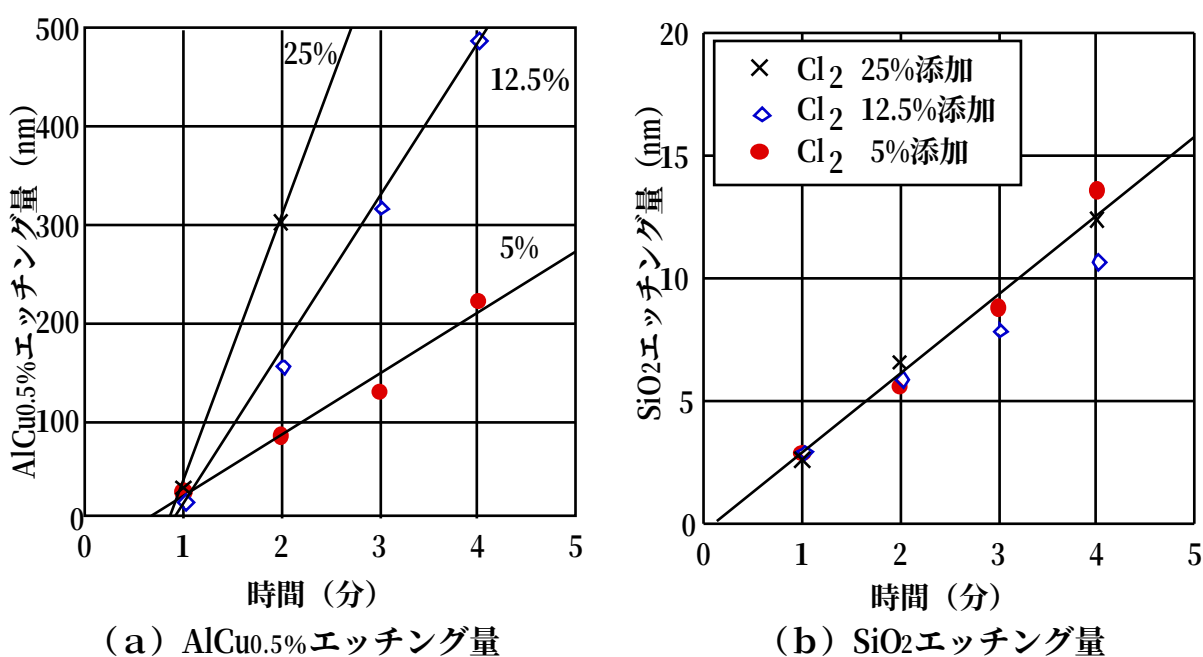


図 3-3 0. AlCu_{0.5%}とSiO₂エッチングレートのCl₂添加量依存性

Cl₂を添加することで、AlCu_{0.5%}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、AlCu_{0.5%}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+Cl₂25%添加ガスを用いて、選択比がAlCu_{0.5%}/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3-3 1は0.5 μm 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ます。

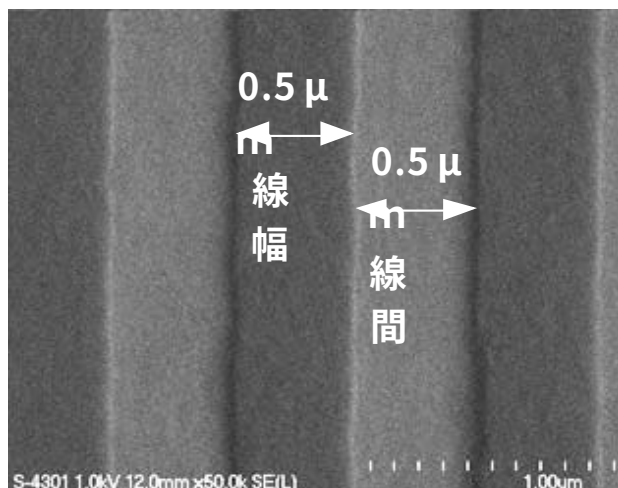


図3-3 1.試作した0.5 μm ライン&スペース

図3-3 2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。

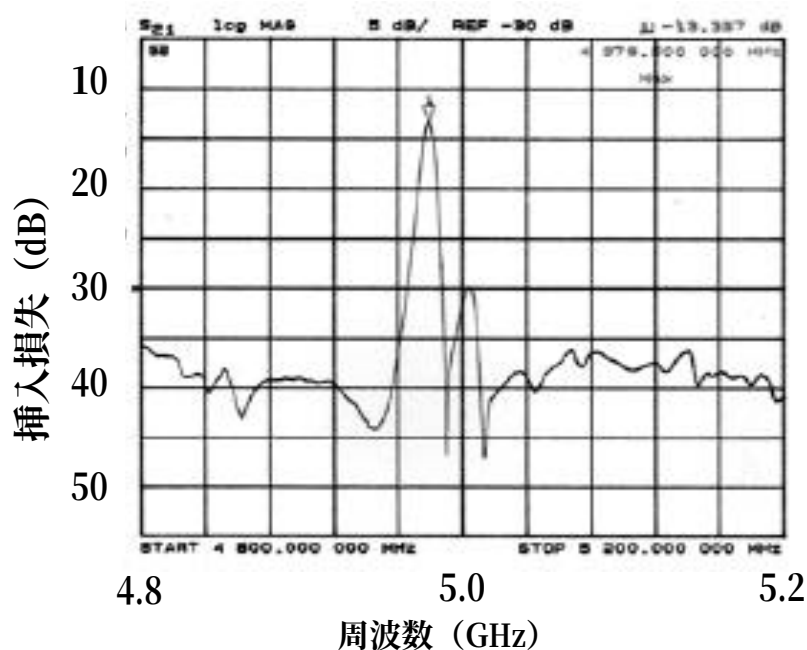


図3-3 2. 5GHzフィルタの S_{21} 特性 ($f_0=4.978$ GHz, $Q=650$, $\text{loss}=13.4$ dB)

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/cm²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SiO₂エッチングストップ層を導入することと、BCl₃にCl₂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.Enckevoort, 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.Ultrason. 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.Cryystal Growth, 130,269 (1993)
- [32] L.Mang and F.S.Hickernell, 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SiO₂薄膜の成膜の検討を行った。そしてそれらを用いたSiO₂/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SiO₂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SiO₂の膜厚を実験的に最適化を行い、SiO₂/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S₂₁のピークの周波数 f_0 から、次式で求められる。

$$f_0 = V/\lambda \quad (4-1)$$

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ので、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、大変により一致を示す。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SiO₂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SiO₂／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SiO₂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。

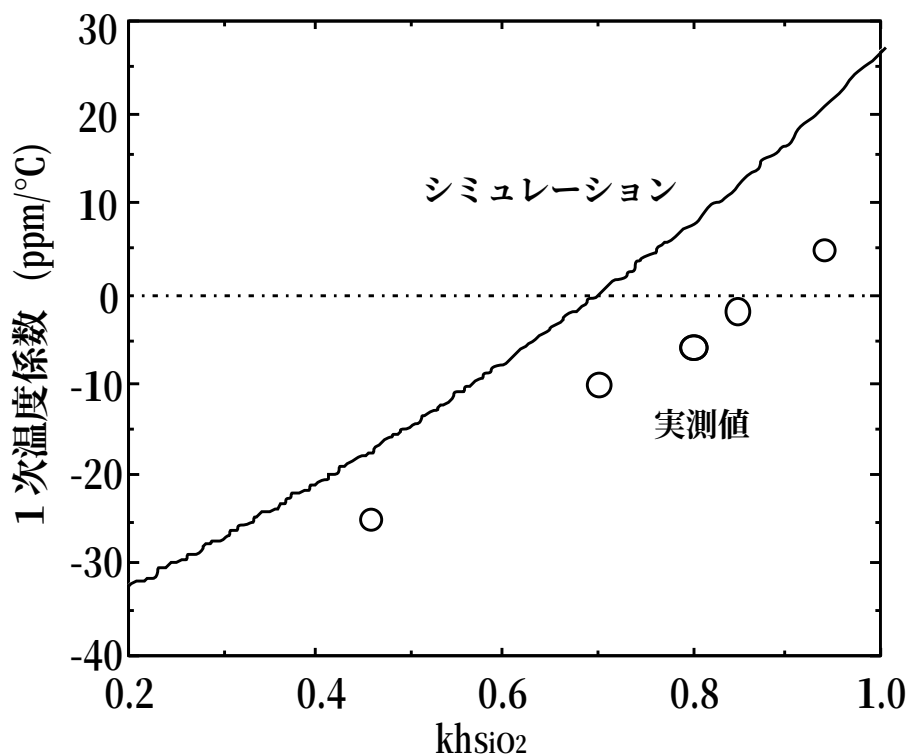


図4-4. SiO₂による温度補償

図から見られるように、SiO₂でZnO／ダイヤモンドの温度特性を補償し、この例では $khSiO_2=0.86$ 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比べると、約30%程度膜厚増で補償されている事がわかる。これはSiO₂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SiO₂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。

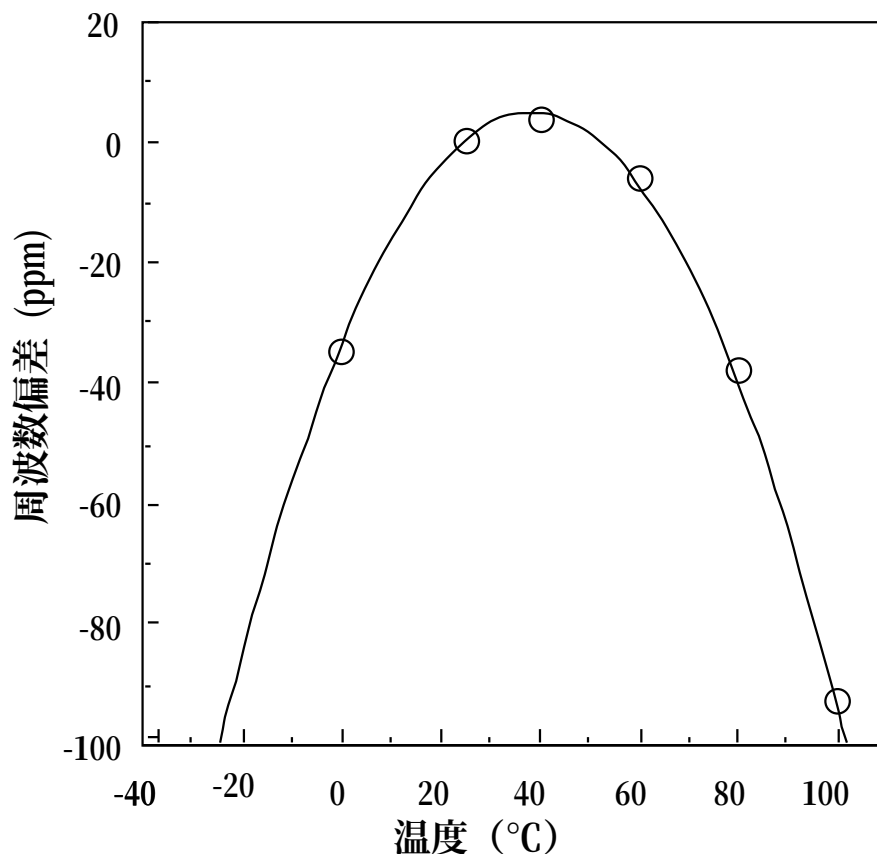


図4-5. 2次係数が表れている温度特性例

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 $-40\sim 85^\circ\text{C}$ 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、幾多もの利点がある。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。

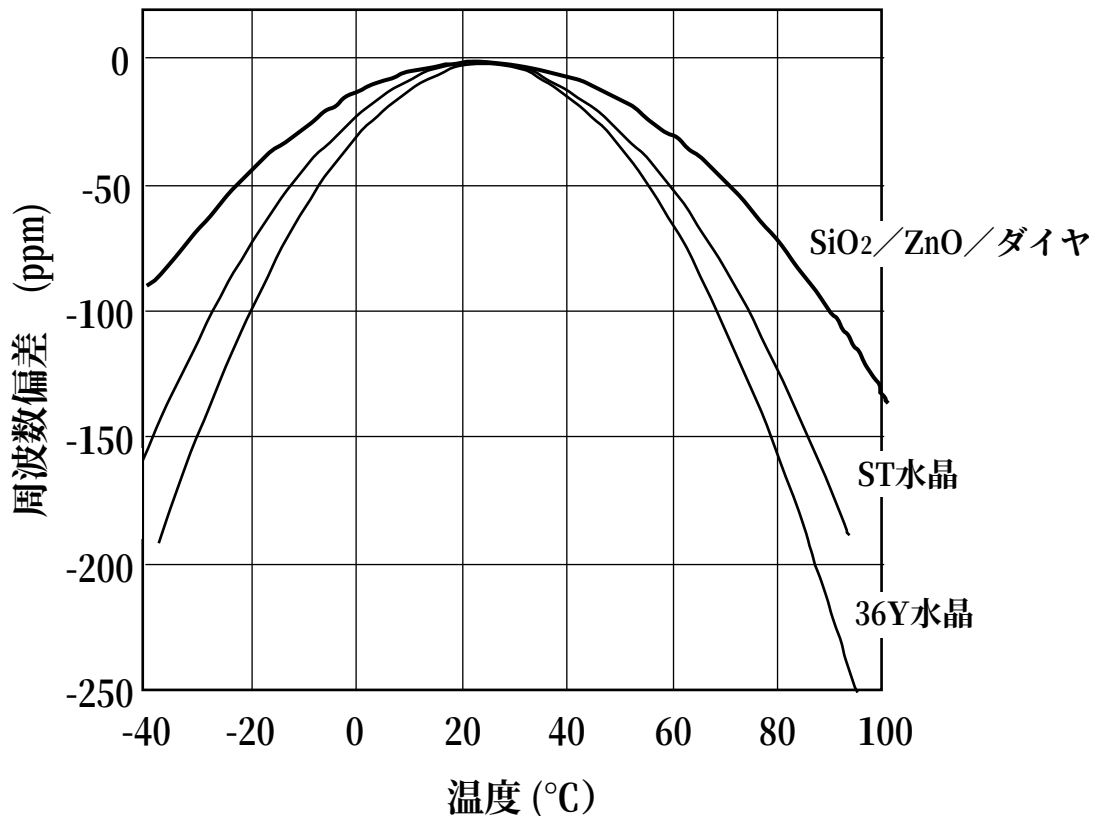


図4-6. SiO₂/ZnO/ダイヤモンド系の温度特性

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、AlCu0.5%電極とSiO₂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、AlCu0.5%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SiO₂の膜厚の組合せを変えて、実験を行った。

その結果を表4-1に示す [10,11]。

表4-1 .ZnOとSiO₂の膜厚の組合せと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/°C²まで改善する事ができた。-40～85°C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、SiO₂/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LiTaO₃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	1 μm	1 μm
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、1 μm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LiTaO₃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ーとなる。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、LiTaO₃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(S₂₁)を図4-8に示す。

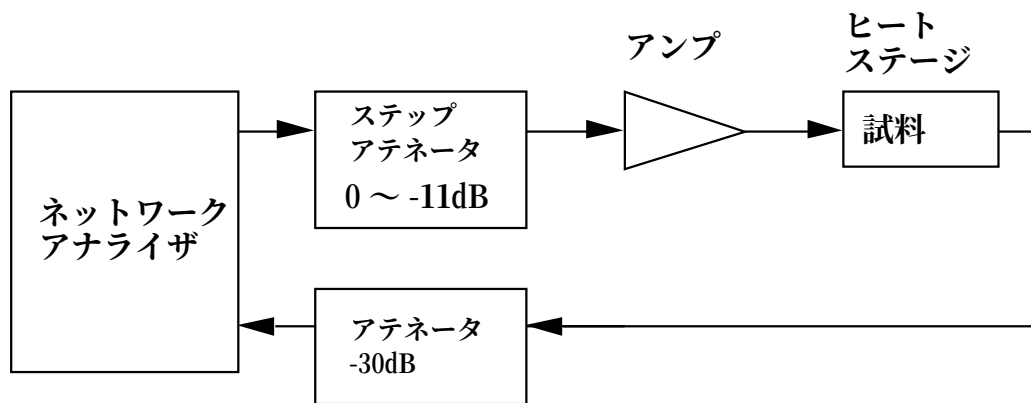


図4-7. 耐電力性の計測系

ダイヤモンドに36dBm、LiTaO₃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。LiTaO₃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、LiTaO₃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、LiTaO₃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LiTaO₃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]。

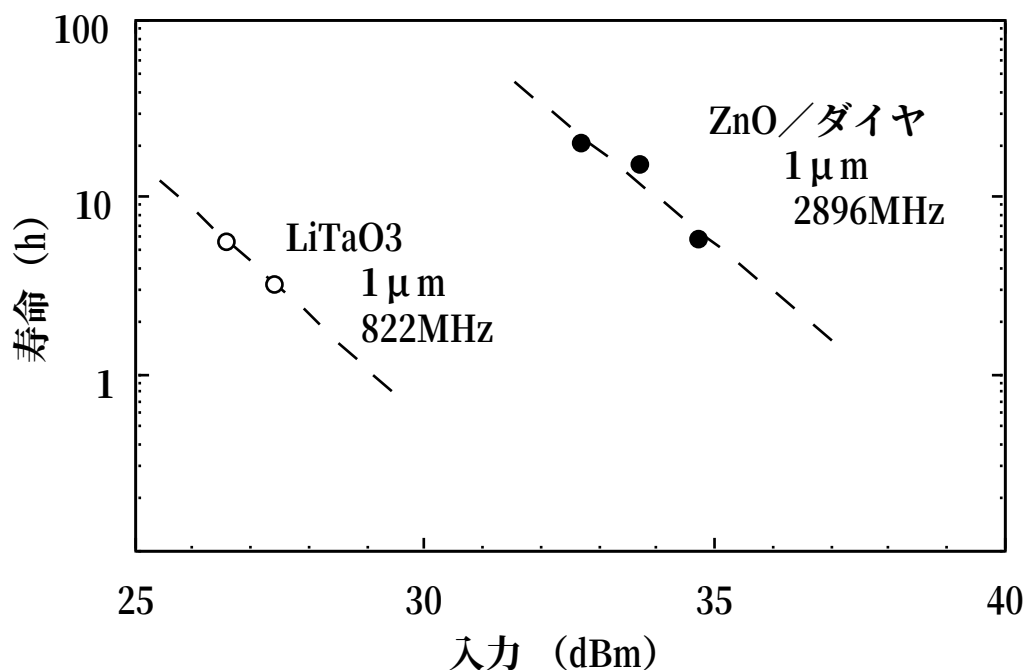


図 4-1 0. 高電圧印加時の加速劣化試験結果加速温度 (120°C)

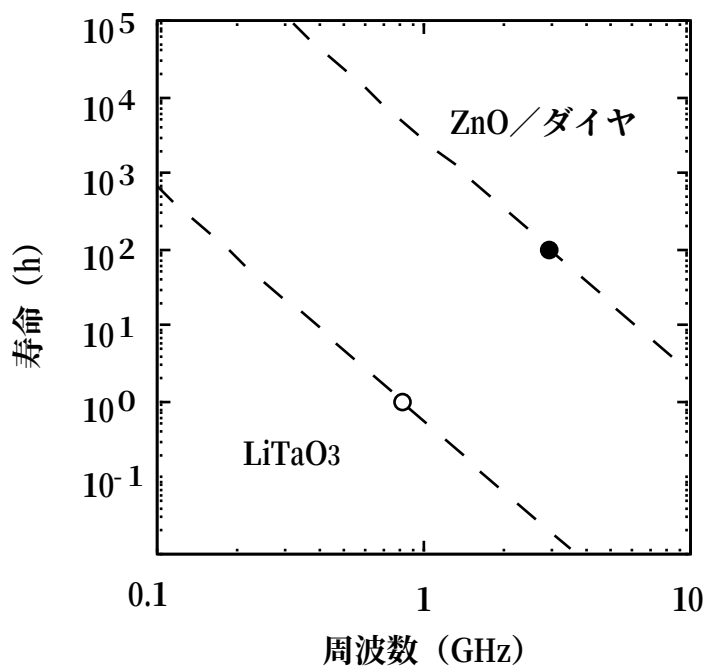


図 4-1 1. 寿命の周波数依存性 (加速温度120°C)

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 4-1 2 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 $5\text{cm}^2/\text{s}$ の高い熱拡散率を有する [16]。それに対して LiTaO₃ は

0.013cm²/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、LiTaO₃の弾性定数(×10¹¹ N/m²)がC₁₁=2.298 C₁₃=0.812 C₃₃=2.798 C₄₄=0.968であるのに対し、ダイヤモンドは各々C₁₁=10.8 C₁₂=1.25 C₃₃=10.8 C₄₄=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。

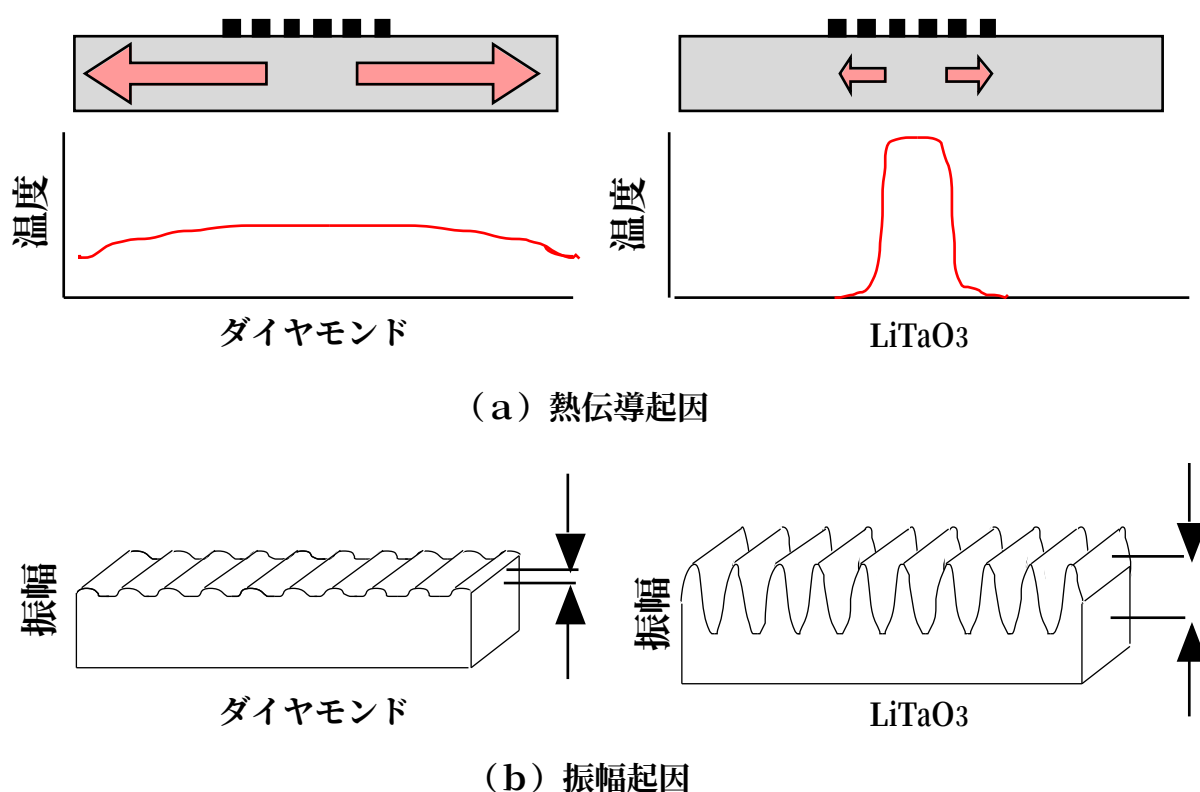


図4-12. ダイヤモンドとLiTaO₃の耐電力性の差を説明する模式図

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場所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SiO₂を積層したSiO₂/ZnO/IDT/ダイヤモンドとその逆のSiO₂/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SiO₂/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SiO₂/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、実用上優れていると言える。

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H₂O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）、電氣的試験（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SiO₂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SiO₂の膜厚を実験的に最適化を行い、SiO₂／ZnO／ダイヤモンド系が-0.017ppm/°C²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ーが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SiO₂／IDT／ZnO／ダイヤモンドが優れていることがわかった。

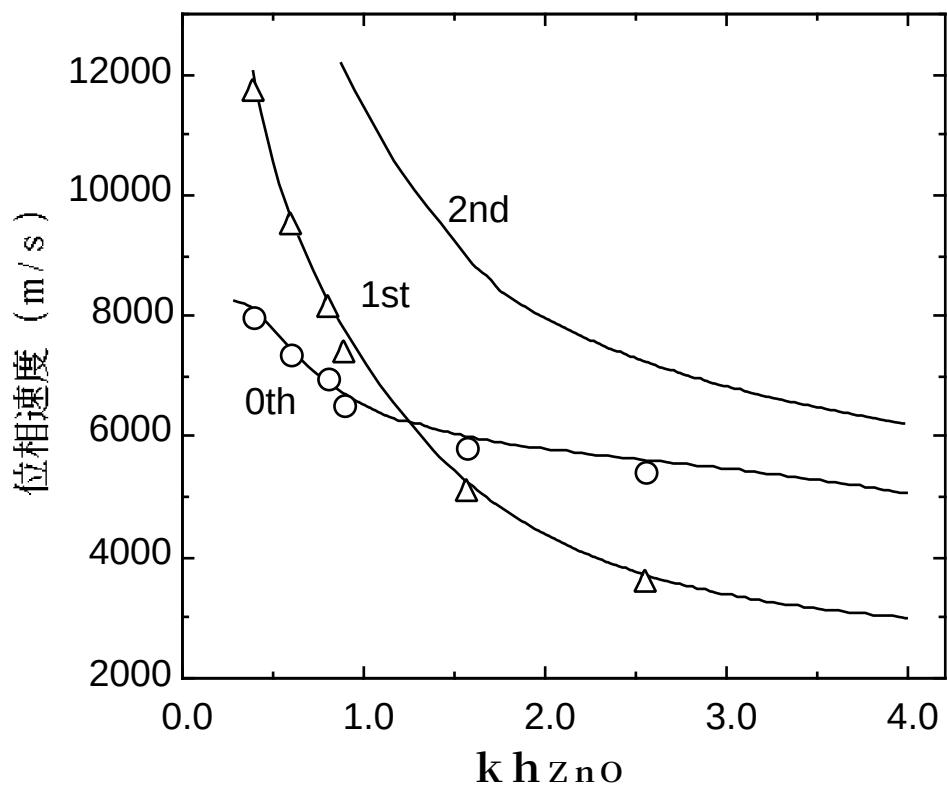
最後に信頼性試験と対策を行い、最も厳しい規格を満足する事が出来た。

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SiO₂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、SiO₂／IDT／ZnO／ダイヤモンドが優れていることがわかった。

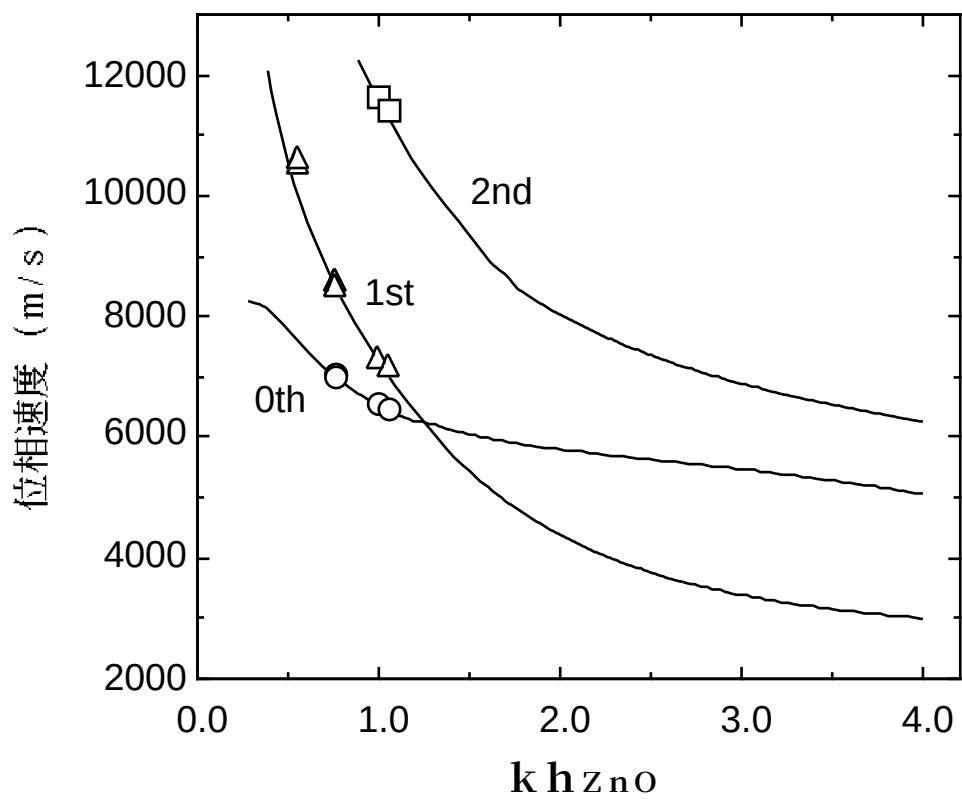
4 章 参考文献

- [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. Kajiwarra 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)

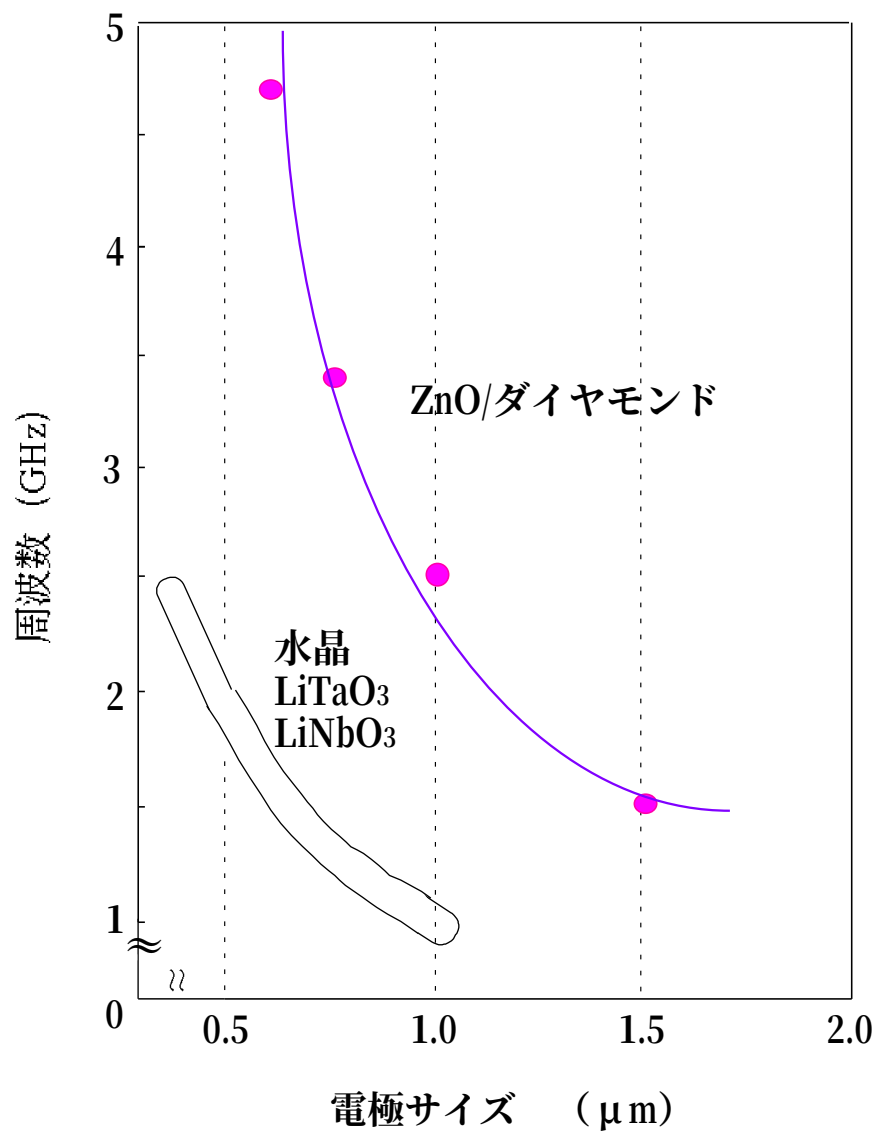
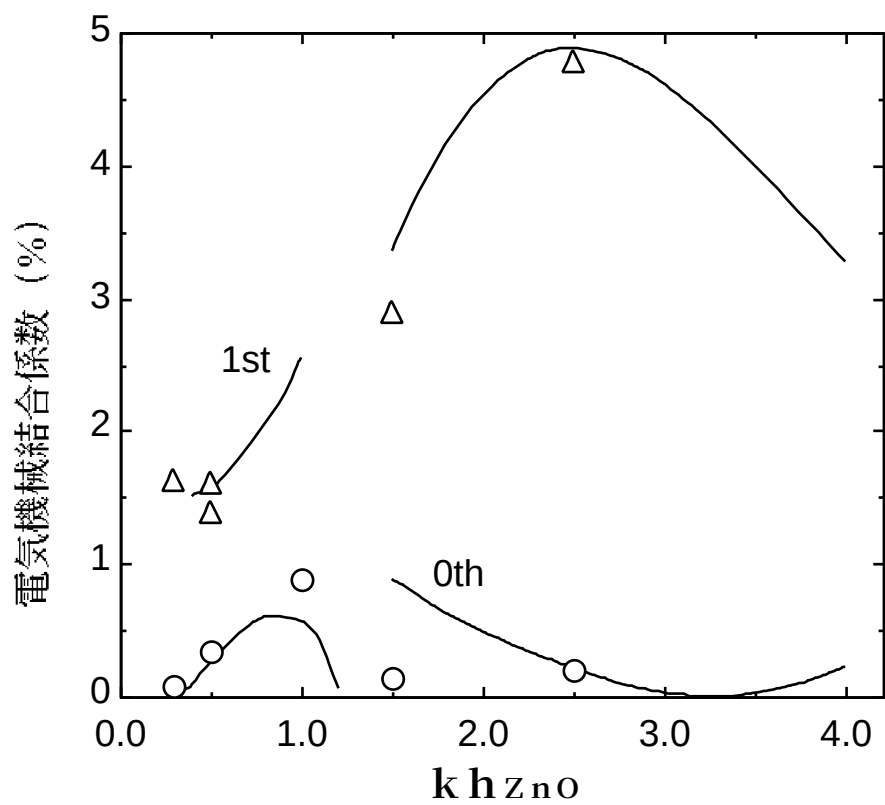
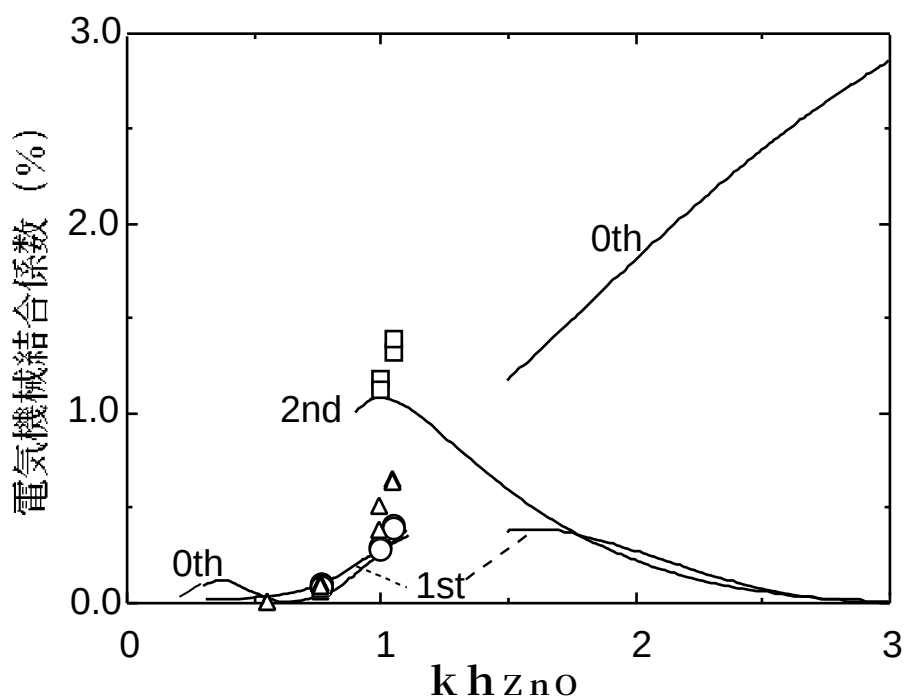


図4-2. IDTサイズと周波数の関係

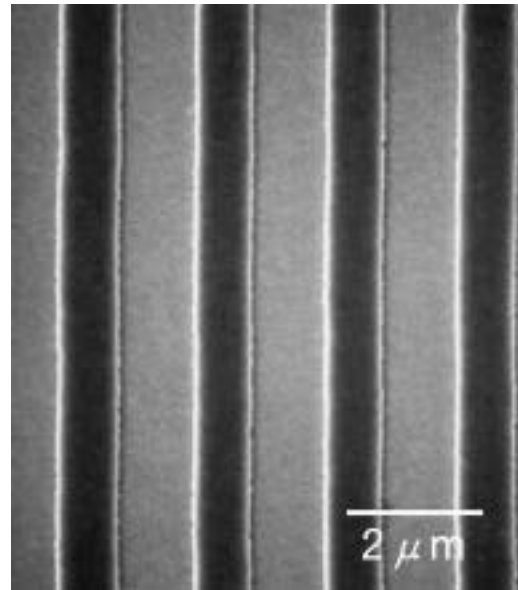


(a) ZnO/IDT/ダイヤモンド構造

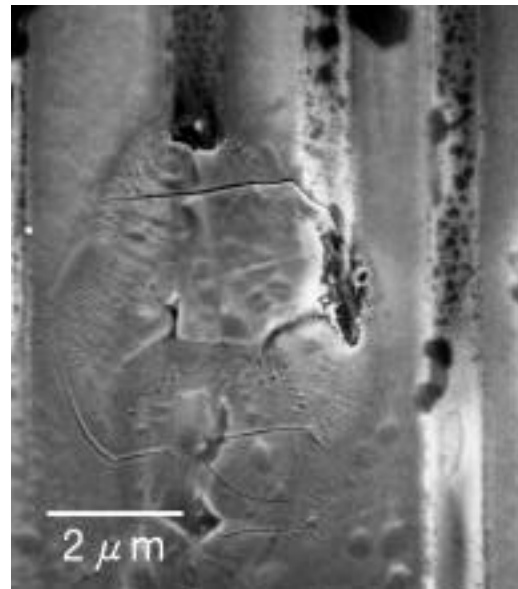
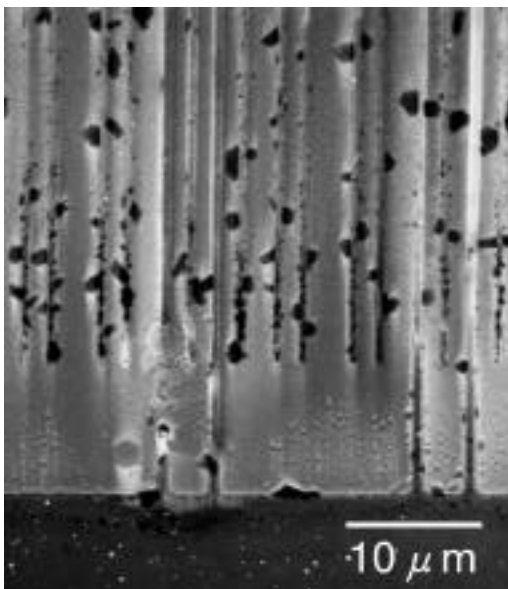


(b) IDT/ZnO/ダイヤモンド構造

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) LiTaO₃ (28dBm印加後)

図4-9. 高電圧印加後の電極のSEM像

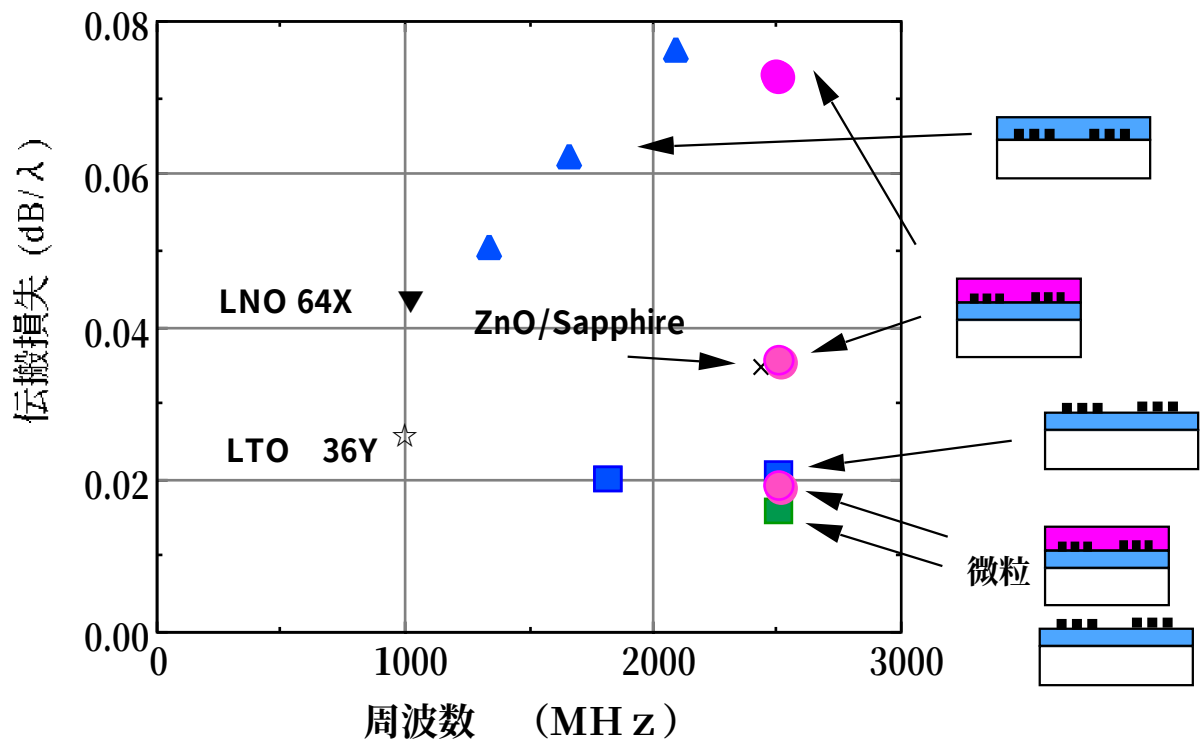


図4-13. ダイヤSAWの構造と伝播損失

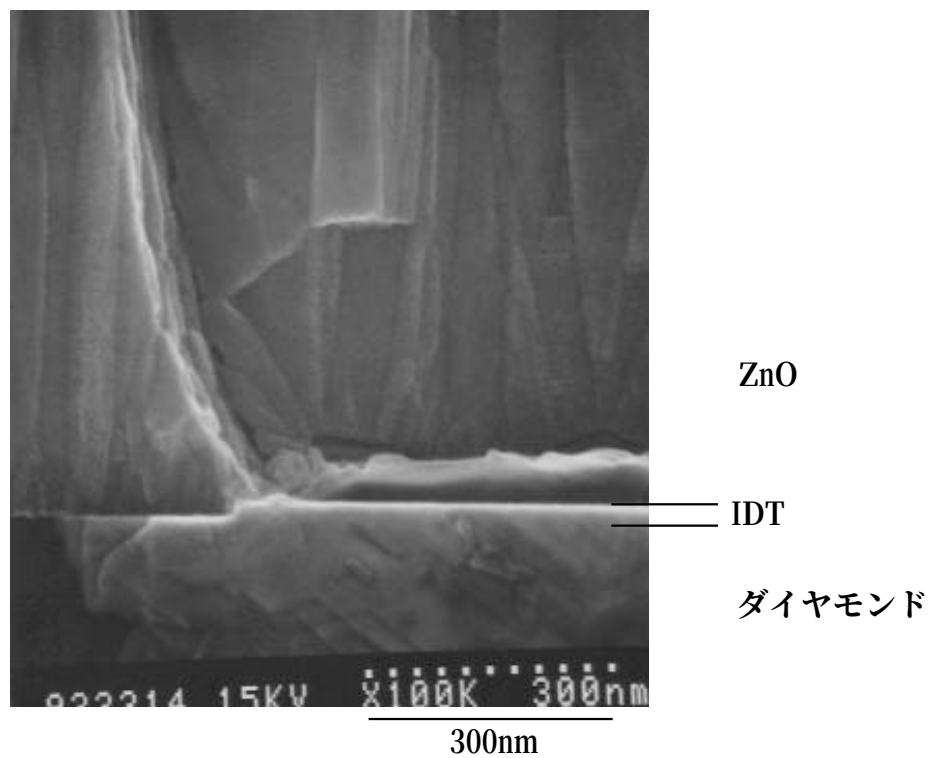
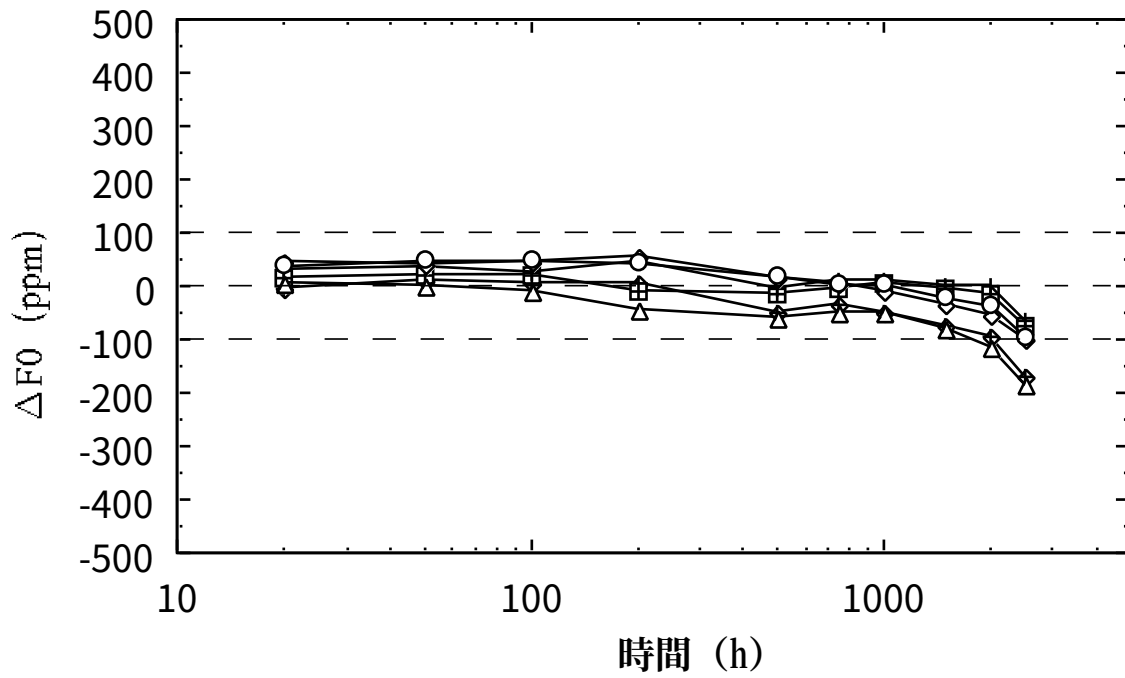
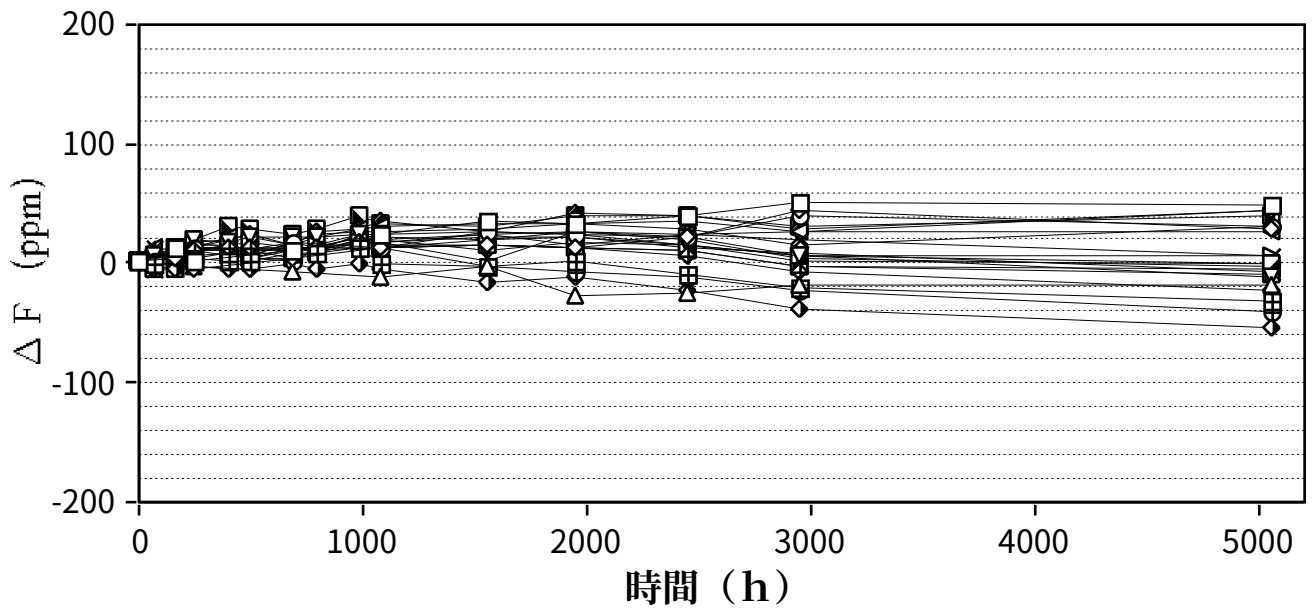


図4-14. ZnO/IDT/ダイヤモンド構造の断面SEM写真



(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

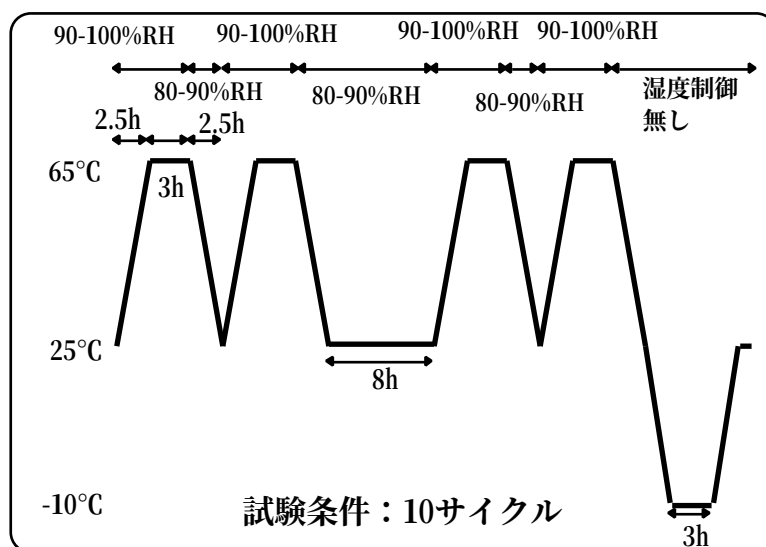


図4-16. 温湿度サイクルの条件

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、 $\text{SiO}_2/\text{IDT}/\text{ZnO}/\text{ダイヤモンド}$ 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	$\text{SiO}_2/\text{IDT}/\text{ZnO}/\text{ダイヤモンド}$
波	セザワ波 2次モード
電極	$\text{AlCu}_{0.5\%}$
khZnO	1.04
khSiO_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	$-0.017\text{ppm}/^\circ\text{C}^2$

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、下記のようなになる [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

器は電氣的には接続していないが、この代わりに単に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、送信用クロックの通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、クロック信号を通倍した後の、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デバイスの初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通倍して用いるが、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 Oscillator）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。

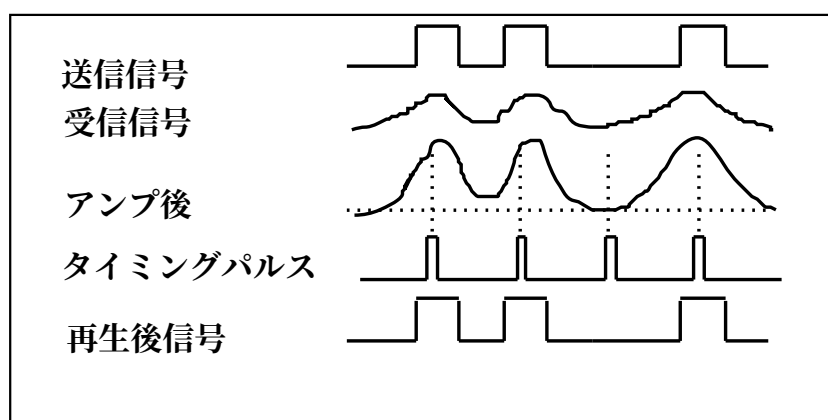


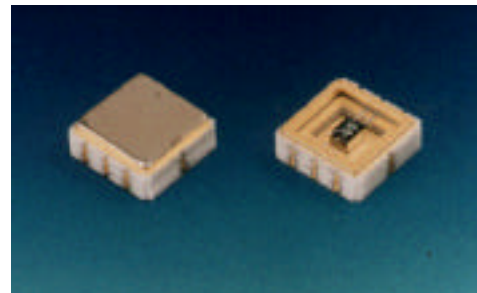
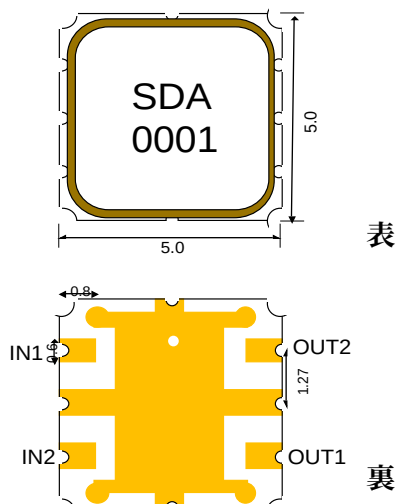
図5-1. タイミング抽出方法の模式説明図

SAWフィルタの設計としては、

- ・周波数 $2.48832\text{GHz} \pm 100\text{ppm}$
- ・Q値が 650 ± 30 (Q値は、 $f / \Delta f$ 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 $1.0\mu\text{m}$ の楕型電極で、チップサイズは $1.4 \times 1.1\text{mm}$ である。実装には $5 \times 5\text{mm}$ 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個設けグラウ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 $0 \sim 6\text{GHz}$ 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ウンドと、SAWフィルタのグラウ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、 $-40\sim 85^{\circ}\text{C}$ 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 $-0.04^{\circ}/\text{KHz}$ 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	$2488.32\text{MHz} \pm 100\text{ppm}$	$2488.32\text{MHz} \pm 100\text{ppm}$
挿入損失	6~7dB	12~16 dB
Q値	640~700	640~700
温度変動 ($-40\sim 85^{\circ}\text{C}$)	90ppm	195ppm
抑圧	20dBc (<3GHz) 20dBc (3~6GHz)	11dBc (<3GHz) 9dBc (3~6GHz)
位相傾斜	$-0.04^{\circ}/\text{KHz}$	$-0.07^{\circ}/\text{KHz}$
サイズ	48mm^3	$100\sim 150\text{mm}^3$

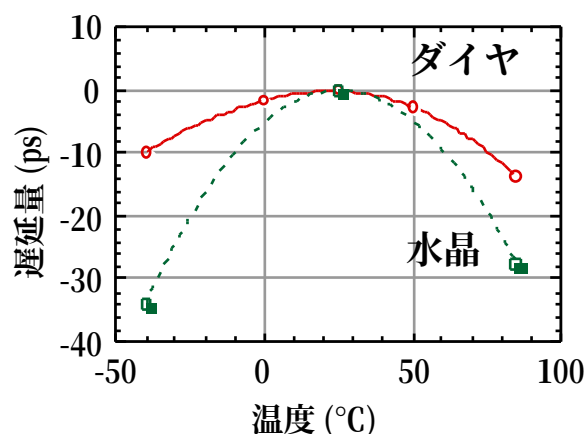


図5-4. SAWデバイスの遅延特性の比較

(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。

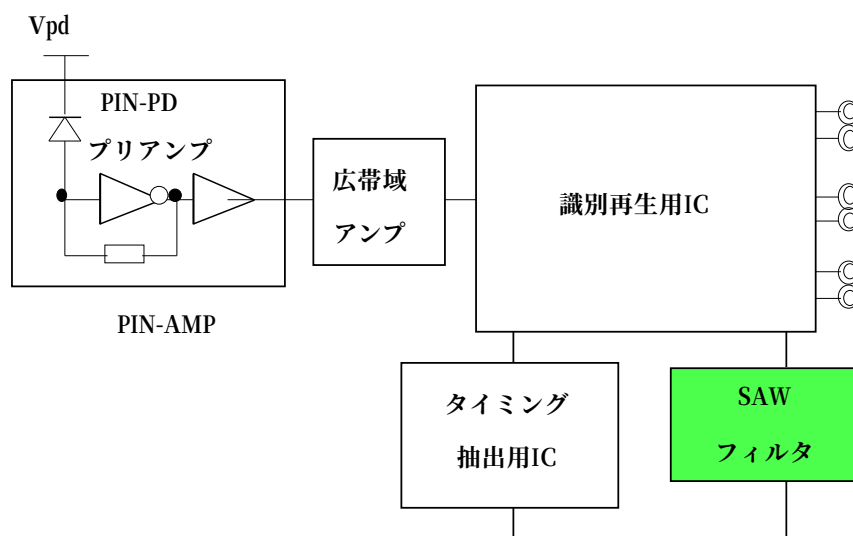


図5-5. 2.488Gbps受信モジュールの回路構成

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。

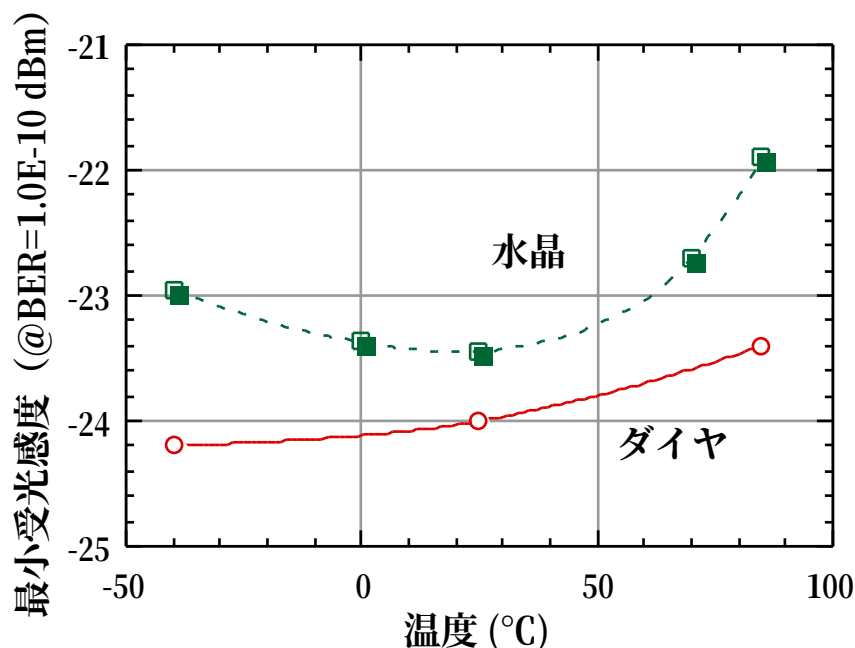


図5-7. 2.488Gbps光受信モジュールの最小受光感度の温度特性

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 $10^5 \sim 10^6$ 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。SiO₂/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 (Voltage 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S₂₁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。

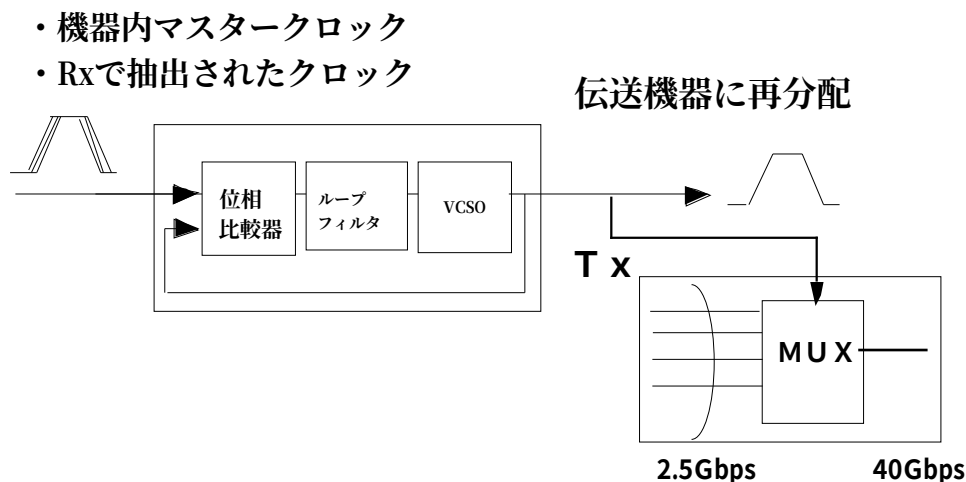


図5-12. ジッタフィルタの模式図

従来の低周波の通倍方式では

- a) 通倍による $20\log N$ の位相雑音増加
- b) 通倍によるジッタ成分の増加
- c) 通倍回路による大型化
- d) 通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に通倍数を増やした時の位相雑音の増加を示す。例えば8通倍で約18dB、12通倍で約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。

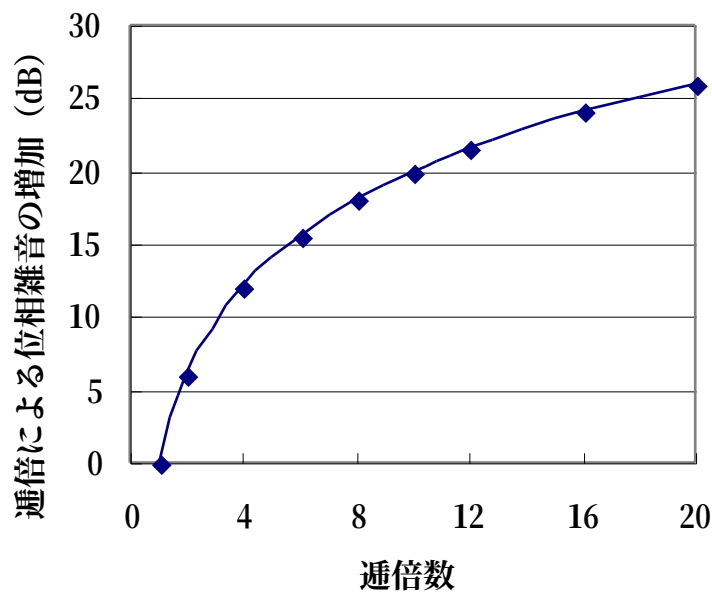


図 5-1 3. 発振器の通倍による位相雑音の増加

これらの用途の S A W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。SiO₂/IDT/ZnO/ダイヤモンド構造による S A W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 5-1 4 に、ダイヤモンド S A W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 $3\times 3\times 1.8\text{mm}$ 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 $10\times 10\times 3.8\text{mm}$ 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発振器の通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 $-40\sim 85^{\circ}\text{C}$ 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

SiO₂/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。

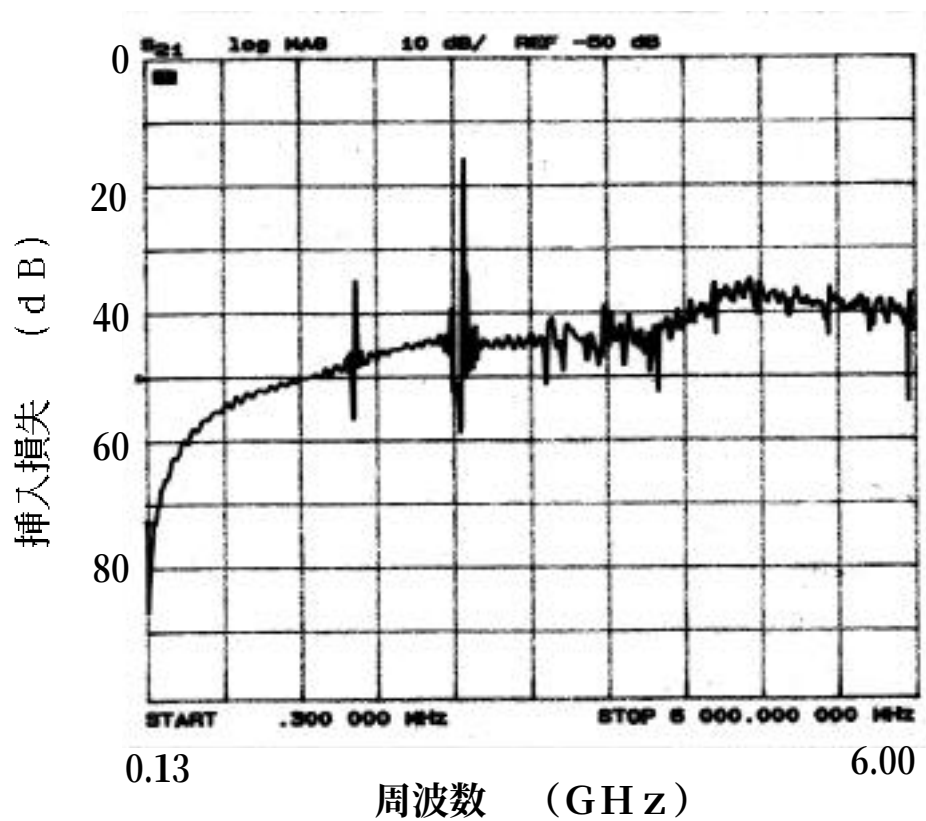
次に、無線通信用狭帯域フィルタへの適応例として、WCDMA基地局間通信用パイロット信号抽出フィルタを作製した。携帯機器の通信に用いる60MHz帯域での抑圧を確保し、耐電力性に優れるダイヤモンドSAWデバイスの特徴を十分に活かし、WCDMAの高電力投入に耐えるデバイスを作製した。

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逡倍による位相雑音及びジッタ成分の増加や、逡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。

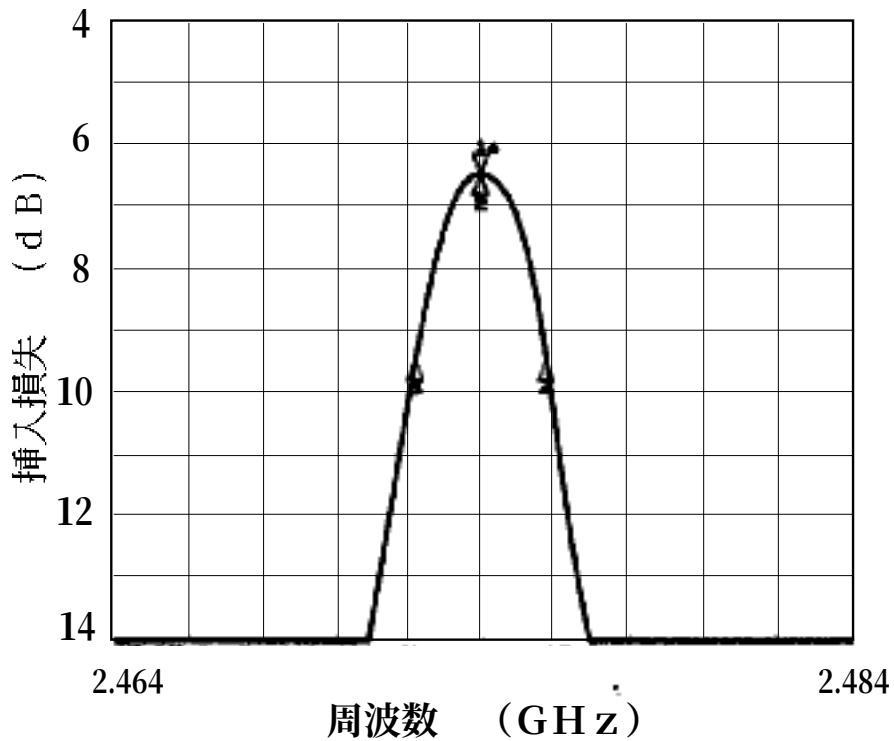
以上の成果は、いずれも通信システムの実機での採用に結び付く成果となり、これを元に量産するに至った。

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

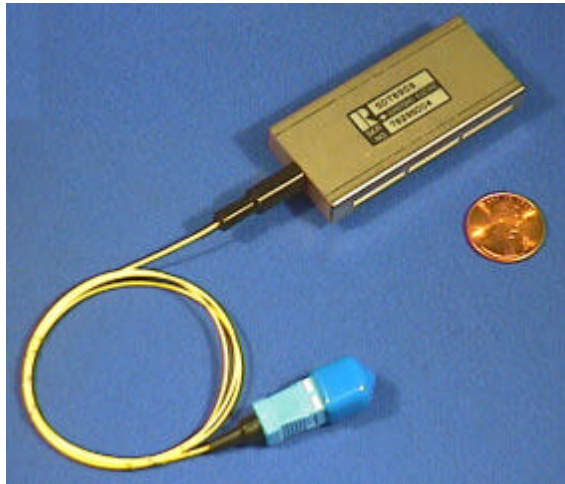
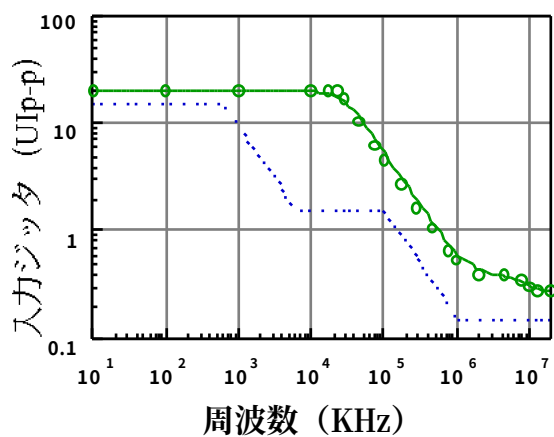
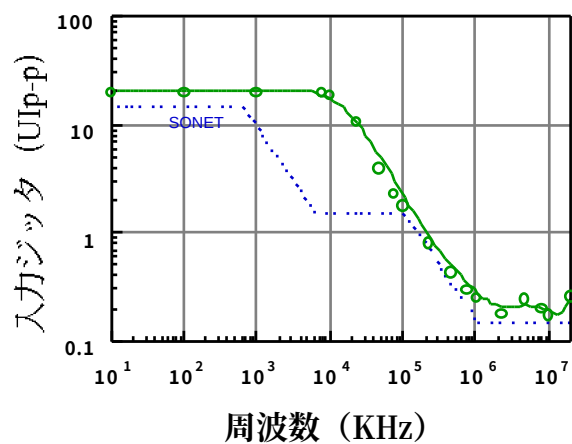


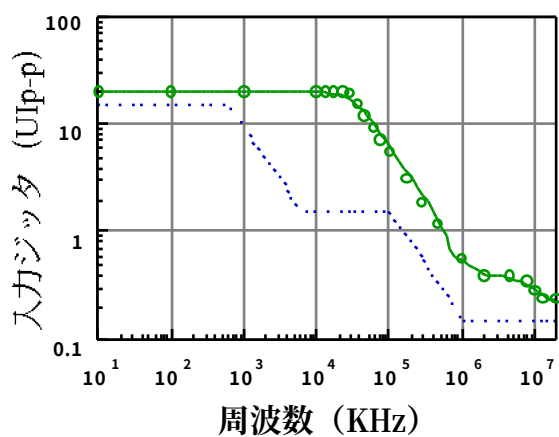
図 6-7. 光通信用受信モジュールの外観



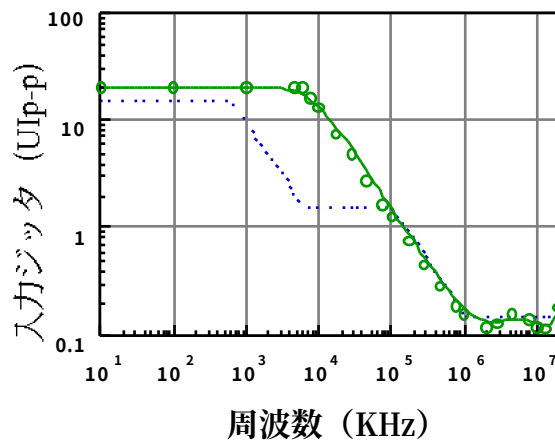
(a) ダイヤSAW (-40°C測定)



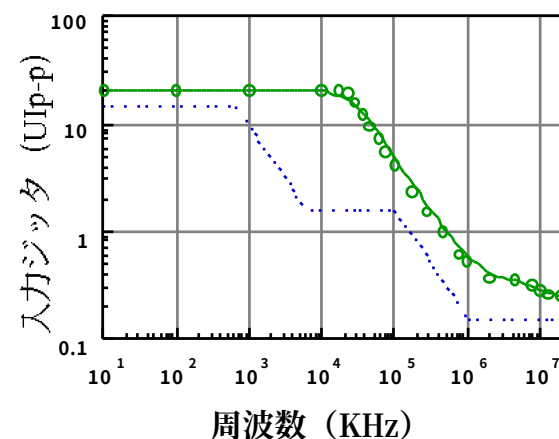
(b) 水晶SAW (-40°C測定)



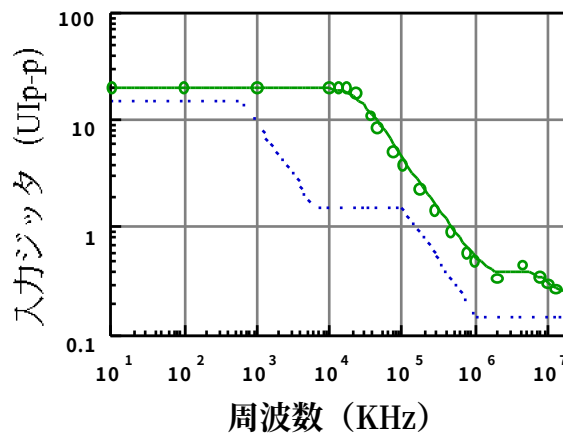
(c) ダイヤSAW (25°C測定)



(d) 水晶SAW (25°C測定)

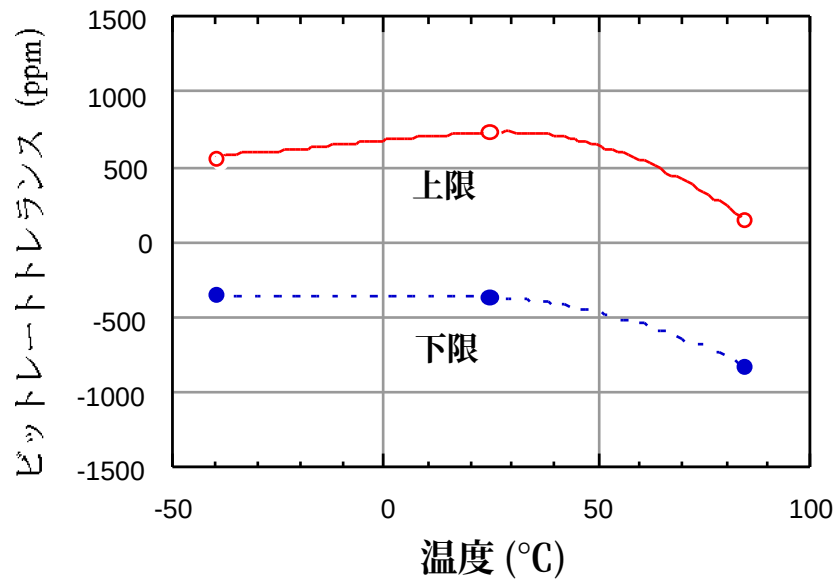


(e) ダイヤSAW (85°C測定)

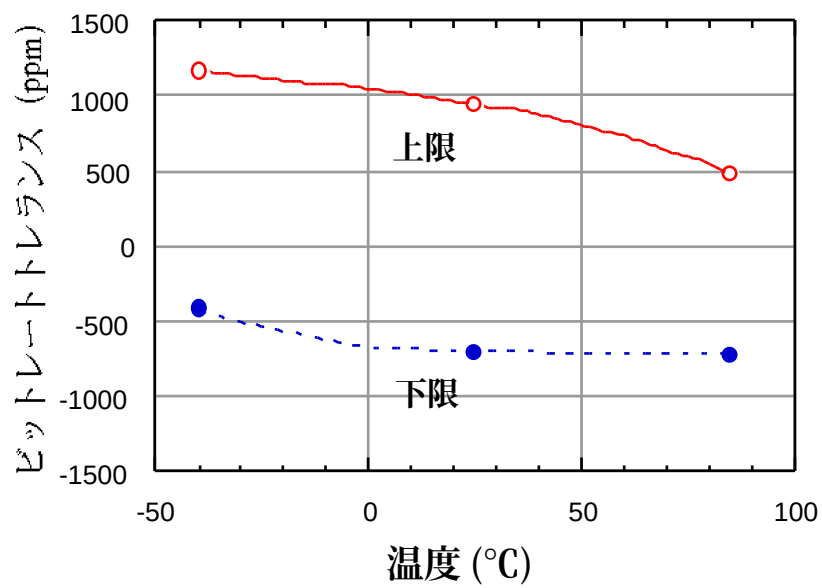


(f) 水晶SAW (-85°C測定)

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

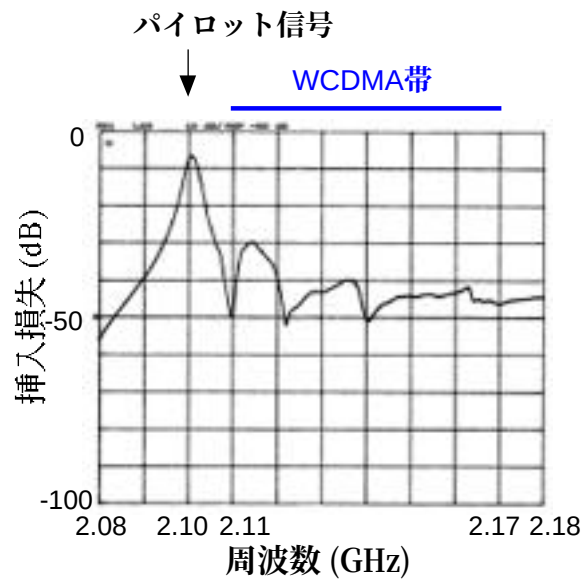


図5-10. WCDMA基地局用パイロット信号抽出フィルタのS21特性

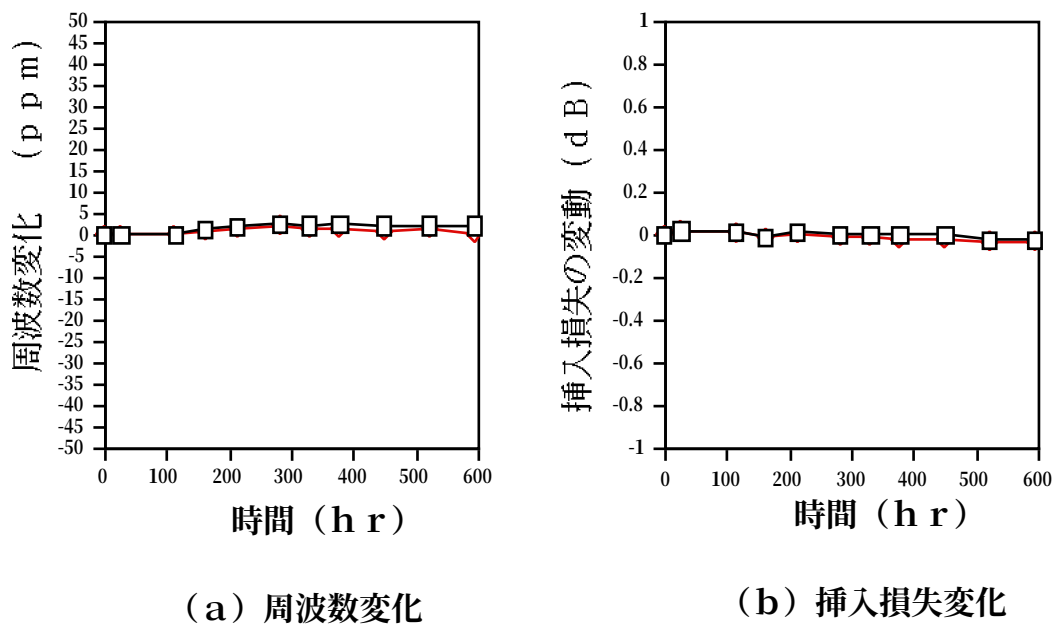
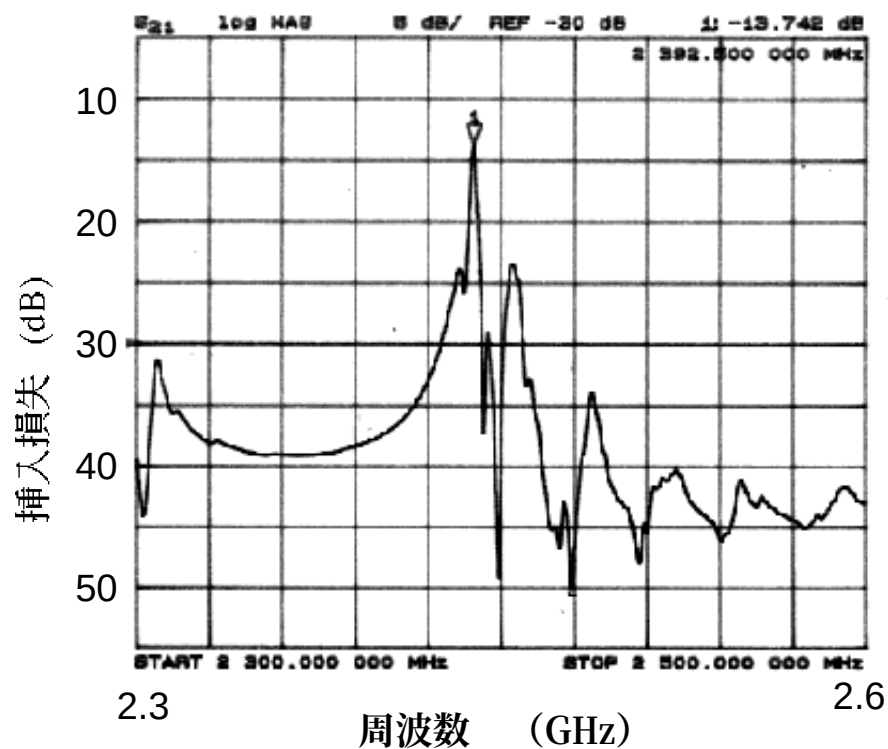
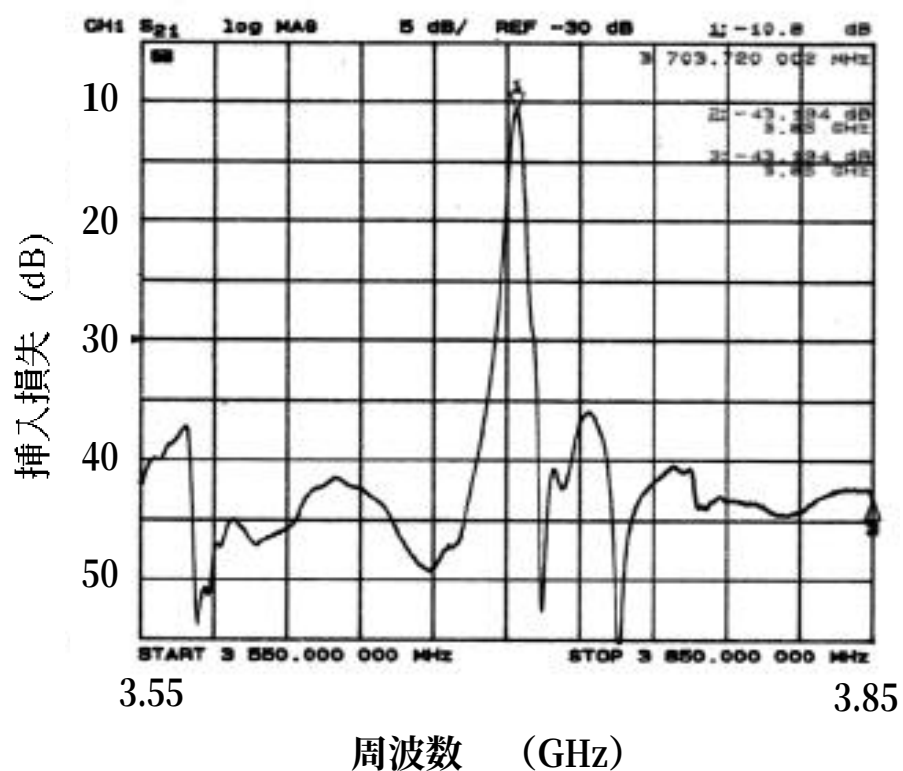


図5-11. WCDMA用フィルタの耐電力試験
(105℃ 12dBm連続発振 $f=2170\text{MHz}$)



(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

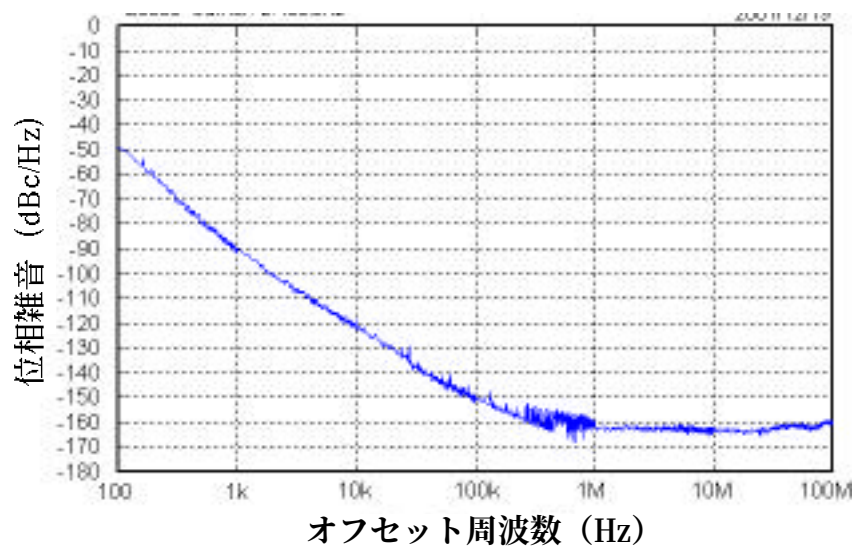


図5-15. ダイヤモンドSAW共振器を用いた直接発振VCSOの位相雑音特性 (2.488GHz)
(セイコーエプソン殿御提供)

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	f_0	2488.32	MHz
動作温度	T_c	-40 ~ 85	C
印加電流	I_{cc}	32	mA
印加電圧	V_{cc}	3	V
周波数調整域	f_{Δ}	-330 ~ 140	ppm
出力レベル	P_o	7	dBm
スプリアス抑圧	SP	-35	dBc
制御電圧	V_c	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法を層構造に適用し、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、LiTaO₃、LiNbO₃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

SiO₂／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

SiO₂／IDT／LiNbO₃／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を圧電薄膜としSiO₂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 $20\text{ }\mu\text{m}$ 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 $6\text{個}/\text{cm}^2$ 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、伝搬損失低減に取り組み、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 $0.02\text{dB}/\lambda$ 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SiO₂層を導入することと、BCl₃にCl₂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SiO₂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SiO₂の膜厚を実験的に最適化を行い、SiO₂／ZnO／ダイヤモンド系が $-0.017\text{ppm}/^\circ\text{C}^2$ の2次係数を有し、従来の水晶体の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ーが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SiO₂/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SiO₂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、SiO₂/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、SiO₂/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デバイスの特徴を十分に活かし、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通倍による位相雑音及びジッタ成分の増加や、通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SiO₂/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SiO₂/IDT/LiNbO₃/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>

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

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

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>

$\nabla \cdot \mathbf{D} = q$ で圧電体は絶縁体であり0とすると

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

$$E_i = -\frac{\partial \phi}{\partial x_i} \quad (A4)$$

<運動方程式>

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

<歪みと変位の関係>

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

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（A 3）の場合、

$$\frac{\partial D_1}{\partial x_1} + \frac{\partial D_2}{\partial x_2} + \frac{\partial D_3}{\partial x_3} = 0 \quad (\text{A } 7)$$

を意味する事になる。

式（A 1）から（A 6）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。

$$c_{ijkl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_i \partial x_l} + e_{kij} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_k \partial x_l} = r \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} \quad (\text{A } 8)$$

$$e_{ikl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_i \partial x_l} - \epsilon_{ik} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_i \partial x_k} = 0 \quad (\text{A } 9)$$

（2）境界条件

式（A 8）、及び（A 9）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。

$$u_i = 0 \quad (\text{基板下面での境界条件}) \quad (\text{A } 10)$$

$$T_{i3} = 0 \quad (\text{基板表面での境界条件}) \quad (\text{A } 11)$$

<電氣的境界条件（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。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_3^2} = 0 \quad (\text{基板表面での境界条件}) \quad (\text{A } 12)$$

<電氣的境界条件（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。

$$\phi = 0 \quad (\text{基板表面での境界条件}) \quad (\text{A } 13)$$

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＞

$$u_i^{\text{dia}} = u_i^{\text{ZnO}}, \quad T_{i3}^{\text{dia}} = T_{i3}^{\text{ZnO}}, \quad D_i^{\text{dia}} = D_i^{\text{ZnO}}, \quad \phi^{\text{dia}} = \phi^{\text{ZnO}} \quad (\text{A } 14)$$

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

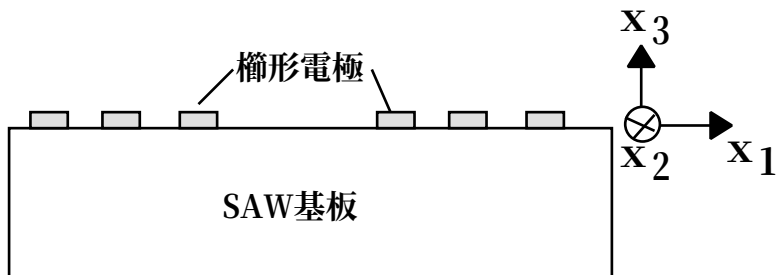
(3) CAMPBELL&JONES法

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。

$$u_i = A_i \exp(jkx_3) \exp[jk(vt - x_1)] \quad (\text{A } 15)$$

$$f = A_4 \exp(jkx_3) \exp[jk(vt - x_1)] \quad (\text{A } 16)$$

伝搬方向は図2-1の様に、x1方向、深さ方向はx3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、x2方向の偏微分は零とする。



図A1. 座標系

式 (A 15)、及び、(A 16) を (A 8)、及び (A 9) に代入すると次の様な特性方程式が得られる。

$$\begin{bmatrix} G_{11}-r v^2 & G_{12} & G_{13} & G_{14} \\ G_{12} & G_{22}-r v^2 & G_{23} & G_{24} \\ G_{13} & G_{23} & G_{33}-r v^2 & G_{34} \\ G_{14} & G_{24} & G_{34} & G_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{bmatrix} = 0 \quad (\text{A } 17)$$

ここで

$$G_{11} = c_{55} b^2 + 2c_{15} b + c_{11} \quad (\text{A } 18 \text{ a})$$

$$G_{22} = c_{44} b^2 + 2c_{46} b + c_{66} \quad (\text{A } 18 \text{ b})$$

$$G_{33} = c_{33} b^2 + 2c_{35} b + c_{55} \quad (\text{A } 18 \text{ c})$$

$$G_{12} = c_{45} b^2 + (c_{14} + c_{56}) b + c_{16} \quad (\text{A } 18 \text{ d})$$

$$G_{13} = c_{35} b^2 + (c_{13} + c_{55}) b + c_{15} \quad (\text{A } 18 \text{ e})$$

$$G_{23} = c_{34} b^2 + (c_{36} + c_{45}) b + c_{56} \quad (\text{A } 18 \text{ f})$$

$$G_{14} = e_{35} b^2 + (e_{15} + e_{31}) b + e_{11} \quad (\text{A } 18 \text{ g})$$

$$G_{24} = e_{34} b^2 + (e_{14} + e_{36}) b + e_{16} \quad (\text{A } 18 \text{ h})$$

$$G_{34} = e_{33} b^2 + (e_{13} + e_{35}) b + e_{15} \quad (\text{A } 18 \text{ i})$$

$$G_{44} = -(e_{33} b^2 + 2e_{13} b + e_{11}) \quad (\text{A } 18 \text{ j})$$

式 (A 17) でAが0以外の解を持つ為には、

$$\det(G_{ij} - d_{ij} r v^2) = 0 \quad (i,j=1\sim 4) \quad (\text{A } 19)$$

でなければならない。ここで、 δ_{ij} は

$$d_{ij} = 1 \quad (i=j, i \neq 4)$$

$$\delta_{ij} = 0 \quad (\text{それ以外}) \quad (\text{A } 20)$$

式 (A 17) でb及びVは未知数である。Vとしてある値を仮定し、式 (A 19) を満足する条件は、式 (A 18)、及び (A 19) 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。

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

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

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、LiTaO₃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、 $\text{real}(b) > 0$ 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、

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

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

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。

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

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、

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

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る、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とると、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。

$$u_i^{\text{Dia}} = A_i^{\text{Dia}} \exp(jkb^{\text{Dia}} x_3) \exp[jk(vt-x_1)] \quad (A27)$$

$$\Phi_i^{\text{Dia}} = A_i^{\text{Dia}} \exp(jk b_{\text{Dia}} x_3) \exp(jk(vt-x_1)) \quad (\text{A } 28)$$

$$u_i^{\text{ZnO}} = A_i^{\text{ZnO}} \exp(jk b_{\text{ZnO}} x_3) \exp(jk(vt-x_1)) \quad (\text{A } 29)$$

$$\Phi_i^{\text{ZnO}} = A_i^{\text{ZnO}} \exp(jk b_{\text{ZnO}} x_3) \exp(jk(vt-x_1)) \quad (\text{A } 30)$$

但し、 A_m^{Dia} 、 A_m^{ZnO} ($m=1\sim 4$)は定数である。式 (A 27)、(A 28) を式 (A 8)、(A 9) に代入すると、未知数 b_{Dia} に対し式 (A 19) 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 (A 29)、(A 30) を式 (A 8)、(A 9) 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 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それぞれ次式の様に表わされる。

$$u_i^{\text{Dia}} = \sum_{n=1}^8 C_n^{\text{Dia}} A_i^{\text{Dia}(n)} \exp(jk b_{\text{Dia}}^{(n)} x_3) \exp(jk(vt-x_1)) \quad (\text{A } 31)$$

$$\Phi_i^{\text{Dia}} = \sum_{n=1}^8 C_n^{\text{Dia}} A_4^{\text{Dia}(n)} \exp(jk b_{\text{Dia}}^{(n)} x_3) \exp(jk(vt-x_1)) \quad (\text{A } 32)$$

$$u_i^{\text{ZnO}} = \sum_{n=1}^8 C_n^{\text{ZnO}} A_i^{\text{ZnO}(n)} \exp(jk b_{\text{ZnO}}^{(n)} x_3) \exp(jk(vt-x_1)) \quad (\text{A } 33)$$

$$\Phi_i^{\text{ZnO}} = \sum_{n=1}^8 C_n^{\text{ZnO}} A_4^{\text{ZnO}(n)} \exp(jk b_{\text{ZnO}}^{(n)} x_3) \exp(jk(vt-x_1)) \quad (\text{A } 34)$$

ダイヤモンド層はバルク基板を仮定するため、 x_3 が $-\infty$ 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、(A 31)、(A 32) は、

$$u_i^{\text{Dia}} = \sum_{n=1}^4 C_n^{\text{Dia}} A_i^{\text{Dia}(n)} \exp(jk b_{\text{Dia}}^{(n)} x_3) \exp(jk(vt-x_1)) \quad (\text{A } 35)$$

$$\Phi_i^{\text{Dia}} = \sum_{n=1}^4 C_n^{\text{Dia}} A_4^{\text{Dia}(n)} \exp(jk b_{\text{Dia}}^{(n)} x_3) \exp(jk(vt-x_1)) \quad (\text{A } 36)$$

の様に現すことが出来る。

式 (A 33)、(A 34)、(A 35) 及び (A 36) 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。

$$[G] [C] = 0 \quad (A 3 7)$$

ここで、 $[G]$ は 12×12 のマトリクスであり、 $[C]$ は

$$[C] = [C_1^{Dia}, C_2^{Dia}, C_3^{Dia}, C_4^{Dia}, C_1^{ZnO}, C_2^{ZnO}, C_3^{ZnO}, C_4^{ZnO}, C_5^{ZnO}, C_6^{ZnO}, C_7^{ZnO}, C_8^{ZnO}]^t \quad (A 3 8)$$

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、

$$\det(G) = 0 \quad (A 3 9)$$

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、

$$\begin{aligned} K^2 &= (C_0 - C_s) / C_0 \\ &= \{ (V_0)^2 - (V_s)^2 \} / (V_0)^2 \\ &= 2 * (V_0 - V_s) / V_0 \end{aligned} \quad (A 4 0)$$

ここで、

- C_0 : 表面が電氣的にオープンの際のスティフネス
- C_s : 表面が電氣的にショートしている際のスティフネス
- V_0 : 表面が電氣的にオープンの際の弾性波速度
- V_s : 表面電氣的にショートしている際の弾性波速度

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 T C D (Temperature Coefficient of Delay)

b) 周波数温度係数 T C F (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 T C V (Temperature Coefficient of Velocity) は位相速度の温度係数につき (2-4 1) で表される。

$$TCV = \frac{\partial V}{\partial T} \quad (A 4 1)$$

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、T C Vを用いて、遅延時間の係数として (2-4 2) を求める。

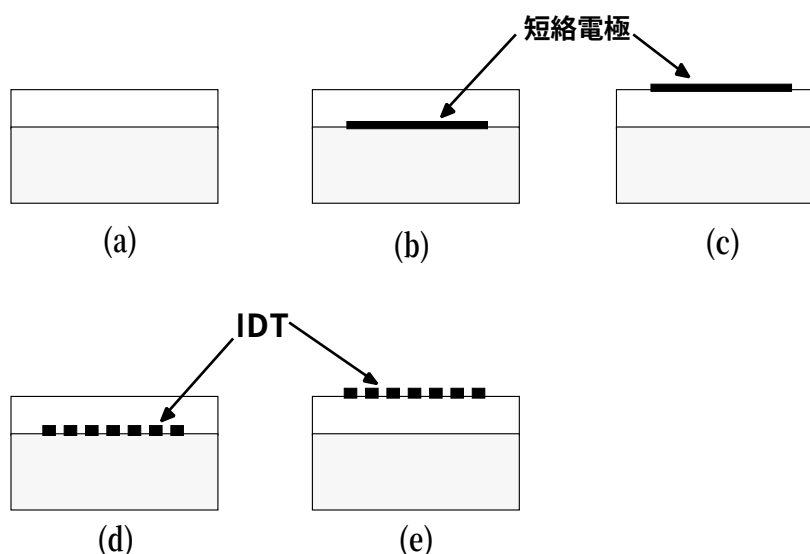
$$TCD = \frac{1}{\tau} \frac{\partial \tau}{\partial T} = \frac{1}{l} \frac{\partial l}{\partial T} - \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial T} = \alpha - \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial T} \quad (A 4 2)$$

ここで τ は遅延時間、 α は材料の熱膨張係数である。

なお、T C D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。

$$TCF = - TCD \quad (A 4 3)$$

実際の計算での数値は、 δT を $T_{30^{\circ}\text{C}} - T_{20^{\circ}\text{C}}$ として、求めた。



図A 2. 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. Kajiwarara 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 SiO₂/IDT/ZnO/Diamond Structure and Fabrication of 2.5 GHz narrow 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 Polycrystalline 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 Parameters 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 Characteristics of SiO₂/c-axis Oriented LiNbO₃ 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 LiNbO₃ 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 KNbO₃ 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 SiO₂/ZnO/diamond Structure,"
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 SiO₂/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 SiO₂/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 Surface Acoustic 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 SiO₂/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 SiO₂/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1.5GHz SAW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, 桧垣, 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, 桧垣, 藤井, 八郷, 鹿田, 藤森,
 "SiO₂/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)/ダイヤモンド/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 光通信用ダイヤモンド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/ダイヤモンド系による薄膜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/ダイヤモンド構造による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10GHz SAW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 Wave 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	ダイヤモンドのエッチング方法
16) 富川、鹿田	1992.7.31	H06049669	ダイヤモンドのエッチング方法
17) 中幡、八郷、中幡、八郷、藤森	1992.9.2	H05199065	表面弾性波素子
18) 鹿田、八郷、中幡、八郷、藤森	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、八郷、鹿田	1993.9.7	H06164294	表面弾性波素子
24) 藤井、八郷、八郷、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)桧垣、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)桧垣、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)桧垣、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)桧垣、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)桧垣、豊田、 上村、藤井、 中幡、鹿田
1998.6.29 2000-021819 ダイヤモンドウエハのチップ化方法
- 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ン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松垣賢次郎氏、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。