

総合報告 2

3.2.4.4

ZnO 圧電膜とその応用

中 鉢 憲 賢

東北大学電気通信研究所 〒980 仙台市片平 2-1-1

(1977年4月28日 受理)

ZnO Piezoelectric Film and Its Applications

Noriyoshi CHUBACHI

Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University,
Katahira 2-1-1, Sendai 980

(Received April 28, 1977)

ZnO piezoelectric films have been applied to ultrasonic devices for bulk acoustic waves as well as surface acoustic waves in VHF and UHF ranges, because ZnO has a low dielectric constant and a large electromechanical coupling factor among nonferroelectric crystals.

In this paper, the present status of fabrication techniques of ZnO piezoelectric films, especially sputtering techniques, is described. The dc diode sputtering system with side-positioned substrate developed in our country is compared with the conventional RF sputtering system with parallel-positioned substrate for obtaining well oriented ZnO films. Applications of the ZnO piezoelectric films to various ultrasonic devices such as ultrasonic transducers, composite resonators, concave transducers, SAW filters, SAW amplifiers, SAW convolvers, image scanners, SAW memories and surface acousto-optic devices are described. Among the devices, ZnO film SAW filters are expected to be employed in commercial TV sets in very near future.

1. ま え が き

ZnO 圧電膜は、超高周波超音波を発生、検出するトランスジューサ用の材料としてとり上げられたもので、研究が開始されてからすでに十年以上になる。ZnO 圧電膜を用いたバルク超音波用のトランスジューサは、VHF・UHF 帯で変換能率がよくしかも広帯域特性を有するので、音波物性の研究などの基礎研究^{1,2)}の分野から、超音波遅延線³⁾や音響光学素子⁴⁾などの通信や情報処理の分野、さらに最近注目されている超音波顕微鏡^{5,6)}への応用に至るまで広く用いられている。いっぽう、近年急速に研究の進展をみせている弾性表面波デバイス^{7,8)}において、ZnO 圧電膜はさっそく、非圧電基板に対して弾性表面波を励振、検出するトランスジューサ用の材料として重要な役割を果たしている。とくに ZnO 圧電膜を使った VHF 帯の弾性表面波フィルタはすでに実

用の域に達しており、また種々の弾性表面波アクティブ素子へ ZnO 圧電膜を適用することにより、素子のモノリシック化が進められている。

本稿では ZnO 圧電膜の研究の流れと応用に関する最近の動向について、工学的な立場から総合的に解説する。まず、研究の経過を述べたあとで ZnO 圧電膜の作成について、現在、技術的に一応の確立をみたと考えられるスパッタ法を主にとり上げて、作成条件と膜の圧電性について述べる。つぎに応用として、バルク超音波デバイスへの興味深い素子を二、三紹介したあと、最近注目されている弾性表面波デバイスへの応用について、とくに ZnO 圧電膜が素子にどのように適用されているのか、素子の構成に着目して説明する。

2. ZnO 圧電膜の研究経過

ZnO は化粧品用白粉の原料として、また化学の分野で

は触媒として古くから知られている材料である。ZnOの作成方法やその性質については、1959年のHeilandらの文献⁹⁾にも詳しく記されているように、永年にわたる多くの研究が重ねられてきた。白色で高純度の粉末が安く供給できるので、近年の電子写真用材料に大量に使用されるなど、有望な電子材料として産業界にも受け入れられていた。しかし、このようなZnOについて、その圧電性が注目されるようになったのは1960年以降のことである¹⁰⁾。とくに1961年にCdSによる超音波増幅の実験が発表されて¹¹⁾、ZnOはCdSとならんで最も有望な超音波増幅用圧電半導体として脚光を浴びるようになった^{12,13)}。その後超音波増幅の応用に關連して、多くの研究者が超高周波帯における新しいデバイスとして、小形の超高周波超音波デバイスの開発研究にとり組むようになった。ところで超高周波超音波デバイスの性能を向上させるためには、どうしてもVHF, UHF帯で広帯域かつ電気音響変換能率のよい超音波トランスジューサの開発が必要となった¹⁴⁾。そのようなニードに応じて、ZnOの「低い誘電率で高い電気機械結合係数」¹⁵⁾というキャッチフレーズは、超高周波帯で広帯域にわたる電気回路との整合を容易にすることを意味するので、さっそくZnOがトランスジューサ用材料としてとり上げられた(材料定数を付録に示す)。まず、ZnO単結晶を用いた拡散層トランスジューサが開発され^{16,17)}、超音波遅延線に應用された。しかし、超音波を任意の媒質に放射したり検出したりすることの可能な薄膜トランスジューサが出現し¹⁸⁾、ただちにZnO圧電膜の作成方法の確立とそのトランスジューサへの應用をめざして数多くの研究がなされるようになった¹⁹⁻³⁶⁾。それまで超音波薄膜トランスジューサとしてCdS圧電膜がとり上げられており、わが国でも熱心に研究されていた^{37,38)}。しかし、ZnOはCdSより電気機械結合係数が大で誘電率が小という特長のほかに音速が速いので、ZnO圧電膜が開発されてからは、数十MHz~数GHzの超高周波領域で電気音響変換能率のよい広帯域特性の超音波トランスジューサ用材料として、ZnO圧電膜がCdS圧電膜に代わって、現在もっぱら使用されている。

ZnO圧電膜はこのようにバルク波用のトランスジューサを対象にして開発され、その実用性も高く評価されていたが、近年弾性表面波デバイスにも應用されるようになった。まず、1971年に弾性表面波トランスジューサ用にとり上げられたが³⁹⁾、その後内外の多くの研究者によって種々の弾性表面波デバイスへの應用をめざして活発な研究がなされている。

3. ZnO 圧電膜の作成

ZnO膜の作成技術については上述のように、超高周波帯における超音波トランスジューサの開発の一貫としてとり上げられたので、主として圧電性の優れた膜を得るための努力が熱心につづけられてきた。

ZnO膜の作成方法を大別すると、

- (I) Zn薄膜あるいはZnSeなどの化合物薄膜を酸化する方法^{40,41)}
- (II) Znを酸素雰囲気中で蒸着あるいはスパッタする方法^{23,42,43)}
- (III) ZnOをターゲットとし直流または高周波によりスパッタする方法^{20,28)}
- (IV) ZnOの化学気相輸送法(chemical vapor transport または chemical vapor deposition)^{25,44-47)}

などを挙げることができる。しかし、得られる膜の圧電性とその應用面からみると、現在のところ(III)の方法が技術的に最も進んでいる。最近ではスパッタ装置の電極構成の改良まで試みられるようになった。

スパッタ法には直流スパッタ法とRFスパッタ法があるが、いずれにしても作成されたZnO膜は一般に微結晶体の集まりである。ZnO結晶はc軸のまわりに等方性であるので、膜が圧電性を示すためには、微結晶膜の作成にあたっては、(イ)膜を構成する微結晶のc軸配向がそろっていること、(ロ)所望の励振モードが得られるように微結晶のc軸方向が制御できること、(ハ)膜の比抵抗を十分高くし、使用する周波数に対して膜の誘電体緩和周波数を十分低くなるようにすることなどに着目して研究が進められてきた。以下直流スパッタ法とRFスパッタ法に分けて、ZnO圧電膜の作成方法を説明する。

3.1 直流スパッタ法

直流スパッタ法では二極スパッタ法と三極スパッタ法(プラズマスパッタ法)が用いられている。二極スパッタ法については最初、Zn金属を酸素中あるいは酸素とアルゴンの混合気体中でスパッタしてZnO膜を得るという方法が1965年Wanugaら¹⁹⁾によって、つづいてはMickelsen⁴²⁾らによって報告されている。この方法はその後Raimondiら²⁸⁾、あるいはWagersら⁴³⁾によってとり上げられ、さらにわが国でも最近、改良した装置により久間ら⁴⁹⁾が詳細な研究を行なっている。しかし現在では、圧電性の優れた膜を再現性よく容易に作成できるということで、ターゲットにZnO結晶あるいは焼結体を用いてスパッタする方法が、ZnO圧電膜作成の主流となっている。三極スパッタ法については、1969年Bell研究所のFoster²⁷⁾が初めて報告しているが、同年に筆者がMotorola社を訪問したらHickernellも三極スパッタ法をとり上げており、良好な圧電膜を作成していた^{50,51)}。その他Hillmanらの報告もある^{52,53)}。

Deposition Rate 0.75 $\mu\text{m/hr}$

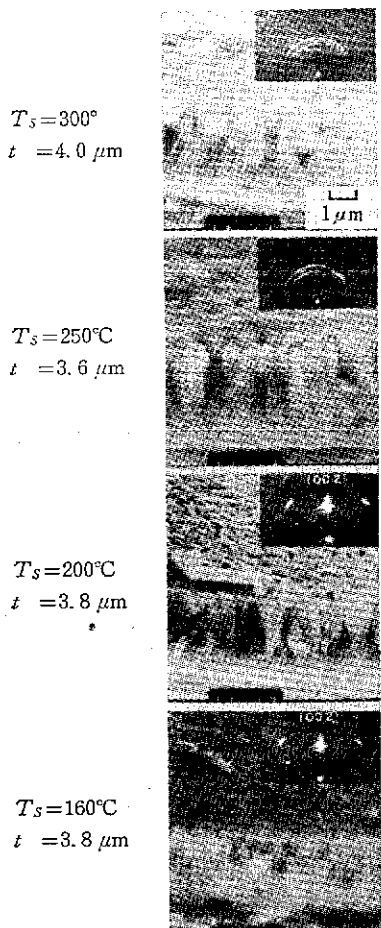


Fig. 3 基板温度による ZnO スパッタ膜の構造の変化.

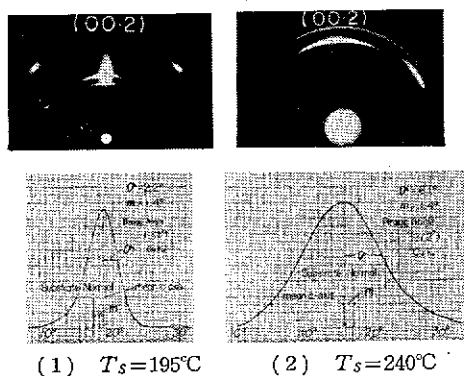


Fig. 4 回折パターンとロックンクカーブとの対比およびガウス分布近似の説明.

から、この分布がガウス分布で近似することができることがわかったので、*c*軸分布と膜の圧電性との関係を定量的に解析することを考えて、ZnO 膜の *c* 軸配向を平

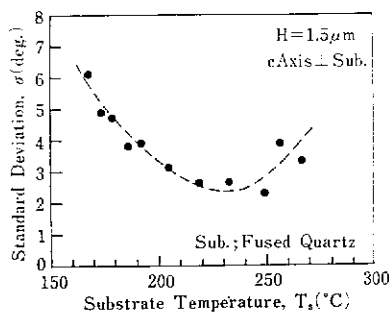


Fig. 5 *c* 軸分布の基板温度依存性.

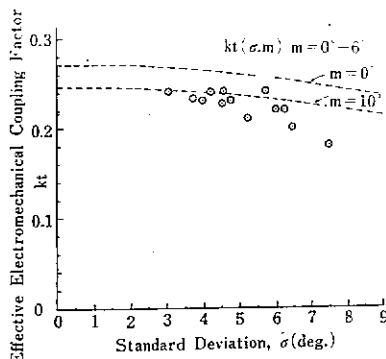


Fig. 6 電気機械結合係数の σ による変化.

均的な *c* 軸傾斜方向 *m* と標準偏差 σ とで表現することを提唱している⁶⁶⁾. Fig. 5 は膜の σ が基板温度によってどのように変化するかを示したもので、この析出速度においては T_s が 200°C 近傍で最適で、 $\sigma < 3^\circ$ を得る.

膜の構造が圧電性に及ぼす影響は複雑であるが、膜を構成する微結晶の *c* 軸配向が比較的そろっている膜については定量的な検討が試みられている. 筆者らは膜の *c* 軸配向の広がりによる圧電性の変化について、理論解析および実験的検討を行ない、 $\sigma \leq 6^\circ$ であれば *c* 軸配向の分散による圧電性の低下はそれほど大きくないことを確かめている. Fig. 6 は ZnO 膜の *c* 軸に平行な電界で *c* 軸方向に変位を生じる場合に対する電気機械結合係数 k_t の σ に対する依存性を示すものである⁶⁵⁾.

圧電的に良好な膜を得るためのスパッタ条件の一例として、基板にガラスあるいは熔融水晶を用いる場合について、Table 1 に示しておく. なお、雰囲気ガスは酸素で、得られる膜の比抵抗は $10^6 \sim 10^8 \Omega \text{cm}$ である.

3.2 RF スパッタ法

RF スパッタ法は絶縁物の薄膜化に適しており、その点、ターゲットとして高抵抗の ZnO 焼結体を使用できるので、比抵抗の高い ZnO 膜の析出が期待される. RF スパッタ装置として通常平行平板電極形の二極スパッタ法が使用され、動作ガス圧は $10^{-3} \sim 10^{-2}$ Torr である.

Table 1 直流二極スパッタ法における ZnO 膜の作成条件 (基板位置形).

基板温度	150~230°C
雰囲気	酸素 5~8×10 ⁻² Torr
直流印加電圧	1.8~2.2 kV
電流密度	1.7~2.3 mA/cm ²
付着速度	80~200 Å/min
ターゲットの比抵抗	10 ³ Ω cm 以下

(得られる膜の比抵抗は ~10⁸ Ω cm)

上述の直流スパッタ法より 1 桁程度ガス圧が低い。スパッタの原理は文献 (67) を参照していただきたい。RF 電界が電極間に印加されると、絶縁物が置いてある電極の表面に直流の負バイアス電圧が誘起され、この負バイアスによってターゲットが陽イオンにたたかれて ZnO がスパッタされる。RF スパッタによる ZnO 膜の作成は Raimondi ら²⁸⁾の報告が最初で、その後多くの研究者が RF スパッタ法をとり上げているが^(29,36,54,55,68-74)、スパッタ条件と得られた ZnO 膜の性質との関係に対するデータは、報告者によってかなり異なる。そこで筆者らも数年前から基礎的な実験を行なってきたが⁽⁷⁵⁾、最近、Kino ら⁷⁴⁾によって発表された論文は、筆者らの装置で得られたデータにかなり近いものである。そこでまず筆者らの研究について要点を紹介し、Kino らのデータと比較してみる。

使用している装置は小型の真空蒸着装置を改造したもので、スパッタ槽は 300 mmφ のガラスのベルジャーである。Fig. 7 は RF 二極スパッタ装置内の電極構成および基板の配置を示すものである。雰囲気ガスとして、酸素あるいはアルゴンと酸素の混合ガスを用いる。ターゲットには 70 mmφ の焼結体を用いる。RF 電源は 13.56 MHz の小出力発振器 (約 400 W) である。ヘルムホルツコイルはスパッタ速度を上げるための磁界用で、ここでは、80 ガウスにしている。また基板の温度は基板背面から通常のヒータにより加熱して 160°~520°C の範囲で変化させることができる。

RF スパッタ法においても ZnO 膜の結晶軸配向とその分布は、種々のスパッタ条件によって変化する。まず、c 軸配向の分布の基板温度依存性について述べる。実験では、基板にアモルファスな材料として、パイレックスガラスを用いた。Fig. 8 はアルゴン雰囲気において、電極間隔 d を 25 mm、直流バイアス V_{dc} を 800 V、ガス圧 $P_g=1.5 \times 10^{-2}$ Torr とし、基板温度 T_s を変えて、析出された ZnO 膜の c 軸配向の分布について Fig. 5 と同様に σ に着目して示したものである。 T_s

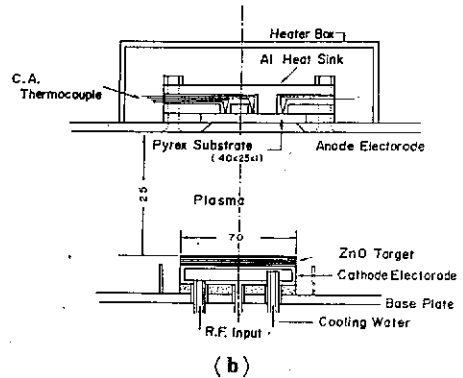
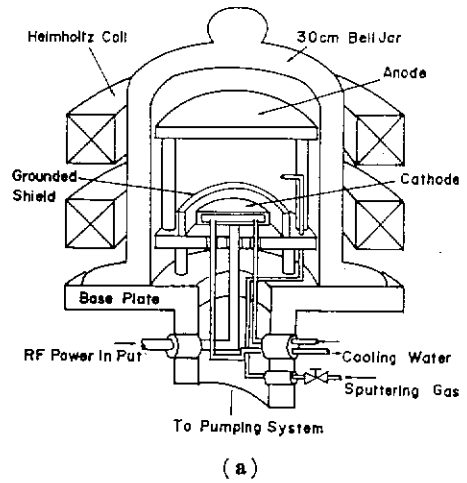


Fig. 7 RF スパッタ装置の構成。

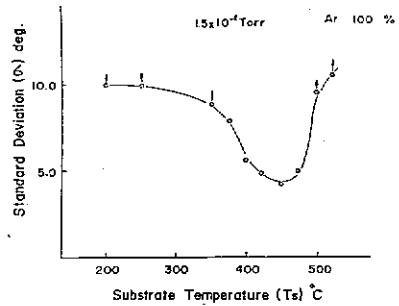


Fig. 8 c 軸分布の基板温度依存性。

(Ar 100%, $V_{dc}=800$ V, $d=25$ mm, 基板: パイレックスガラス)

=420°C で $\sigma=3.5^\circ$ となっている。なおこの条件で析出速度は約 100 Å/min である。

ZnO の RF スパッタ法についても、スパッタ条件の最適値を見いだすために、この c 軸配向の標準偏差 σ に着目して定量的に表示することは有効な手段である。

Kino らは T_s を 200°~300°C まで変化させて得られた ZnO 膜について電子線回折により結晶性を調べてい

Table 2 RF スパッタ法による ZnO 膜の基板温度依存性 (文献74)より).

基板温度 T_s (°C)	200	225	250	275	300	350
付着速度 (Å/min)	120	130	130	100	120	90
Au 膜	Good	Excellent	Good	Good	Bad	Bad
SiO ₂ 層/Si	Bad	Good	Excellent	Good	Bad	Bad
サファイア	Bad	Bad	Bad	Bad	Bad	Good
溶融石英	Bad	Bad	Bad	Bad	Bad	Good

るが、彼らは圧電膜の結晶性を、“bad”, “good”, “excellent” という定性的な用語で表現している。Table 2 は彼らの結果で⁷⁴⁾、雰囲気ガスはアルゴンと酸素の比が、80 : 20 の混合ガスである。下地となる基板材料によって良好な c 軸配向の得られる基板温度が異なっている。筆者らは、このデータについて検討を行なうため同じスパッタ条件、すなわち、アルゴンと酸素の混合比 80 : 20, $P_s = 5 \times 10^{-3}$ Torr, 析出速度 100~130 Å/min とし基板にパイレックスガラスを用いて実験を行なった⁷⁶⁾。その結果を Fig. 9 に示す。彼らの溶融水晶基板の場合と傾向がよく合っている。 $T_s = 350^\circ\text{C}$ では $\sigma \approx 8^\circ$ で、これが彼らのいった “good” とすれば、彼らは実験していないが、さらに T_s を 500°C まで上昇させると $\sigma \approx 4^\circ$ となり “excellent” になる。なお下地によく配向した (111) 面の金の膜を形成させれば、225°C という低い温度で excellent の膜が得られることは、後で述べる弾性表面波トランスジューサの構成を決定するにあたって一つの留意すべき点であろう。

最近、和佐らは⁷⁷⁾、RF 二極スパッタ装置において基板位置によって得られる ZnO 膜の結晶軸配向の変化を調べ、筆者らの直流スパッタ法の場合と類似の効果のあることを見いだしている。すなわち、基板が陽極の中央から遠ざかると c 軸配向がそろってくることを確かめている。この考えはすでに川端らが ZnO 膜の作成に適用

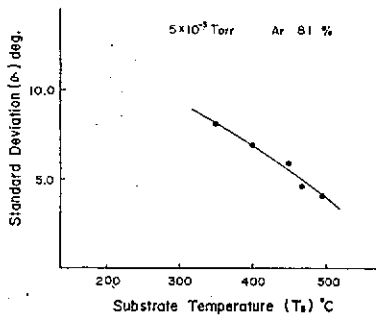


Fig. 9 c 軸分布の基板温度依存性.

(Ar : O₂ = 80 : 20, $V_{dc} = 800$ V, $d = 25$ mm, 基板: パイレックスガラス)

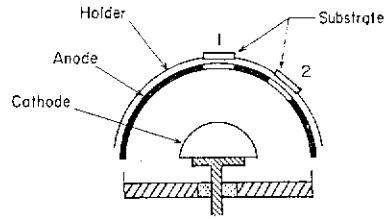


Fig. 10 半球状電極構成のスパッタ装置⁷⁵⁾.

している⁷⁸⁾。

最近、RF スパッタ装置に興味ある構成が貴地らによって発表された⁷⁹⁾。電極構成は Fig. 10 に示すようなもので、同心半球状電極構成にしている。この場合には基板をどこにおいても c 軸配向のそろった膜が得られる。なお、彼らのスパッタ条件は、電極間距離 15 mm, アルゴンと酸素の比が 50 : 50, $P_s = 5 \times 10^{-2}$ Torr, $V_{dc} = 500 \sim 1500$ V, 析出速度 0.3~0.7 μm/hr である。

直流スパッタ法でも RF スパッタ法でも、いずれもスパッタ条件さえ抑さえれば配向性のよい ZnO 膜は容易に得られる。現在の段階で産業面からスパッタ装置を検討するならば、圧電膜の比抵抗の点ではターゲットに Li などをドーピングしておけば容易に $10^8 \Omega\text{cm}$ 以上の膜の得られる RF スパッタ法が有利である。また、電極構成としては基板をターゲットに平行に対向させる基板平行配置形 (以下基板平置形と呼ぶ) が膜の均一性とか平行性などの点で大量生産に向いている。いっぽう、RF スパッタ法では P_s が直流スパッタ法よりも低く、 10^{-3} Torr 台であるので装置として拡散ポンプを使う必要がある。その点、直流スパッタ法では回転ポンプだけでよいのは都合がよい。また、析出速度は、筆者らの基板側置形の直流スパッタ法も、基板平置形の RF スパッタ法も同程度である。しかし RF スパッタ法については、基板温度を 500°C 以上にするのは筆者らの経験では装置としてかなり無理があるようである。この点、基板側置形では基板をとくに加熱しないでも放射熱で適当な基板温度 (約 170°C) が得られ、基板用ヒータなしでも比抵抗が $10^6 \Omega\text{cm}$ 程度の圧電膜が得られる。ただ学問的には、析出速度が同程度で (たとえば基板にパイレックスガラスや溶融水晶を用いた場合) 基板平置形の方が基板側置形よりも基板温度を高くする必要があるのはなぜかまだ明らかにされていない。いずれにしても、スパッタ技術としては、数十 MHz 以上の超音波を対象とするかぎりには、直流スパッタ法の基板側置形は、スパッタ時の拡散ポンプが不要、基板用ヒータも不要、しかも RF 電波障害に対する配慮も不要ということで、装置の設備価格や運転維持の経費の面で、今後産業用としても魅力のある ZnO 圧電膜作成技術である。

4. バルク超音波デバイスへの応用

ZnO 圧電膜の膜厚としては、通常 $1\ \mu\text{m}$ ~ $10\ \mu\text{m}$ のものが用いられる。主要な応用素子は当然、VHF・UHF 帯の超音波トランスジューサであって、「まえばき」で述べたような種々の応用がある。ここでは読者に関心をもっていただだけそうな応用について二、三とり上げることとする。なお、ZnO 膜超音波トランスジューサの作成手順や設計については文献⁸⁰⁾を参照願いたい。

4.1 横波用トランスジューサ

ZnO 圧電膜による横波用トランスジューサについてはいくつか報告されているが^{27,30,47,81)}、能率のよいものが必ずしも再現性よく作成されないようである。しかし、前節で述べたように、Fig. 1 の基板位置 II において得られる c 軸傾斜の ZnO 膜を用いれば容易に横波用トランスジューサが得られる³⁴⁾。[通常は c 軸傾斜角が 20° ~ 30° で純粋に横波用とはいえないが²⁴⁾、十分実用になる。一例として中心周波数が 200 MHz の試作トランスジューサで変換損失が 15 dB 以下、いっぽう、スプリアスの縦波は 45 dB 以上の減衰である。この形の横波用トランスジューサは、超音波による光の異方性ブラッグ回折の実験^{82,83)}、あるいは光弾性定数の測定⁸⁴⁾などに使用されている。

4.2 複合共振子

ZnO 圧電膜と基体とを音響的に結合させて複合共振を起こさせると、水晶振動子のオーバートーン励振に比して、VHF・UHF 帯で電気回路との整合の容易な共振子となる。この場合、共振子の Q や温度特性などは基板の性質に大きく支配されるので応用上都合がよい。Fig. 11 は UHF 帯用の複合共振子の構成で、基板にはサファイアを用いた⁸⁵⁾。また、ZnO 圧電膜の比抵抗が十分高ければ ($\rho > 10^{10}\ \Omega\text{cm}$, ρ : 比抵抗) 低周波超音波帯でも使用できるので、エリンパー板の表面に ZnO 圧電膜を形成させて 10~100 kHz 帯の複合共振子が作成されている⁷³⁾。このような複合共振子は、用途によっては今後、水晶やセラミックス共振子にとって代わることも考えられる。

4.3 液中超音波用トランスジューサ

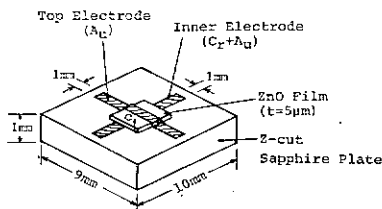


Fig. 11 ZnO 膜/サファイア基板構成の複合共振子。

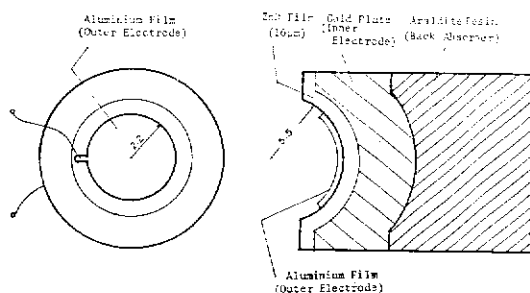


Fig. 12 ZnO 膜凹面トランスジューサ。

ZnO 圧電膜トランスジューサを用いれば簡単に VHF・UHF 帯の超音波を液体中に放射、あるいは検出できる。上述の複合共振子はそのままで液体中超音波用トランスジューサとなり、すでに数百 MHz 以上の液体中超音波の実験で実用になっている¹⁾。最近、走査形超音波顕微鏡などにみられるように、液体中に集束超音波を放射する技術の開発が進められている。そこで、ZnO 圧電膜による凹面トランスジューサが提案されている⁸⁶⁾。これは ZnO 膜の c 軸配向が基板表面に垂直方向に成長するという性質⁸⁷⁾を利用したもので、半球殻基体の凹面側あるいは凸面側の表面に ZnO 圧電膜を形成させてトランスジューサを構成する。凹面側から液体中に超音波が放射され、その半球殻の曲率中心に超音波が集束される。100 MHz 超音波用に試作した凹面トランスジューサの構成を Fig. 12 に示す。

5. 弾性表面波デバイスへの応用

すでに本誌の総合報告⁸⁸⁾にとり上げられているように、種々の弾性表面波デバイスが提案されている。ここでは ZnO 圧電膜を用いた弾性表面波デバイスについて説明する。

5.1 非圧電基板用の弾性表面波トランスジューサ

VHF 帯以上の弾性表面波を基板上に励振・検出するにはすだれ状電極のトランスジューサがよく用いられる。基板が圧電物質の場合には、すだれ状電極を基板表面に形成するだけで電極に印加された高周波電界は基板の圧電性を介して容易に弾性表面波を励振することができる。ところが、基板がガラス、熔融水晶、Si あるいは Al_2O_3 などの非圧電物質の場合には、すだれ状電極を基板表面に形成しただけでは弾性表面波は励振されない。そこで圧電膜とすだれ状電極との組み合わせ構造のトランスジューサが基板表面に形成される。基板上の圧電膜に対するすだれ状電極の構成方法には Fig. 13 に示すような A, B, C, D の 4 通りがある。これら 4 通りのトランスジューサに対する電気機械結合係数、すなわち実効的結合係数 K^* は、すだれ状電極のついている面を短絡した場合の弾性表面波速度 v_m と開放した場合の弾

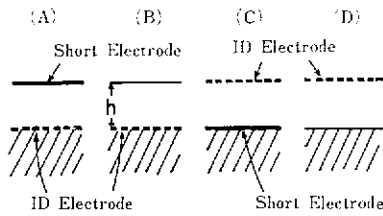


Fig. 13 圧電膜に対する電極構成の種類.

性表面波速度 v_s との差 Δv を求めれば次式によって与えられる.

$$(K^*)^2 = 2(v_s - v_m)/v_s = 2\Delta v/v_s$$

この実効的結合係数は周波数および圧電膜の厚さによって変化する. 一例としてパイレックスガラス基板上に形成した ZnO 膜 (c 軸上基板) の実効的結合係数の k_0h (k_0 : 波数, h : 膜厚) に対する変化について, 理論計算値およびトランスジューサの入力アドミッタンスの測定から求めた実験結果を Fig. 14 に示す⁹³⁾. このグラフを見てとくに興味のあるのは, Fig. 13 の(A)と(C)の構成, すなわち, 圧電膜をすだれ状電極と短絡電極とで挟んだ構成の場合には, $k_0h < 1$ の範囲で K^* に極大が生じることである. なお, $k_0h < 1$ の領域で K^* に極大が生じるという現象については, 箕輪ら⁹⁰⁾によって1970年に予想されていた. 基板としては, ほかに熔融水晶^{91, 92)}, Si^{91, 92)}, Al₂O₃⁹¹⁾ などについても検討されている. とくに Hickernell⁵⁰⁾は Si 基板について理論と実験を詳細に行なっている. 最近, ZnO 膜/熔融水晶基板構成において, 弾性表面波の二次モードに対する実効的結合係数が検討されており, Si や Al₂O₃ を基板に用いると実効的結合係数が一次モードに対する最大値よりも大きくなることを見いだされている⁹³⁾.

ZnO 膜/基板の層構造では一般に音速は分散性を示す⁹⁴⁾. Fig. 15 はその一例で ZnO 膜/パイレックスガラス基板の層構造を伝搬するレーリー波の速度分散特性である⁹⁵⁾.

上述の実効的結合係数と速度分散性とがわかっておれば, 通常の圧電基板に対する設計方法に従って, 弾性表面波トランスジューサを設計できる. ただし実効的結合係数には測定値を用いて設計する. ここではトランスジューサの詳細は省くが, このトランスジューサは以下の各項で述べる非圧電基板上的弾性表面波デバイスの, いわば要であって, デバイスの特性向上のいかなは, このトランスジューサの特性にかかっており, 今後, デバイスの特性を最高に発揮させるためのトランスジューサに関して研究が進められることになる.

5.2 弾性表面波フィルタ

フィルタの基板材料としてはこれまで, LiNbO₃ 結晶

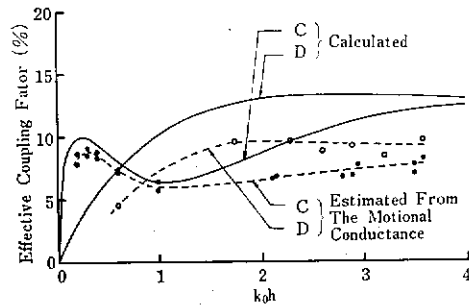
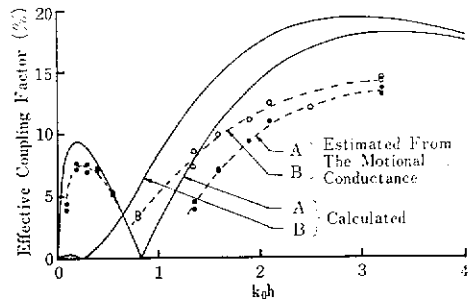


Fig. 14 パイレックスガラス基板上の ZnO 膜の実効的電気機械結合係数 (c 軸は基板に垂直).

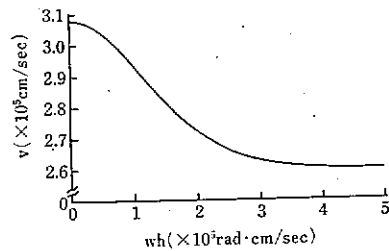


Fig. 15 ZnO 膜/パイレックスガラス基板の層構造を伝搬するレーリー波の速度分散 (h : 膜厚, ω : 角周波数).

や水晶などの単結晶, あるいはチタン酸ジルコン酸鉛系圧電セラミックスがよく用いられてきたが, 最近, ZnO 膜/非圧電基板構成のフィルタがわが国ではじめて実用化をめざしてとり上げられている. それはテレビ用の 58 MHz IF フィルタで川端ら⁷⁸⁾は Fig. 16 (a) に示すような構成のものを, また山崎ら⁹⁶⁾は Fig. 17 (a) に示すような構成のものを発表している. これらはそれぞれ先に示した Fig. 13 の(B)構成および(A)構成に相当する. Fig. 16 (b) および Fig. 17 (b) はそれぞれの周波数特性である. なお, このフィルタの設計方法については, 前項の ZnO 膜/ガラス基板構成の特性をふまえると, これもまた圧電基板を用いる場合とまったく同様に設計できるので省略する. なお, バルク波により発生するスプリアス応答を防止するために, ガラス基板の底面はサンドブラストにより荒らしてある.

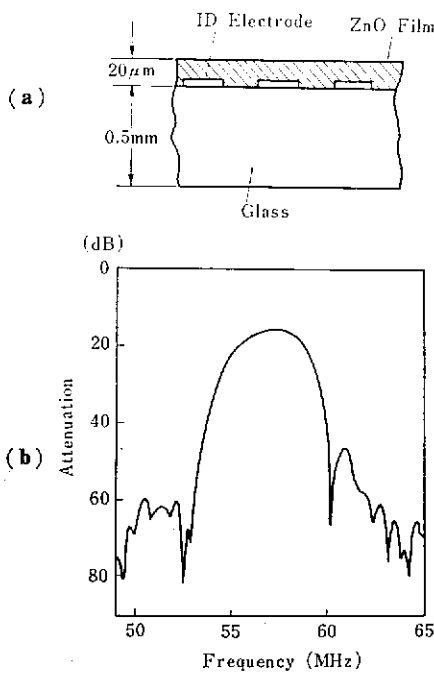


Fig. 16 (B) 構成電極による表面波フィルタ⁷⁸⁾。

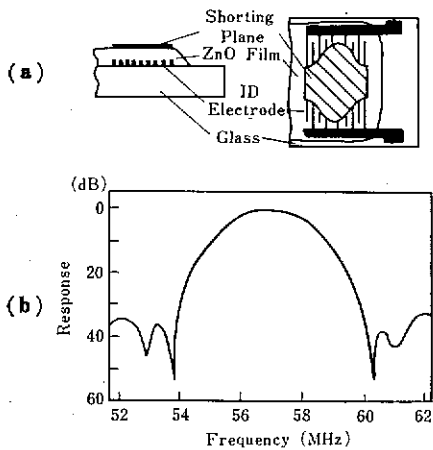


Fig. 17 (A) 構成電極による表面波フィルタ⁷⁷⁾。

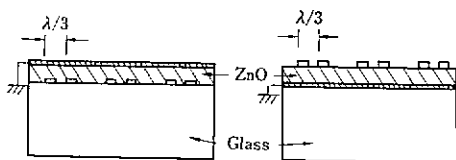


Fig. 18 ZnO 圧電膜による一方向性トランスジューサの構造⁹⁷⁾。

ZnO 圧電膜の表裏に電極を設けることができるという特徴を利用して、挿入損失の少ない一方向性のフィルタが提案されている。すなわち ZnO 圧電膜を用いれば、三相

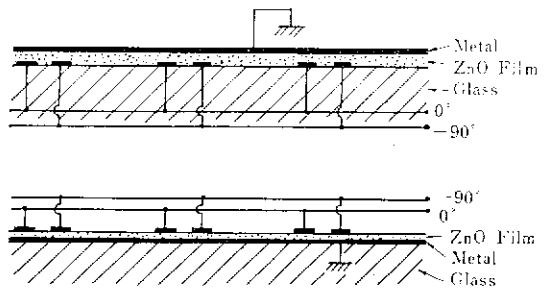


Fig. 19 ZnO 圧電膜による一方向性トランスジューサの構造⁹⁸⁾。

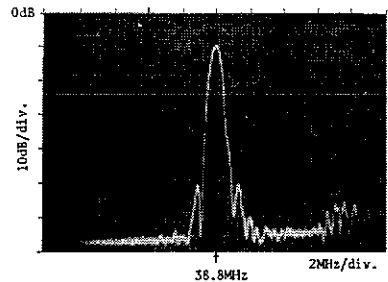


Fig. 20 重み付けした一方向性トランスジューサの周波数特性⁹⁸⁾。

励振電極構成において従来問題となっていた電極交叉の問題をさけることができる。Fig. 18 は必ずしもフィルタをめざした研究ではないが、発表された一方向性トランスジューサの構造である⁹⁷⁾。隣接する電極の中心間距離を $\lambda_g/3$ とし、励振電極の位相差を 120° としている。また、Fig. 19 は佐藤ら⁹⁸⁾の発表した一方向性のフィルタの構造である。この構成では 90° 位相器を用いることによって順方向逆方向ともに最適の条件の下で一方向性の波を励振できる。Fig. 20 はフィルタの特性の一例で、この場合 80 対の交叉指電極に $\{\pi^2 \sin X / [X(\pi^2 + X)]\}$ 形の重み付けを行ない、さらに対向するアース電極も同様の形にし、受信側を 40 対の一方向性交叉指電極にした場合の実験結果である。挿入損失は約 9.8 dB で、第一サイドローブが 40 dB 以上の良好な阻止域減衰特性が得られている。最近、ZnO 圧電膜の表裏にすだれ状電極を直交させた二次元的周期構造の電極構成が提案され、弾性表面波の分波器へ応用されて良好な結果が得られている⁹⁹⁾。このように圧電膜の表裏二面を巧妙に利用すれば、今後おもしろいデバイスが出現するのではないかと期待される。

5.3 アクティブデバイス

圧電物質上の弾性表面波は伝搬するとき、圧電性を介して高周波電界を伴っている。そこで弾性表面波を伝搬させる圧電物質に、半導体を接近させておくと、半導体中のキャリアと弾性表面波に伴って伝搬する高周波電

層構造
厚、
酸鉛系
ZnO
で実用
ビ用の
に示す
い)に示
れぞれ
に相当
れの周
につい
まえる
同様に
発生す
の底面

界との間に相互作用が起こる。この現象を利用してアクティブデバイスが種々考案されている。

従来、このような相互作用を効果的に行なわせるには、半導体と圧電物質との接合間隔の調整が厄介な問題であった。ZnO 圧電膜は、半導体表面に直接形成させることができるので、この間隔調整の問題を解消するうえで、デバイスのモノリシック化を可能にすることから最近、ZnO 膜を用いた弾性表面波増幅器、コンボルバー、メモリなどの多くのモノリシックデバイスの研究が活発に行なわれるようになった。

デバイスの構成として、ZnO 膜を形成させるべき基板には Si, GaAs, SOS (Si on Sapphire) などがとり上げられている。これらの基板は、すでに半導体工業において実用に供されており、半導体デバイスの IC 技術をそのまま流用できるし、さらに半導体デバイスと弾性表面波デバイスを結合させた IC 化の可能性もある。この種のアクティブデバイスに ZnO 圧電膜がどのように用いられているか、デバイスの構成を中心に簡単に説明しておく。

5.3.1 弾性表面波増幅器

ZnO 圧電膜によるモノリシック弾性表面波増幅器については、一応理論的解析が試みられていたが¹⁰⁰⁾、実験が成功したのは最近のことである¹⁰¹⁾。久間らの増幅器の構造を、Fig. 21 (a) に示す。(1102) (2201) Al₂O₃//(100) (110) Si 構造の SOS 基板の上にオーミック電極のための n⁺ 領域と交叉指電極を設ける。つぎに Si 膜をスパッタ雰囲気から保護するとともに Si 表面の安定化のため SiO₂ 膜を約 1500 Å 付着させて、その上に 15.2 μm の ZnO 膜を形成させている。n⁺ オーミック電極間にドリフト電圧をかけて、中央の Si 部分にドリフト電流を流すと適当な条件で表面波が増幅される。Fig. 21 (b) は 80 MHz の弾性表面波に対する増幅特性である。弾性表面波が増幅されるなら、適当なフィードバックをかけてやると発振器が得られる。久間らはさらに DFB によるモノリシック構成の発振器を試みている。

5.3.2 コンボルバー

ZnO 圧電膜を用いたモノリシックコンボルバーは、Fig. 22 に示すような構成で、Kino ら¹⁰²⁾が初めて実験に成功した。(111) Si 表面に ZnO 膜を RF スパッタにより形成させ、表面波は (112) 方向に伝搬させる。この構造は MIS 構造の一種で、表面金属と ZnO, ZnO と Si 基板との界面現象が素子の特性に重要な影響を及ぼす。Kino らは表面金属に Al を用い、また ZnO 膜をスパッタするまえに Si 表面に SiO₂ を 1000 Å の厚さに形成させているが、これは、(1) ZnO 成長のための virgin surface を得るため、(2) ZnO による

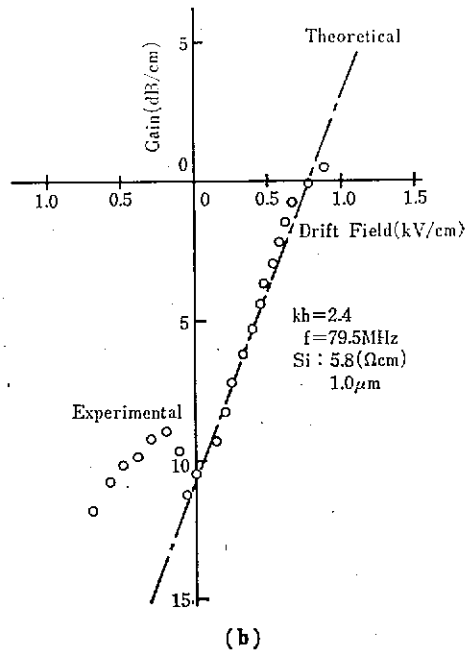
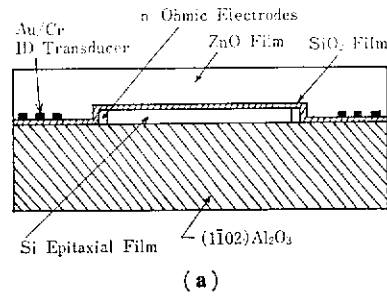


Fig. 21 弾性表面波増幅器の構造と特性¹⁰¹⁾。

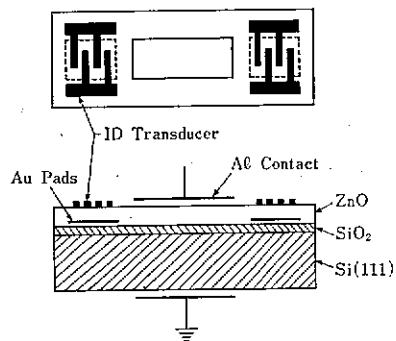


Fig. 22 ZnO 膜/Si モノリシックコンボルバーの構造¹⁰²⁾。

contamination を防ぐ、(3) Si 表面の表面状態密度を低くするためである。

この構造において、両側のトランスジューサから、同

じ周波数の弾性表面波を励振させると、互いに反対方向から進んで来た波は中央の電極部分で重なり、表面電極およびベース電極の間にコンポリューション信号が現われる。このコンポリューションは、半導体のキャリアの非線形効果によって得られるが、この出力は Si の表面状態によって大きく変化する。MIS 構造として、表裏の電極間に直流ゲート電圧 V_0 を印加して測定した $C-V$ 特性と出力 V_C との関係について、最近詳細な研究が進められ¹⁰³⁾、コンボルバーの効率改善のための努力がなされている¹⁰⁴⁾。

コンボルバーの効率 F は多くの場合、入力二つの弾性表面波トランスジューサへの電気的入力パワー P_1 , P_2 とコンポリューション出力のパワー P_3 によって、 $F = P_3/(P_1 \cdot P_2)$ で定義されている。Coldren¹⁰³⁾ は中心周波数 130 MHz で、Davis¹⁰⁵⁾ は 171 MHz で実験値として、それぞれ $F = -73$ dBm および -71 dBm の効率を得ている。Fig. 23 は構造的に効率改善をはかった例で¹⁰⁶⁾、この場合には、中心周波数 125 MHz で $F = -58$ dBm の効率を得ている。また、坪内らは Si 表面をバリキャップ動作させることを考え、ZnO 圧電膜の膜厚を音波の半波長近傍に設定し、バリキャップ動作で問題になる不用な容量を音波の圧電的共振により生じる分布インダクタンス成分で打ち消すことによる高効率コンボルバーを提案している¹⁰⁷⁾。

5.3.3 イメージスキャナー

Fig. 22 のコンボルバーの構造で Coldren は表面電極を半透明電極にして、光照射により表面にイメージパターンを作ると、光強度の濃淡により二つの波に対するミキシング効果に対して空間的な変化を生じる。弾性表面波の一方のパルス幅を短くし (スキャン用パルス)、他方のパルス幅を十分長くすると、コンポリューション出力信号のエンベロープはミキシング効果の空間的な変化に伴って光のイメージパターンに対応した重みづけられる。すなわち光のイメージパターンの一次元的走査が行なわれたことになる。さらにこれを直角方向に素子を機械的に走査すれば二次元的パターンのイメージングができる。なお光があたったときの出力増減はゲート電

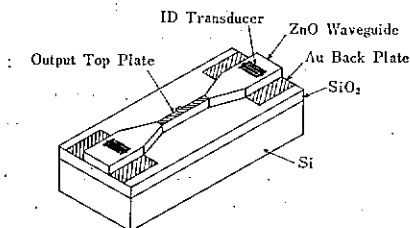


Fig. 23 弾性表面波ビームを集束することにより効率改善をめざしたコンボルバー¹⁰⁶⁾。

圧によって調整できる。

5.3.4 メモリデバイス

スパッタ法で得られる ZnO 膜中には多数のトラップが存在する。そこで最近、このトラップへの電荷注入を利用した表面波メモリの研究が盛んである。

前項のイメージスキャナーにおいて、負ゲート電圧のもとで光照射を行なうと光の照射された部分だけに著しい電子注入がなされ、光を消しても負電荷のパターンがトラップに残る。これを上に述べた要領でコンポリューション出力として後から読み出すことができる。メモリ時間は ZnO 膜中のトラップから電子が放出される時間できまるが、1時間以上である^{105,108)}。

最近、弾性表面波の信号を記憶するメモリデバイスが注目されている。鳳ら¹⁰⁹⁾は Al/ZnO/SiO₂/Si 構造のモノリシック・コンボルバーを用い、弾性表面波を 10 時間以上も記憶するホログラフィックメモリを発表している。これは従来のホログラフィックメモリと同様に書き込み、まず時定数の短い Si/SiO₂ 界面の表面単位に電荷パターンを記憶させ、つぎに、このパターンが記憶されている間にゲートに負の直流パルスを加え、Si/SiO₂ 界面の電荷パターンを時定数の長い ZnO 膜中のトラップに転写させるものである。一般にホログラフィックメモリにおいては、キャリアをトラップする時定数は短く、放出する時定数は長くという矛盾した要求があるが、鳳らによって開発されたこの転写方式はその矛盾をたくみに解決したといえる。この方式の研究の発展が期待されている。

5.4 表面音響光学デバイスへの応用

表面音響光学デバイスは、弾性表面波と光表面波との相互作用 (とくにブラッグ回折) を利用するもので、光 IC における信号処理デバイスを実現する一つの手段と考えられている。表面音響光学デバイスの構成は、相互作用領域となる光導波路部と弾性表面波を励振するトランスジューサ部より成る。最初に提案された表面音響光学デバイスでは弾性表面波を励振するために圧電物質を基板とし、その上に素子が構成されていたが、ZnO 圧電膜を用いれば非圧電基板上に表面音響光学デバイスを構成することができる¹¹⁰⁾。光 IC が多くの場合非圧電基板上に形成されているので、表面音響光学デバイスと光 IC とのモノリシック化に ZnO 圧電膜は有用な働きをするものと考えられる。

6. おわりに

ZnO はなんといっても原料が豊富で安価な材料である。また、数多い圧電材料の中で、実用面から簡単に作成できる圧電膜は、現在のところこの ZnO ぐらいであ

ろう。本文でも述べたように、ZnO 圧電膜は VHF・UHF 帯の超音波デバイスの研究には不可欠な材料となっている。とくに ZnO 圧電膜が比較的低温で、種々の基板に析出できるという性質は、超音波トランスジューサ用材料として適するだけでなく、基板の性質を適当に選ぶことができるので、超音波デバイスにおいて、基板と組み合わせた総合的な特性を優れたものにすることが可能である。

筆者が ZnO 圧電膜の研究にとり組んでから早くも 10 年になろうとしているが、最近産業界でもこの ZnO 圧電膜をとり上げるようになったことは大変嬉しいことである。しかし、改めて実用素子の面から ZnO 圧電膜を眺めると、まだ明らかにしなければならない部分、さらに新しい問題点などが浮かび上がってくる。素子の性能向上をめざして、これから地道な研究を続けていく必要を感じている次第である。

(付録) ZnO 結晶の弾性、圧電、誘電定数

ZnO の圧電定数と誘電定数については、Jaffe ら¹¹⁾による値と Chrisler ら¹²⁾による値とが違っていたが、Smith ら¹³⁾が改めて測定を行ない、1969 年に詳細なデータを発表した。このときの会議の出版物はアブストラクトだけであるので、諸定数を付表に掲げておく。

付表 Li ドープの ZnO 単結晶の諸定数。

() は単位を示す

	(10 ¹¹ N/m ²)	(10 ⁻¹² m ² /N)	(10 ⁻¹¹ F/m)
c ₁₁ ^E	2.096	s ₁₁ ^E 7.824	ε ₁₁ ^S 7.57
c ₁₂ ^E	1.205	s ₁₂ ^E -3.403	ε ₃₃ ^S 9.03
c ₁₃ ^E	1.046	s ₁₃ ^E -2.196	
c ₃₃ ^E	2.106	s ₃₃ ^E 6.929	ε ₁₁ ^T 8.11
c ₄₄ ^E	0.423	s ₄₄ ^E 23.64	ε ₃₃ ^T 11.19
c ₆₆ ^E	0.445	s ₆₆ ^E 22.46	
ρ = 5.665 (10 ³ kg/m ³)			
	(C/m ²)	(10 ⁻¹¹ C/N)	
e ₁₅	-0.480	d ₁₅ -1.134	k ₁₅ 0.259
e ₃₁	-0.573	d ₃₁ -0.543	k ₃₁ 0.184
e ₃₃	1.321	d ₃₃ 1.167	k ₃₃ 0.419
			k _t 0.290

文 献

- 1) たとえば、高木堅志郎、根岸勝雄：応用物理，44 (1975) 163.
- 2) たとえば、H. Sasaki, K. Tsubouchi, N. Chubachi and N. Mikoshiba: J. appl. Phys., 47 (1976) 2046.
- 3) たとえば、F. A. Olson: Microwave J., IEEE, 13 (1970) 67.
- 4) たとえば、若月 昇、中鉢憲賢、菊池喜充：信学会論文誌 C, 58-C (1975) 472.

- 5) A. Korpel: *Ultrasonic Imaging and Holography*, ed. G. W. Stroke et al. (Plenum Press, New York, 1974) p. 345.
- 6) R. A. Lemons and C. F. Quate: Appl. Phys. Letters, 24 (1974) 163.
- 7) たとえば「弾性表面波工学特集」音響学会誌, 30 (1974年10月).
- 8) Special Issue; Surface Acoustic Waves, Proc. IEEE, 64 (May 1976).
- 9) G. Heiland, E. Mollow and E. Stockman: Solid State Phys., 8 (1959) 191.
- 10) A. R. Hutson: Phys. Rev. Letters, 4(1960)505.
- 11) A. R. Hutson, J. H. McFee and D. L. White: Phys. Rev. Letters, 7 (1961) 237.
- 12) J. E. May, Jr.: Proc. IEEE, 53(Oct. 1965)1465.
- 13) Y. Kikuchi, N. Chubachi and H. Sasaki: IEEE Trans., SU-16 (1969) 200.
- 14) Special Issue; Microwave Acoustics, IEEE Trans., MTT-17 (Nov. 1969).
- 15) E. D. Kolb and R. A. Laudise: J. Amer. Ceramic Soc., 48 (1965) 342.
- 16) 菊池喜充, 中鉢憲賢, 佐々木 博: 音響学会講演論文集 (1966年11月) p. 29.
- 17) F. S. Hickernell: IEEE Trans., MTT-17(1969) 957.
- 18) N. F. Foster: Proc. IEEE, 53 (1965) 1400.
- 19) S. Wanuga, T. A. Midford and J. P. Dietz: Ultrasonics Symp. (Dec. 1965) I-6.
- 20) G. A. Rozgonyi and W. J. Polito: Appl. Phys. Letters, 8 (1966) 220.
- 21) N. F. Foster and G. A. Rozgonyi: Appl. Phys. Letters, 8 (1966) 221.
- 22) N. F. Foster, G. A. Rozgonyi and F. A. Vannatta: Ultrasonics Symp. (Oct. 1966) D-3.
- 23) R. M. Malbon, D. L. Walsh and D. K. Winslow: Appl. Phys. Letters, 10 (1967) 9.
- 24) N. F. Foster: IEEE Trans., SU-15 (1968) 28.
- 25) R. F. Belt and G. C. Florio: J. appl. Phys., 39 (1968) 5215.
- 26) G. A. Rozgonyi and W. J. Polito: J. Vac. Sci. Tech., 6 (1969) 115.
- 27) N. F. Foster: J. appl. Phys., 40 (1969) 4203.
- 28) D. L. Raimondi and E. Kay: J. Vac. Sci. Tech., 7 (1970) 96.
- 29) J. D. Larson, T. M. Reeder and K. Winslow: IEEE Trans., MTT-18 (1970) 602.
- 30) 菊池喜充, 中鉢憲賢, 皆方 誠: 音響学会講演論文集 (1970年5月) p. 301.
- 31) 菊池喜充, 中鉢憲賢, 若月 昇, 皆方 誠: 音響学会講演論文集 (1970年10月) p. 59.
- 32) D. L. Denburg: IEEE Trans., SU-18 (1971) 31.
- 33) Y. Kikuchi, N. Chubachi and M. Minakata: Proc. 7th Int. Congr. Acoust. (Academical Kiado, Budapest, 1971) 21 P 6, p. 281.
- 34) 皆方 誠, 中鉢憲賢, 菊池喜充: 音響学会講演論文集 (1971年11月) p. 67.
- 35) G. L. Dybwad: J. appl. Phys., 42 (1971) 5192.

- 1 Holon Press,
- Phys.
- 誌, 30
- s, Proc.
- a: Solid
- 60) 505.
- White:
- 5) 1465.
- i: IEEE
- , IEEE
- r. Cera-
- 学会講演
- 17(1969)
- 400.
- Dietz:
- i. Phys.
- l. Phys.
- d F. A.
- 6) D-3.
- Vinslow:
- 968) 28.
- Phys., 39
- Vac. Sci.
- 4203.
- i. Tech.,
- Vinslow:
- 会講演論
- 誌: 音響
- 1971) 31.
- Minakata:
- cademiai
- 会講演論
- 1) 5192.
- 36) R. Inaba, T. Ishiguro and N. Mikoshiba: Japan. J. appl. Phys., **10** (Nov. 1971) 1493.
- 37) M. Nagao: J. appl. Phys., **37** (1966) 4591.
- 38) 菊池喜充, 中鉢憲賢: 応用物理, **36** (1967) 927.
- 39) 箕輪純一郎, 山之内和彦, 柴山乾夫: 音響学会講演論文集 (1971年11月) p. 83.
- 40) I. Niikura, H. Watanabe and M. Wada: Japan. J. appl. Phys., **8** (1969) 755.
- 41) K. Tomura, M. Ohnishi and M. Yonezawa: Japan. J. appl. Phys., **13** (1974) 939.
- 42) R. A. Mickelsen and W. D. Kingery: J. appl. Phys., **37** (1966) 3541.
- 43) 福西修三, 稲村隆弘: 音響学会講演論文集 (1969年10月) p. 323.
- 44) G. Galli and J. E. Coker: Appl. Phys. Letters, **16** (1970) 439.
- 45) F. Pizzarello: J. appl. Phys., **43** (1972) 3627.
- 46) 青木昌治, 多田邦雄: 電気四学会連合大会論文集 (5) (1976年10月) p. 5-83.
- 47) M. Kasuga and S. Ishihara: Japan. J. appl. Phys., **15** (1976) 1835.
- 48) R. Wagers, G. Kino, P. Galle and D. Winslow: IEEE Ultrasonics Symp. Proc. (1972) p. 194.
- 49) 久間和生, 森泉豊栄, 安田 力: 電気学会論文誌 A, **96** (1966) 389.
- 50) F. S. Hickernell and J. W. Brewer: Appl. Phys. Letters, **21** (1972) 389.
- 51) F. S. Hickernell: J. appl. Phys., **44** (1973) 1061.
- 52) G. D. Hillman and H. J. J. Seguin: J. appl. Phys., **44** (1973) 5053.
- 53) G. D. Hillman and H. J. J. Seguin: IEEE Trans., **SU-21** (1974) 49.
- 54) 稲葉律夫, 石黒武彦, 御子柴宜夫: 第 17 回応用物理学関係連合講演会 (1970年4月) 1a-G-4.
- 55) 福西修三: 音響学会講演論文集 (1970年10月) p. 57.
- 56) N. F. Foster: J. Vac. Sci. Tech., **6** (1969) 111.
- 57) 玉邑嘉章, 稲村隆弘, 吉川昭吉郎: 信学会超音波研究会, US 73-10 (1973年8月).
- 58) 池内大明, 西村浩一: 信学会全国大会論文集 (I) (1973年3月) p. 90.
- 59) 木野幸浩, 中山靖彦, 渡辺山雄, 相原佑吉: 電気四学会連合大会論文集 (5) (1976年10月) p. 5-99.
- 60) 山水秀一郎, 夏井武雄: 信学会全国大会論文集 (I) (1977年3月) p. 1-69.
- 61) 中川恭彦, 大石哲男, 小出純二: 信学会全国大会論文集 (I) (1977年3月) p. 1-71.
- 62) M. Minakata, N. Chubachi and Y. Kikuchi: Japan. J. appl. Phys., **11** (1972) 1852.
- 63) M. Minakata, N. Chubachi and Y. Kikuchi: Japan. J. appl. Phys., **12** (1973) 474.
- 64) A. J. Bahr, R. E. Lee, F. S. Hickernell, C. B. Willingham and T. M. Reeder: IEEE Ultrasonics Symp. Proc. (1972) p. 202.
- 65) N. Chubachi, M. Minakata and Y. Kikuchi: Proc. 6th Int. Vacuum Congr., Kyoto, 1974, Japan. J. appl. Phys. **13** (1974) Suppl. 2, Pt. 1, p. 737.
- 66) 香方誠, 中鉢憲賢, 菊池喜充: 信学会超音波研究会, US 73-37 (1974年1月) p. 25.
- 67) P. D. Davidge: SCP and Solid State Tech., (Dec. 1966) 30.
- 68) H. W. Lehmann and R. Widmer: Proc. 6th Int. Vacuum Congr., Kyoto, 1974, Japan. J. appl. Phys. **13** (1974) Suppl. 2, Pt. 1, p. 741.
- 69) A. H. Fahmy and L. Adler: IEEE Trans., **SU-19** (1972) 346.
- 70) J. Vuillod: J. Vac. Sci. Tech., **9** (1972) 87.
- 71) J. D. Larson, D. K. Winslow and L. T. Zitelli: IEEE Trans., **SU-19** (1972) 18.
- 72) K. Wasa, K. Ohji, O. Yamazaki and S. Hayakawa: Proc. 6th Int. Vacuum Congr., Kyoto, 1974, Japan. J. appl. Phys. **13** (1974) Suppl. 2, Pt. 1, p. 745.
- 73) T. Shiosaki, Y. Yasumoto and A. Kawabata: Proc. 6th Conf. Solid State Devices, Tokyo, 1974, J. Japan Soc. Appl. Phys. **44** (1975) Suppl., p. 115.
- 74) B. T. Khuri-Yakub, G. S. Kino and P. Galle: J. appl. Phys., **46** (1975) 3266.
- 75) 中鉢憲賢, 香方 誠, 菊池喜充: 信学会全国大会論文集 (I) (1974年7月) p. 276.
- 76) 中鉢憲賢, 森田芳昭: 信学会超音波研究会, US 75-17 (1975年7月) p. 39.
- 77) 黄地謙三, 山崎 攻, 和佐清孝, 早川 茂: 電気学会全国大会論文集 (1976年春) p. 471.
- 78) 川端 昭, 塩崎 忠, 藤島 啓, 石山秀樹, 井上 純, 家木英治: 信学会超音波研究会, US 75-58 (1976年3月) p. 33.
- T. Shiosaki, E. Ieki and A. Kawabata: Appl. Phys. Letters, **28** (1976) 475.
- 79) K. Ohji, T. Tohda, K. Wasa and S. Hayakawa: J. appl. Phys., **47** (1976) 1726.
- 80) 中鉢憲賢: 応用物理, **42** (1973) 902 および 1260 (訂正).
- 81) H. W. Lehmann and R. Widmer: J. appl. Phys., **44** (1973) 3868.
- 82) N. Wakatsuki, N. Chubachi and Y. Kikuchi: Japan. J. appl. Phys., **13** (1974) 1754.
- 83) 若月 昇, 中鉢憲賢, 菊池喜充: 信学会論文誌 C, **58-C** (1975) 472.
- 84) H. Sasaki, K. Tsubouchi, N. Chubachi and N. Mikoshiba: J. appl. Phys., **47** (1976) 2046.
- 85) 中鉢憲賢, 三野官利男: 音響学会講演論文集 (1976年10月) p. 561.
- 86) N. Chubachi: Electronics Letters, **12** (1976) 595.
- 87) 三野官利男, 中鉢憲賢: 第 24 回応用物理学関係連合講演会 (1977年3月) 26p-R-16.
- 88) 稲村隆弘, 吉川昭吉郎: 応用物理, **45** (1976) 718.
- 89) 佐々木 博, 中鉢憲賢, 菊池喜充: 信学会超音波研究会, US 72-17 (1972年9月).
- H. Sasaki, N. Chubachi and Y. Kikuchi: Elec-

tronics Letters, 9 (1973) 92.

90) 箕輪純一郎, 山之内和彦, 柴山乾夫: 音響学会講演論文集 (1970年10月) p. 53, および信学会論文誌A, 54-A (1971) 315.

91) L. P. Solie: J. appl. Phys., 44 (1973) 619.

92) G. S. Kino and R. S. Wagers: J. appl. Phys., 44 (1973) 1480.

93) 近岡 忠, 米田武弘, 大西新造, 川端 昭: 信学会超音波研究会, US 76-55(1977年2月) p. 15.

94) 清水康敬, 畑 正: 信学会論文誌A, 59-A(1976) 516.

95) 佐々木 博, 中鉢憲賢, 菊池喜充: 信学会全国大会論文集(I) (1973年3月) p. 86.

96) 山崎 文, 黄地謙三, 和佐清孝, 早川 茂: 電気学会全国大会論文集 (1976年春) p. 472.

97) 畑 正, 清水康敬: 信学会超音波研究会, US 76-56 (1977年2月) p. 23.

98) 佐藤弘明, 目黒敏靖, 山之内和彦, 柴山乾夫: 信学会超音波研究会, US 76-68 (1977年3月) p. 23.

99) 日下部孝章, 塩川祥子, 森泉豊栄, 安田 力: 音響学会講演論文集 (1976年10月) p. 133.

100) 佐々木 博, 中鉢憲賢, 菊池喜充: 信学会超音波研究会, US 72-5 (1972年5月).

101) 久間和生, 百武純一, 森泉豊栄, 安田 力: 第37回応用物用学会学術講演会予稿集 (1976年10月) 分2, p. 279.

102) B. T. Khuri-Yakub and G. S. Kino: Appl. Phys. Letters, 25 (1974) 188.

103) L. A. Coldren: Appl. Phys. Letters, 25 (1974) 473.

104) K. Tsubouchi, S. Minagawa and N. Mikoshiba: J. appl. Phys., 47 (1976) 5187.

105) K. L. Davis: Appl. Phys. Letters, 26 (1975) 143.

106) B. T. Khuri-Yakub and G. S. Kino: Electronics Letters, 12 (1976) 271.

107) K. Tsubouchi, S. Minagawa and N. Mikoshiba: Proc. 8th Conf. (1976 Int.) Solid State Devices, Tokyo, 1976, Japan. J. appl. Phys. 16 (1977) Suppl. 16-1, p. 473.

108) J. K. Elliott, R. L. Gunshor, R. F. Pierret and K. L. Davis: Appl. Phys. Letters, 27 (1975) 179.

109) 鳳絃一郎, 高田 進, 早川尚夫: 第37回応用物理学会学術講演会予稿集(1976年10月)分2, p. 276.

110) N. Chubachi: Proc. IEEE, 64 (1976) 772.

111) H. Jaffe and D. A. Berlincourt: Proc. IEEE, 53 (1965) 1372.

112) D. F. Chrisler, J. J. Cupal and A. R. Moore: Proc. IEEE, 56 (1968) 225.

113) R. T. Smith: J. Acoust. Soc. Amer., 45 (1969) 105.

基
 るこ
 では
 機構
 1971
 報告
 力発
 膜に
 結晶
 るこ
 らの
 い。