

多結晶スピネルの接合による RF-SAW デバイスの温度特性の改善

下 司 慶一郎*・寺 岡 寛 二・辻 裕
 藤 井 明 人・今 川 善 浩・中 山 茂
 橋 本 研 也・田 中 秀 治・戸 津 健太郎
 高 木 秀 樹

Wafer Bonding of Polycrystalline Spinel with $\text{LiNbO}_3/\text{LiTaO}_3$ for Temperature Compensation of RF Surface Acoustic Wave Devices — by Keiichiro Geshi, Kanji Teraoka, Yutaka Tsuji, Akihito Fujii, Yoshihiro Imagawa, Shigeru Nakayama, Ken-ya Hashimoto, Shuji Tanaka, Kentaro Totsu and Hideki Takagi — This paper proposes use of polycrystalline spinel for the temperature compensation of radio frequency (RF) surface acoustic wave (SAW) devices. It shows that spinel can be bonded with LiTaO_3 (LT) and LiNbO_3 (LN) wafers using the adhesive and direct bonding techniques. Series of RF SAW resonators were fabricated on the LT (LN)/spinel structure, and their performance, including the temperature coefficient of frequency (TCF), was measured. For comparison, SAW resonators employing Si and sapphire in place of spinel were also fabricated. The result indicated that the polycrystalline spinel offers TCF improvement better than the other materials.

Keywords: spinel, wafer bonding, SAW resonator, temperature compensation, temperature coefficient of frequency

1. 緒 言

タンタル酸リチウムおよびニオブ酸リチウム (LT/LN) は、RF-SAW デバイスの圧電材料として幅広く使用されている。LT/LN の特長は、電気機械結合係数が高いことである。一方で、温度特性が悪いことが欠点となっている。温度特性の評価指標としては、一般に周波数温度特性 (TCF) ^{*1} が使用される。温度特性の改善手法のひとつに LT/LN に熱膨張係数 (CTE) の小さな支持基板を接合する方法が報告されており ^{(1)~(5)}、既に量産化されているものもある ⁽³⁾。支持基板としてシリコン、ガラスおよびサファイアを使用した例が報告されている。その中では高い剛性と小さな CTE を有すサファイアが最も優れた TCF の改善を示している。しかし、サファイアは価格が高いため、幅広く使用されるには至っていない。表 1 に当社の多結晶スピネル (MgAl_2O_4) の特性を示す。スピネルはサファイアに次ぐ高いヤング率

と小さい CTE を有していることがわかる。さらに、スピネルはサファイアよりも硬度が低く、また焼結製法により製造される多結晶体であることから切断・研磨等の加工性に優れているという特徴がある。

本論文では、RF-SAW デバイスの温度特性改善のための支持基板として当社のスピネルの適用について検討した結果を報告する。はじめに、スピネルと LT/LN のウエハ接合を中心とした SAW デバイスの製造プロセスに関して述べる。その後、RF-SAW デバイスとしての特性について議論する。

2. RF-SAW デバイスの製造プロセス

スピネルを接合した RF-SAW デバイスの製造プロセスは次の 3 ステップより構成される：

1. スピネルと LT/LN のウエハ接合
2. ダイシングと LT/LN 面の研削・研磨加工
3. 電極の形成

なお、本研究では 4 インチウエハでの接合を行ったあとにダイシングし、研削・研磨加工および電極形成を行った。これは、同じ接合条件で異なる膜厚の試料を得るためである。実用の際には 4 インチウエハで SAW デバイスの作製まで行い、最後にダイシングを行う。

2-1 スピネルと LT/LN のウエハ接合 ウエハ接合には接着接合法および直接接合法を検討した。接着接合法

表 1 支持基板材料の主要特性

特 性	スピネル	ガラス	シリコン	サファイア
化学式	MgAl_2O_4	SiO_2	Si	Al_2O_3
結晶系	多結晶	非晶質	単結晶	単結晶
密度 (g/cm ³)	3.58	2.20	2.33	3.98
ヤング率 (GPa)	280	70	120	470
ヌーブ硬度 (kgf/mm ²)	1400	600	1150	2000
熱膨張係数 (ppm/°C)	7.3	0.6	3.4	7.7
熱伝導率 (W/mK)	16.9	1.4	163	33.0

には一般に低コストという長所があるが、デバイス製造過程での接着層の安定性に懸念がある。一方、直接接合はそのような問題はないが、ウエハの接合面には高い平坦性と表面洗浄度が要求される。

(1) 接着接合

はじめに、接着剤の硬化方法について検討を行った。硬化方法として、UV硬化型、加熱硬化型、常温硬化型の3種類を検討した。スピネルとLT/LNとのCTEの差が大きい ($> 10\text{ppm}/^\circ\text{C}$) ことから、加熱硬化型では大きく反ることが予想されるので適応は難しいと判断した。次に、常温硬化型接着剤を検討したところ反りなく接着することはできたが、接着力が弱いため、SAWデバイス製造過程で接着剤の剥離が見られた。一方、UV硬化型はUV照射方法に注意を払えば、硬化時に発熱を抑えられ反りなく接合でき、またスピネルはUV波長帯域の透光性に優れており効率的かつ高強度に接合できる。このことを実験により確認したことから硬化方法をUV硬化型に決定した。

次にUV硬化型の中で使用する接着剤を選定した。選定条件はウエハ接合後、反りが無視できる程度になるように、硬化収縮率の小さいこととした。また、SAWデバイス作製のためのプロセスに耐えられるために、耐熱性や接着強度を備えていることも必要である。文献(6)に基づき、デバイス製造工程で十分に耐性のある接着剤を見出すことができた。

以上により選定した接着剤を用いて接合されたウエハの断面図を写真1に示す。接着層の厚みはウエハ全面で均一に $3\mu\text{m}$ であることを確認した。

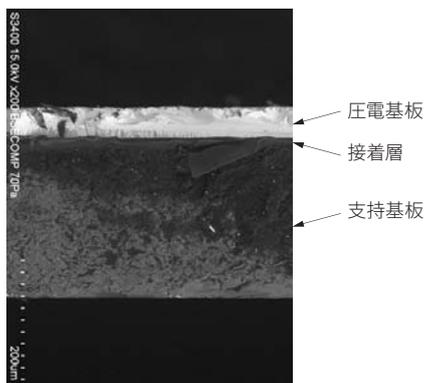


写真1 接着接合4インチウエハの断面図 (LT/スピネル)

(2) 直接接合

接合方法は接着接合と同様の理由で常温接合型に限定し、その中で表面活性化接合法 (SAB法) とプラズマ接合法について検討した結果、加熱せずに十分な強度を達成するにはSAB法が最適であると判断した^{(7),(8)}。

SAB法には接合面に高い平坦性が要求されることからウ

エハの研磨条件の最適化を行った。また、表面洗浄度が必要であるのでウエハの洗浄法についても検討した。さらに、接合装置の条件の最適化も実施した。

以上の取り組みにより、4インチウエハ形状でスピネルとLT/LNを写真2に示すようにポイドなく貼りあわせることに成功した。

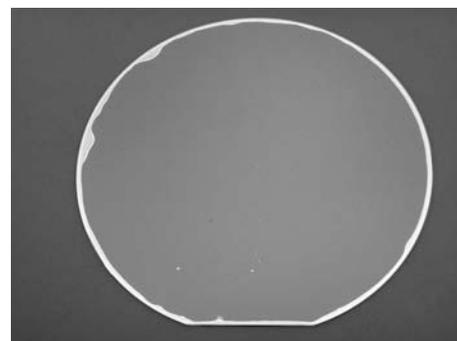


写真2 直接接合4インチウエハ (LT/スピネル)

2-2 ダイシングとLT/LN面の研削・研磨加工 ダイシングとLT/LN面の研削・研磨加工接合したウエハを $10 \times 20\text{mm}^2$ サイズのチップにダイシングしたあとLT/LN面を研削し、最後に表面を研磨した。また、ここで膜厚比をLT/LN層に対する支持基板の厚みと定義する (図1)。

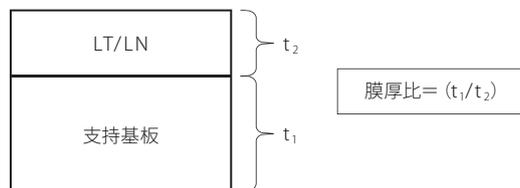


図1 ダイシング・研磨後の接合チップと膜厚比

2-3 電極の形成 圧電基板上にレジスト膜を形成し、電子ビームでSAW共振子を直接描画し、リフトオフすることで接合基板上に1ポートSAW共振子を作製した。表2に共振子の設計を示す。

3. RF-SAWデバイスとしての特性

はじめに、支持基板の選択がTCFに与える影響を調査するためにスピネル、サファイア、シリコンをそれぞれ支持基板として接合したSAWデバイスを作製し、TCFを観測した。圧電基板としては、 64°YX-LN を選択し、測定温度範囲は $+10^\circ\text{C}$ から $+80^\circ\text{C}$ とした。また、膜厚比を6とした。

表2 SAW共振子の設計パラメータ

設計パラメータ	設計値
電極材料	Cu
電極膜厚 (nm)	200
電極周期 p_1 (μm)	3.6
開口長 (μm)	54 (15 λ)
IDT対数	60
反射器本数	40

表3に測定したTCFの結果を示す。スピネル接合により20ppm/°C以上もTCFが改善した。また、スピネルを直接接合したSAWデバイスはサファイアを含む他材料よりも優れたTCFを示した。

表3 各種支持基板を接合したSAWデバイスのTCF (膜厚比6に補正)

支持基板	TCF (ppm/°C)	
	直接	接着
スピネル	-61	-68
サファイア	-63	-70
シリコン	-68	-71
接合せず	-82	

接着接合の場合、直接接合に比べてTCFの改善は小さく、支持基板による差も小さかった。この原因としては、接着層により応力緩和が発生し、支持基板によるTCFの改善効果を弱めたことが考えられる。この問題を解決するには接着層をより薄くする必要があると考える。

スピネルを直接接合したSAWデバイスに関して詳細な検討を行うため、膜厚比とTCFの相関を調査した。圧電基板には42° YX-LTを選定した。測定温度範囲は同様に+10°Cから+80°Cとした。

図2に各膜厚比において測定したTCFを示す。膜厚比

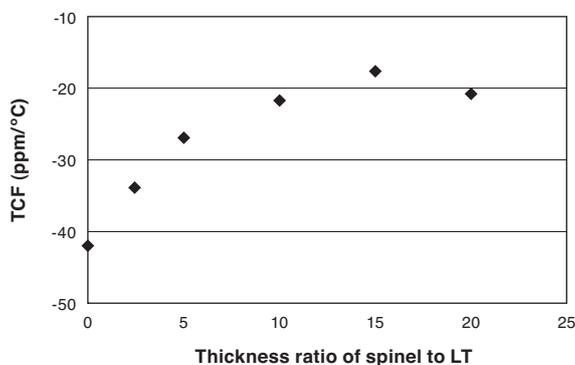


図2 スピネル直接接合SAWデバイスの各膜厚比におけるTCF

15の場合にはTCFは-42から-18ppm/°Cまで改善していることがわかった。これは過去に報告されているシリコンやサファイアを支持基板として使用したものよりも明らかに良い値である。膜厚比20の時にTCFが少し悪くなっているが、この現象は本質的なものではなく、LTを非常に薄く研磨する際に生じた加工歪みによるものと考えられる。

この時の圧電特性を検討するため位相速度 (V_r) ($=f_r p_1$) と電気機械結合定数 (K^2) を表4に示す。なお、 K^2 は次のように定義する。

$$K^2 = (\pi f_r / (2f_a)) / \tan(\pi f_r / (2f_a)) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 f_r は共振周波数、 f_a は反共振周波数であり、 p_1 は電極周期である。

この結果から、 V_r は膜厚比を変えてもほとんど変化していないことがわかる。一方、 K^2 はスピネル接合により明らかに増加している。この現象は文献(4)でも報告されている。これは接合に伴う内部応力の発生に基づくと考えられる。

表4 スピネル直接接合SAWデバイスの各膜厚比におけるデバイス特性

膜厚比	TCF ppm/°C	K^2 %	V_r m/s
接合せず	-42	7.1	3658
2.5	-34	8.1	3690
5	-27	8.4	3654
10	-22	8.8	3640
15	-18	8.8	3643
20	-21	8.1	3672

図3に膜厚比15におけるインピーダンス特性を示す。1,011MHzに高い共振のQ値が見られる。また、インピーダンス比は60dB以上を達成している。

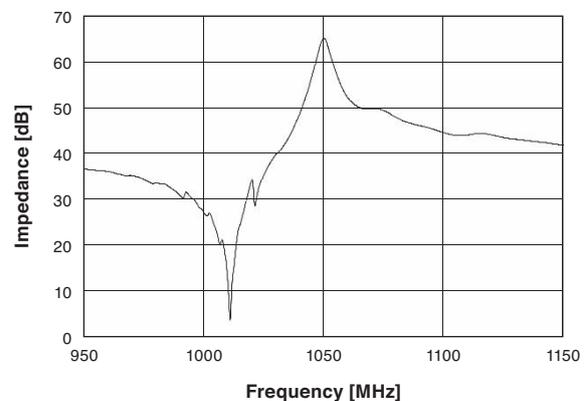


図3 スピネル直接接合SAWデバイスのインピーダンス特性 (膜厚比15)

一方、1,021MHz付近にスプリアスを観測しているが、これは、LTから伝播したバルク波が接合部で反射することにより発生したと考えられる。この現象は実用段階では抑制することができる。

4. 結 言

本研究では、RF-SAW デバイスの温度特性改善のための支持基板として当社のスピネルの適用を検討した。スピネルはLT/LNと接着接合および直接接合において接合することが可能であり、他材料と比較して優れたTCFを有することを実証した。さらに、圧電特性の検討からスピネル接合に伴う特性の低下は見られず、逆に電気機械結合定数が1-2%程度向上することを確認した。

以上より、スピネルは優れた温度特性改善効果と低価格により有益なRF-SAW デバイスの支持基板となると結論付けた。

5. 謝 辞

実験に御協力頂いた千葉大学 大森達也博士、稲葉真央氏、東北大学 邊見政浩氏、並びに産総研 前田敦彦氏に感謝いたします。なお、本研究において、東北大学試作コインランドリを利用して一部の実験を行いました。

用語集

※1 周波数温度特性 (TCF)

周囲温度の変化による周波数の変化。小さい方が良い。

参 考 文 献

- (1) K. Eda, K. Onishi, H. Sato, Y. Taguchi and M. Tomita, "Direct Bonding of Piezoelectric Materials and Applications," Proc. IEEE Ultrason. Symp., pp. 299-309 (2000)
- (2) K. Yamanouchi, K. Kotani, H. Odagawa and Y. Cho, "Theoretical Analysis of SAW Propagation Characteristics Under the Strained Medium and Applications for High Temperature Stable High Coupling SAW Substrates," IEEE Ultrason. Symp., pp. 239-242 (1999)
- (3) M. Miura, T. Matsuda, Y. Satoh, M. Ueda, O. Ikata, Y. Ebata and H. Takagi, "Temperature Compensated LiTaO₃/Sapphire SAW Substrate for High Power Applications," Proc. IEEE Ultrason. Symp., pp. 573-576 (2005)
- (4) B. P. Abbott, J. Chocola, K. Lin, N. Naumenk and J. Caron, "Characterization of Bonded Wafer for RF Filters with Reduced TCF," Proc. IEEE Ultrason. Symp., pp. 926-929 (2005)
- (5) H. Kobayashi, K. Tohyama, Y. Hori, Y. Iwasaki and K. Suzuki, "A Study on Temperature-Compensated Hybrid Substrates for Surface Acoustic Wave Filters," Proc. IEEE Ultrason. Symp., pp. 637-640 (2010)

- (6) K. Park, M. Esashi and S. Tanaka, "Preparation of Thin Lithium Niobate Layer on Silicon Wafer for Wafer-level Integration of Acoustic Devices and LSI," IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines, 130 (6), pp. 238-241 (2010)
- (7) H. Takagi and R. Maeda, "Direct Bonding of Two Crystal Substrates at Room Temperature by Ar-Beam Surface Activation," Journal of Crystal Growth, 292, pp. 429-432 (2006)
- (8) T. Suni, K. Henttinen, I. Suni and J. Makinen, "Effects on Plasma Activation on Hydrophilic Bonding of Si," Journal of The Electromechanical Society, 149 (6), pp. 348-351 (2002)

執 筆 者

下司慶一郎* : ハイブリッド製品事業部 技術部
光学セラミックスの開発に従事



- 寺岡 寛二 : ハイブリッド製品事業部 技術部 主席
辻 裕 : ハイブリッド製品事業部 技術部 グループ長
藤井 明人 : ハイブリッド製品事業部 製造部 グループ長
今川 善浩 : ネットワーク営業本部 ハイブリッド営業部 主席
中山 茂 : ハイブリッド製品事業部 技術部 部長
橋本 研也 : 千葉大学大学院 工学研究科 教授 (工学博士)
田中 秀治 : 東北大学大学院 工学研究科 准教授 (工学博士)
戸津健太郎 : 東北大学大学院 マイクロシステム融合研究開発センター 准教授 (工学博士)
高木 秀樹 : 産業技術総合研究所 集積マイクロシステム研究センター チーム長 (工学博士)

*主執筆者