Temperature Compensated SAW Devices Using Bonded LiTaO₃/Sapphire

Michio Miura Non-member (FUJITSU LABORATORIES LTD., miura.michio@jp.fujitsu.com)
 Shogo Inoue Non-member (FUJITSU LABORATORIES LTD., shogo@jp.fujitsu.com)
 Jun Tsutsumi Non-member (FUJITSU LABORATORIES LTD., tsutsumi.jun@jp.fujitsu.com)
 Takashi Matsuda Non-member (FUJITSU LABORATORIES LTD., matsuda.takashi@jp.fujitsu.com)
 Masanori Ueda Non-member (FUJITSU LABORATORIES LTD., maueda@jp.fujitsu.com)
 Yoshio Satoh Member (FUJITSU LABORATORIES LTD., satoh.yoshio@jp.fujitsu.com)
 Osamu Ikata Non-member (Fujitsu Media Devices Limited, ikata.osamu@jp.fujitsu.com)
 Yasuo Ebata Non-member (Fujitsu Media Devices Limited, ebata@jp.fujitsu.com)

Keywords : SAW, temperature compensate, LiTaO₃, sapphire, direct bonding.

A novel temperature compensated SAW substrate was developed by using direct bonding techniques. Temperature compensating method using direct bonding techniques requires support substrate with small TEC (Thermal expansion coefficient) and large elastic coefficients. We evaluated the TEC and thermal stress of bonded LiTaO₃/glass and LiTaO₃/sapphire substrates by FEM (Finite element method) simulation. Fig. 1 shows the simulation results for the TECs of the bonded LiTaO₃/glass and LiTaO₃/sapphire substrates at the center of the LiTaO₃ surface as a function of the LiTaO₃ thickness. As shown in Fig. 1, the TEC of the LiTaO₃/sapphire substrate remains almost the same.

Thickness of the piezoelectric substrate also has large influence on spurious responses caused by bulk acoustic wave reflecting at the bonding interface. Fig. 2 shows the relationship between the amplitude of the spurious responses and the ratio of the LiTaO₃ thickness to the SAW wavelength. The spurious responses are more strongly suppressed with increasing LiTaO₃ thickness.

Fig. 3 shows the temperature characteristics of the resonant and anti-resonant frequencies of a one-port SAW resonator using a bonded LiTaO₃/sapphire substrate. LiTaO₃ thickness of the bonded substrate was 37 μm , about 18 times of SAW wavelength. Sapphire thickness of the bonded substrate was 250 μm . The TCF was $-27 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ for the anti-resonant frequency and $-15 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ for the resonant frequency. The TCF for the anti-resonant frequency was about two-thirds of that for a resonator using a

conventional LiTaO₃ substrate, while the TCF for the resonant frequency was about half of that with the conventional substrate.

Using bonded LiTaO₃/sapphire SAW substrate, US-PCS SAW duplexer with small temperature coefficient of frequency and good frequency characteristics was developed. Power durability of the duplexer using bonded LiTaO₃/sapphire SAW substrate was excellent because of high thermal conductivity of sapphire.

Fig. 2. Amplitude of the spurious responses as a function of the ratio of the LiTaO₃ thickness to the SAW wavelength

Fig. 1. FEM simulation results for the TECs of the bonded substrates at the center of the LiTaO₃ surface

Fig. 3. Temperature characteristics of the resonant and anti-resonant frequencies of a one-port SAW resonator using a bonded LiTaO₃/sapphire substrate surface

LiTaO₃/サファイア接合基板を用いた 温度特性改善 SAW デバイス

非会員 三浦 道雄*   非会員 井上 将吾*
 非会員 堤 潤*   非会員 松田 隆志*
 非会員 上田 政則*   正 員 佐藤 良夫*
 非会員 伊形 理**   非会員 江畑 泰男**

Temperature Compensated SAW Devices Using Bonded LiTaO₃/Sapphire

Michio Miura*, Non-member, Shogo Inoue*, Non-member, Jun Tsutsumi*, Non-member, Takashi Matsuda*, Non-member,
 Masanori Ueda*, Non-member, Yoshio Satoh*, Member, Osamu Ikata**, Non-member, Yasuo Ebata**, Non-member

A novel temperature compensated SAW substrate was developed by using direct bonding techniques. This method has merits to keep the same coupling factor and propagation loss as the original piezoelectric substrate and need not strict control of substrate thickness. Temperature compensating method using direct bonding techniques requires support substrate with small thermal expansion coefficient and large elastic coefficients. Sapphire is one of the ideal materials for the support substrate. Thickness of the piezoelectric substrate has large influence on the temperature characteristics and spurious responses caused by reflection of bulk acoustic wave at the bonding interface. We found appropriate thickness of LiTaO₃ with good temperature characteristics and no spurious responses. Using bonded LiTaO₃/sapphire SAW substrate, US-PCS SAW duplexer with small temperature coefficient of frequency and good frequency characteristics was developed. Power durability of the duplexer using bonded LiTaO₃/sapphire SAW substrate was excellent because of high thermal conductivity of sapphire.

キーワード：弾性表面波，温度特性，タンタル酸リチウム，サファイア，直接接合

Keywords：SAW, temperature compensate, LiTaO₃, sapphire, direct bonding

1. まえがき

近年，携帯電話に代表される携帯機器の小型化・高性能化の進展により，弾性表面波（Surface Acoustic Wave, 以下 SAW）フィルタなどの部品に対する小型化・高性能化の要求も厳しくなっている。例えば，従来は誘電体フィルタが用いられていたアンテナデュプレクサを小型低背な SAW あるいは FBAR (Film Bulk Acoustic Resonator) を用いたもので置き換えるなどの動きが広がっている。アンテナデュプレクサなどのデバイスに高電力が印加される用途では，SAW フィルタに対する高性能化要求として，一層の低ロス・高抑圧化に加え，高耐電力化，温度特性の改善などが

求められる。北米の携帯電話規格の一つである PCS (Personal Communication Service) 方式では，1.9 GHz 帯でありながら送信帯域 (1.85 GHz – 1.91 GHz) と受信帯域 (1.93 GHz – 1.99 GHz) の周波数間隔がわずか 20 MHz という厳しい仕様となっており，特に良好な温度特性が望まれる。従来の LiTaO₃ 基板を用いた SAW フィルタでは，使用温度範囲 (–30 °C から +85 °C) における周波数変動量が約 9 MHz と周波数間隔の約半分を占めてしまうため，高度なフィルタ設計による急峻なフィルタ特性とばらつきの小さな量産プロセスが必要であった⁽¹⁾。一方，SAW フィルタの温度特性を改善するために，多くの方法が提案されている。例えば，LiTaO₃ 基板上に形成された IDT (Inter Digital Transducer) 上に厚く SiO₂ 膜を堆積することによって温度特性を改善する方法⁽²⁾⁽³⁾が報告されている。但し，本方法では温度特性が改善できると同時に，電気機械結合係数，IDT 電極での弾性波の反射係数などのパラメータが変化する。本稿では，LiTaO₃ とサファイアを接合した基板を用いることで，従来の LiTaO₃ 基

* (株)富士通研究所
 〒674-8555 兵庫県明石市大久保町西脇 64
 FUJITSU LABORATORIES LTD.,

64 Nishiwaki, Ohkubo-cho, Akashi Hyogo 674-8555
 ** 富士通メディアデバイス(株)
 〒222-0033 神奈川県横浜市港北区新横浜 2-3-12
 Fujitsu Media Devices Limited,
 2-3-12 Shin-Yokohama, Kohoku-ku, Yokohama, Kanagawa 222-0033

板を用いた場合とほぼ同じパラメータを持ちながら、同等以上の周波数特性、改善された温度特性、さらに高耐電力化も実現できる SAW フィルタおよびそれを用いた US-PCS デュプレクサについて述べる。

2. 接合基板を用いた温度特性改善

〈2・1〉 支持基板材料の検討 LiTaO₃ など圧電基板の裏面に支持基板を接合して温度特性を改善する方法については、これまでも提案されている⁽⁴⁾。本方法では、圧電基板より熱膨張係数が小さい材料からなる支持基板を圧電基板裏面に接合することによって、圧電基板の温度変化による伸縮を抑制して温度特性の改善を図る。そのため、支持基板は小さな熱膨張係数および高いヤング率（弾性定数）を持つことが必要である。さらに、IDT で発生するジュール熱を効率よく排熱するために、熱伝導率が大きくなることが望ましい。表 1 に LiTaO₃ と支持基板の候補となる材料の熱膨張係数、ヤング率および熱伝導率を示す。ガラスは熱膨張係数が小さいことから、支持基板として適しているようであるが、ヤング率が小さいため LiTaO₃ の伸縮を抑える効果が小さいと考えられる。また、熱伝導率が小さいため IDT で発生した熱を逃がすことができず、耐電力性が期待できない。シリコンは小さい熱膨張係数とある程度大きさのヤング率、大きな熱伝導率を持つため有力な候補であるが、その導電性のためにフィルタのロスが増大する懸念がある。サファイアは熱膨張係数がガラス並みに小さく、かつ非常に大きなヤング率を持つため LiTaO₃ の伸縮を抑える能力が高いと考えられる。さらに、熱伝導率も大きく、IDT で発生するジュール熱を効率よく排熱できると考えられる。

〈2・2〉 FEM シミュレーション 有限要素法（FEM）を用いて、接合基板の熱膨張係数と熱応力のシミュレーションを行った。図 1 にシミュレーションに用いたモデルを示す。チップサイズを 1×0.6 mm、支持基板厚を 0.3 mm とした。図 2 に LiTaO₃ 厚をパラメータとしたチップ中心での LiTaO₃ 表面（SAW 伝搬方向 X 軸）の熱膨張係数のシミュレーション結果を示す。支持基板は表 1 に示したガラスとサファイアを用いた場合である。ガラスの材料定数は(4)の文献で用いられている値を用いた。サファイアは R 面（1 $\bar{1}$ 02）基板を用い、c 軸投影線に対し 45° 方向を SAW 伝搬方向と一致させている。支持基板がガラスの場合、LiTaO₃ が薄い場合は熱膨張係数が小さいが、LiTaO₃ が厚くなるに従って急速に LiTaO₃ 自体の熱膨張係数に近づいていく。それに対して、支持基板がサファイアの場合は、LiTaO₃ が厚くなってもほぼ一定の熱膨張係数を維持している。この傾向の違いはガラスとサファイアのヤング率に起因しており、ヤング率の大きなサファイアは LiTaO₃ の膨張収縮を抑圧する能力がより高いと考えられる。後述するが、フィルタ特性を考慮すると LiTaO₃ をある程度厚くする必要があるため、支持基板としてはサファイアが望ましい。

〈2・3〉 スプリアスレスポンスの抑制 接合基板上で

Fig. 1. FEM simulation model.

Fig. 2. FEM simulation results for the TECs of the bonded substrates at the center of the LiTaO₃ surface.

Table 1. Properties of candidate materials for a support substrate and of LiTaO₃ (Thermal expansion coefficient and Young's modulus of Glass are taken from ref. (4) The listed Thermal expansion coefficient of LiTaO₃ is the value in the SAW propagation direction.).

Material	Thermal expansion coefficient [ppm/K]	Young's modulus [GPa]	Thermal conductivity [W/m/K]
Glass	4.5	66	1
Sapphire	5	470	42
Silicon	3	160	160
LiTaO ₃	16.1	230	2

SAW を励振すると、圧電基板と支持基板の音響インピーダンスの不連続によりバルク波が接合界面で反射し、IDT に再入射することでスプリアス応答を生じる。図 3 に断面模式図を、図 4 に単体共振器の周波数特性を示す。スプリアス応答は反共振周波数より高周波の領域に主に発生する。良好な周波数特性を持つフィルタを実現するには、スプリアス応答をできるだけ抑える必要がある。US-PCS デュプレクサ用フィルタの場合、送信（Tx）フィルタの受信帯域に発生するスプリアスを抑圧することが求められる。検討を行った結果、LiTaO₃ 厚とスプリアスの振幅の間に相関があることを見出した。結果を図 5 に示す。LiTaO₃ 厚が厚くなると共に急速にスプリアス応答が減衰することが分かる。LiTaO₃ 厚が 10 μm 以上では 2 dB 程度以下と、US-PCS デュプレクサ用として実用上問題ないレベルとなっている。

Fig. 3. Schematic of a bulk wave reflecting at the bonding interface.

Fig. 4. Frequency characteristics, including spurious responses, of a one-port SAW resonator using a bonded LiTaO₃/sapphire.

Fig. 5. Amplitude of the spurious responses as a function of the ratio of the LiTaO₃ thickness to the SAW wavelength.

3. 共振器特性

42Y-X LiTaO₃/サファイア接合基板を用いて共振器を作製した。LiTaO₃ 基板の厚さは 37 μm (約 18 λ)、サファイア基板の厚さは 250 μm である。周波数特性を図 6 に示す。42Y-X LiTaO₃ 基板上に作製した共振器の特性と比較しているが、接合基板の共振器でもスプリアス応答が抑制されている。また、サファイアの比誘電率が約 10 と小さいため、従来の LiTaO₃ 基板と比較すると対接地容量が約 4 割低減されている。そのため、共振周波数より低周波領域および反共振周波数より高周波領域でロスが低減されている。

周波数温度特性を図 7 に示す。LiTaO₃/サファイア接合基

Fig. 6. Frequency characteristics of one-port SAW resonators using a bonded LiTaO₃/sapphire substrate and a conventional LiTaO₃ substrate.

Fig. 7. Temperature characteristics of the resonant and anti-resonant frequencies of a one-port SAW resonator using a bonded LiTaO₃/sapphire substrate.

板上での共振周波数の TCF (Temperature Coefficient of Frequency) は $-15 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 、反共振周波数の TCF は $-27 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ という値が得られている。通常の LiTaO₃ 基板上の SAW の TCF 値 (共振: $-30 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 、反共振: $-40 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$) と比較すると、それぞれ約 1/2、2/3 の値となっており、大幅に改善されていることが分かる。

4. US-PCS デュープレクサへの適用

〈4・1〉 周波数特性 LiTaO₃/サファイア接合基板を用いて US-PCS デュープレクサを作製した。LiTaO₃ 基板の厚さは 40 μm (約 20 λ)、サファイア基板の厚さは 250 μm である。前述したように、従来の LiTaO₃ 基板とは基板の対接地容量が異なるため、フィルタ設計は LiTaO₃/サファイア接合基板用に最適化されており、送信(Tx)、受信(Rx)フィルタを $3 \times 3 \text{ mm}^2$ のセラミックパッケージに搭載し、パッケージ内部で接続している。通過特性を図 8 に示す。従来の LiTaO₃ 基板を用いて作製した $5 \times 5 \text{ mm}^2$ の US-PCS デュープレクサと比較している。従来の LiTaO₃ 基板では、Tx フィルタのロスが 2.3 dB、Rx フィルタのロスが 3.5 dB に対して、LiTaO₃/サファイア接

Fig. 8. Frequency characteristics of US-PCS SAW duplexers using a bonded LiTaO₃/sapphire substrate and a conventional LiTaO₃ substrate.

(a) Device configuration.

(b) LiTaO₃ substrate.

(c) LiTaO₃/sapphire substrate.

Fig. 9. Thermal image of SAW filter die when 0.8 W of power was applied.

合基板では、Tx フィルタのロスが 2.3 dB、Rx フィルタのロスが 2.9 dB と同等以上のロス特性を実現している。

〈4・2〉 高耐電力性 LiTaO₃/サファイア接合基板での高耐電力性を確認するため、赤外線センサによる SAW フィルタダイ温度の測定を行った。図 9(a)に示す構成により、周辺温度 60 °C の環境においてパッケージの Tx ポートから

Fig. 10. Life time of 3 × 3 mm² US-PCS SAW duplexers using a bonded LiTaO₃/sapphire substrate and a conventional LiTaO₃ substrate.

0.8 W の電力を印加した。(b)に示した従来の LiTaO₃ 基板を用いた SAW フィルタダイでは、Tx フィルタの IDT 部分が局所的に約 100 °C まで温度上昇していることが分かる。それに対して、(c)に示した LiTaO₃/サファイア接合基板を用いた SAW フィルタダイでは熱集中の度合いが弱くなっており、最高温度も 90 °C 未満と従来の LiTaO₃ 基板を用いた SAW フィルタダイよりも 10 °C 以上低くなっている。これは、LiTaO₃ (2 W/m/K) とサファイア (42 W/m/K) の熱伝導率の違いによるものであり、LiTaO₃/サファイア接合基板を用いたものでは、より効率的に排熱ができていていることを示している。デバイスの温度上昇軽減が IDT の Al 電極のマイグレーションを抑制し、耐電力性を改善すると考えられる。図 10 に周辺温度 85 °C での 3 × 3 mm² の US-PCS デュプレクサの耐電力特性を示す。LiTaO₃/サファイア接合基板を用いたものでは、従来の LiTaO₃ 基板を用いた場合と比べて、寿命が 100 倍以上に改善されていることが分かる。

LiTaO₃/サファイア接合基板では、デバイスの TCF が改善されているだけでなく、チップのジュール熱を効率的に排熱することによって、デバイス自体の温度上昇を軽減するという 2 重の作用によって温度特性を改善できていることが分かる。

5. まとめ

LiTaO₃/サファイア接合基板を用いて SAW フィルタの温度特性の改善を行った。接合基板では不可避のスプリアス応答を抑制し、3 × 3 mm² の超小型 US-PCS デュプレクサを実現した。TCF の改善ばかりでなく、効率的な排熱によるデバイスの温度上昇軽減も温度特性の改善に貢献し、同時に耐電力性も向上できた。

(平成 18 年 11 月 22 日受付, 平成 19 年 2 月 27 日再受付)

文 献

- (1) T. Matsuda, J. Tsutsumi, S. Inoue, Y. Iwamoto, Y. Satoh, M. Ueda, and O. Ikata : "High-Frequency SAW Duplexer with Low-Loss and Steep Cut-Off Characteristics", Proc. of IEEE Ultrasonics Sympo., pp.68-73 (2002)
- (2) K. Yamanouchi and S. Hayama : "SAW Properties of SiO₂/128°Y-X LiNbO₃ Structure Fabricated by Magnetron Sputtering Technique", IEEE.

Trans. Sonics and Ultrason., Vol.SU-31, pp.51-57 (1984)

- (3) M. Kadota, T. Nakao, N. Taniguchi, E. Takata, M. Miura, K. Nishiyama, T. Hada, and T. Komura : "SAW Substrate with Coupling Factor and Excellent Temperature Stability suitable for Duplexer of PCS in US", Proc. IEEE. Ultrasonics Sympo., pp.1970-1975 (2004)
- (4) K. Onishi, A. Nanba, H. Sato, T. Ogura, S. Seki, Y. Taguchi, M. Tomita, O. Kawasaki, and K. Eda : "A Novel Temperature Compensation Method for SAW Devices Using Direct Bonding Techniques", Proc. IEEE. Ultrasonics Sympo., pp.227-230 (1997)

三 浦 道 雄

(非会員) 1967 年 11 月 17 日生。1991 年 3 月東京大学物理工学科卒業。同年、富士通研究所入社。以来、第 2 高調波発生素子、SAW フィルタの研究開発に従事。現在、同社メディアデバイス研究部所属。応用物理学会会員。

井 上 将 吾

(非会員) 1975 年 9 月 4 日生。2000 年 3 月大阪大学大学院修士課程修了。同年、富士通研究所入社。以来、SAW フィルタの研究開発に従事。現在、同社メディアデバイス研究部所属。

堤 潤

(非会員) 1969 年 9 月 2 日生。1994 年 3 月大阪大学大学院修士課程修了。同年、富士通研究所入社。以来、SAW フィルタ、FBAR フィルタの研究開発に従事。現在、同社メディアデバイス研究部所属。電子情報通信学会会員。工学博士。

松 田 隆 志

(非会員) 1964 年 9 月 21 日生。1989 年 3 月室蘭工業大学大学院修士課程修了。同年富士通研究所入社。以来、SAW フィルタの研究開発に従事。現在、同社メディアデバイス研究部主任研究員。電子情報通信学会会員。

上 田 政 則

(非会員) 1963 年 8 月 30 日生。1988 年 3 月室蘭工業大学大学院修士課程修了。同年富士通入社。以来 SAW フィルタ、FBAR フィルタの研究開発に従事。02 年より富士通研究所所属。現在、同社メディアデバイス研究部主任研究員。電子情報通信学会会員。

佐 藤 良 夫

(正員) 1949 年 10 月 4 日生。1974 年 3 月東北大学大学院修士課程修了。同年富士通研究所入社。以来バブルメモリー、SAW フィルタの研究開発に従事。現在、同社フェロー。電子情報通信学会会員。工学博士。

伊 形 理

(非会員) 1960 年 9 月 20 日生。1985 年 3 月日本大学大学院修士課程修了。同年富士通研究所入社。以来、バブルメモリー、SAW フィルタの研究開発に従事。01 年より富士通メディアデバイス(株)所属。現在、同社通信デバイス事業部長代理。電子情報通信学会、応用磁気学会会員。

江 畑 泰 男

(非会員) 1948 年 6 月 24 日生。1971 年 3 月横浜国立大学電気工学科卒業。同年東芝総合研究所入社。以来、SAW デバイスの研究開発に従事。04 年富士通メディアデバイス(株)に転籍。現在、同社専任部長。電子情報通信学会会員。工学博士。