

文部科学省マテリアル先端リサーチインフラ 令和 6 年度秀でた利用成果

ARIM の 2 拠点を活用した KoT カット OPAW 振動モード水晶振動子の開発 (利用課題名：電子線描画装置を使用した 1GHz OPAW 振動子の電極パターンニング)

リバーエレクトック株式会社 元野 智幸, 今 大健, 丸山 春樹, 芦沢 英紀
 東京大学 藤原 誠, 水島 彩子, 落合 幸徳, 三田 吉郎
 東北大学 菊田 利行, 庄子 征希, 鶴谷 敏則, 森山 雅昭, 戸津 健太郎



(左) 前列左から リバーエレクトック 元野, 東京大学 藤原, 三田, 後列左から 東京大学 落合, 水島 (敬称略)
 東京大学 武田先端知スーパークリーンルーム 電子線描画装置 F5112-VD01 前にて



(右) 前列左から リバーエレクトック 今, 丸山, 後列左から 東北大学 戸津, 森山, 鶴谷, 菊田, 庄子 (敬称略)

1. はじめに

近年、テラビットイーサネットなどの超高速光通信や、量子コンピュータといった最先端分野で、従来の水晶振動子では実現の難しい水準の高周波数・低位相ジッタ特性を備えた周波数源への要求が高まっています。これらの課題を解決するため、リバーエレクトックは ARIM の共用設備を活用し、1GHz を基本波で発振可能な KoT カット OPAW (Orthogonal Plate Acoustic Waves: 直交板弾性波) 水晶振動子を開発しました。

この水晶振動子は、AT カット水晶振動子をはじめとした従来の水晶振動子では実現できなかった「基本波 1 GHz」という高い周波数と、 -40°C から 125°C の温度範囲において $\pm 10\text{ppm}$ 以内という優れた周波数温度特性を両立しています (図 1)。

また、高い周波数を基本波で発振できることにより、この水晶振動子を使用した発振器の位相ジッタ特性は非常に良好です。従来の水晶発振器は、特に低ジッタを謳う製品でも RMS 位相ジッタの値は 50fs 程度でしたが、開発した KoT カット OPAW 水晶振動子を使用する、3.2

$\times 2.5\text{mm}$ サイズの 1 チップ水晶発振器 KCRO-04 では、1GHz において RMS 位相ジッタ 10.2fs、ディスクリットタイプ発振器 KCRO-1409 では 640MHz での RMS 位相ジッタは 3.8fs という圧倒的な低ジッタ性能を実現しています (図 2)。

これらの特長により、航空宇宙用途、計測器用途に加え、超高速光通信や量子コンピュータといった、低ジッタのクロック信号が強く要求される用途での応用が期待されます。

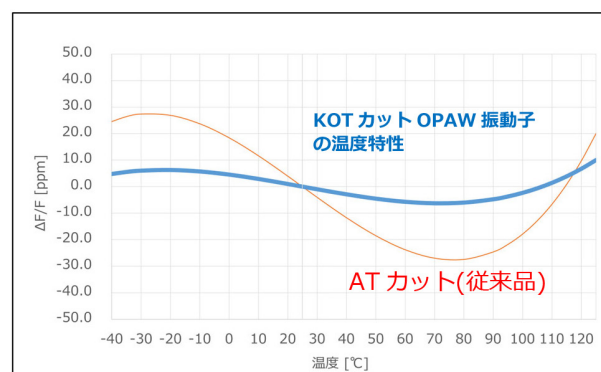


図 1 KoT カット OPAW 水晶振動子の周波数温度特性

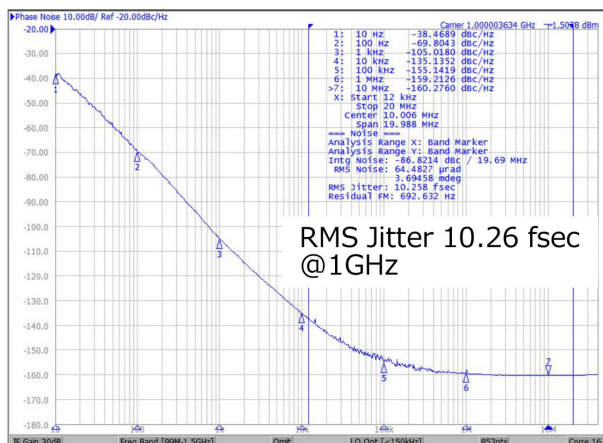


図2 KCRO-04 1GHzの位相雑音、ジッタ特性

新しいカット角と振動モードを持つ水晶振動子の開発は、理論に基づいて計算を行い、電極が励振可能で良好な周波数温度特性を持つ振動モードと原石のカット角を予測します。その後、計算結果に基づいた原石の切断角度、振動子の外形や厚さ、電極形状を持つ水晶振動子を実際に作製し、その特性を確認して次の計算へフィードバックするというフローで、計算と実際のものづくりの両輪がともに回らなければ開発は進みません。

しかし、社内の設備のみでは所定の電極形状を作製できず、それに伴い、次の計算を行うために必要なデータも取得できないという状況に陥り、開発が停滞してしまいました。このような状況を打開するために利用を開始したARIMの機器共用事業は、新しい水晶振動子の開発における「ものづくり」の面を強力にサポートしてくれる仕組みでした。

本稿では、このKoTカットOPAW水晶振動子および発振器の開発経緯と、その開発過程においてARIMの機器共用事業を通じた東京大学および東北大学の設備利用が果たした役割について書かせていただければと思います。

2. 開発の背景

「安定した周波数源」は、全ての通信機器やコンピュータをはじめとしたデジタル機器にとって欠かすことのできないものです。その周波数源として、水晶振動子はこれまで長きにわたり主役を果たしてきました。水晶は異方性の圧電材料であり、原石から切り出す角度や外形、

電極形状により、様々な周波数温度特性と周波数帯の水晶振動子を作製することが可能です。

その中でも、1934年に東京工業大学の古賀逸策博士が発見したATカットは、ゼロ温度係数を持つ特徴があり、それ以前の水晶振動子に比べ桁違いに良好な周波数温度特性を実現しました。ATカット水晶振動子は、カット角が発見されてから90年以上を経ても広く利用されており、現在使用されているほぼすべての電子機器の中で用いられていると言っても過言ではありません。

しかし、このように広く使われているATカット水晶振動子にも弱点は存在します。ATカット水晶振動子は厚み滑りモードという振動モードを使用しており、周波数 f は水晶板の厚さ t に反比例するため、 $f \propto 1/t$ という関係が成り立ち、水晶振動子の周波数が高くなるにつれて水晶片は薄くなります。例えば、10MHzの水晶片は167 μm の厚さですが、100MHzでは16.7 μm 、1GHzでは1.67 μm の厚さとなります(図3)。顕微鏡のプレパラートで使用するカバーガラスの厚さも約17 μm ですので、100MHzのATカット水晶片とほぼ同じ厚さとなります。カバーガラスを触ったことのある方は、厚さ17 μm のガラス板に対しては「非常に薄い」という印象を持たれるのではないのでしょうか。さらに1/10の厚さとなる1GHzのATカット水晶片を作製するとすれば、非常に脆く、加工が困難であることは想像するまでもありません。

では、水晶を使用して1GHzのような高い周波数を得るためには、どのような方法があるかということ、次のような手法が挙げられます。

1. カット角、振動モードの異なるSAW (Surface Acoustic Wave) 共振子を使用する
SAW共振子は表面弾性波を使用し、100MHz～1GHz程度の共振子が実用化されています。しかし、温度特性に課題があり、周波数偏差 $\pm 100\text{ppm}$ 以内という緩い仕様しか満たせません。
2. ATカット水晶振動子を原発振としたPLL (Phase Locked Loop) 発振器を使用する
PLL発振器は、電子回路を用いて入力クロック信号を基準に任意の周波数を生成可能ですが、次のような特性と課題があります：
 - 周波数偏差・温度特性の維持
PLL発振器の周波数偏差や温度特性は、原発振であるATカット水晶振動子の特性に依存します。
 - 位相ジッタ特性の悪化

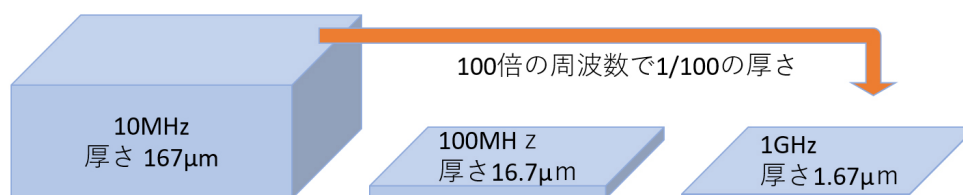


図3 ATカット水晶振動子の厚さと周波数

短期的な周波数安定度を示す位相ジッタ特性が悪化し、特に超高速光通信ではビットエラーレートが上昇する問題を引き起こします。

このように、従来の技術では「高周波数」「良好な周波数温度特性」「低位相ジッタ特性」を同時に満たすことが困難であり、このトレードオフを解消する振動子の開発が求められていました。

リバーエレテックでは、以前より新しいカット角、振動モードの水晶振動子について研究を行ってきました。2014 IEEE IFCS では、AT カットと同程度の周波数温度特性を持つ 433MHz のラム波水晶振動子について発表し、計算値と実際に作製した振動子の特性が一致することを示しました [1]。その後も研究を継続し、このラム波振動子よりもさらに優れたものを見つけるべく計算を繰り返してきました。

計算は、振動解を仮定し波動方程式とラプラス方程式を基板の境界条件下で解いて周波数を求めることを行います(図4)。計算結果から得られるのは周波数のみですが、温度を変えて計算した結果をプロットすることで周波数温度特性が分かります。

近隣の周波数に異常発振を引き起こす振動モードが無

く、圧電的に振動を励振可能であること(電気機械結合係数 $K^2 > 0.10\%$)、周波数温度特性が AT カットよりも良好であるという条件下で、水晶原石の切断角度、水晶の板厚、電極膜厚の探索を行い、計算上では AT カットを上回る良好な温度特性を持つ振動モードの存在を見出しました(図5)。

しかし、計算結果に基づいて 1GHz の振動子を試作する際、電極の寸法が問題となりました。この水晶振動子は SAW 共振子同様の対向櫛形電極 (IDT: Interdigital Transducer) (図6) を使用して振動を励振しますが、電極材料には Au を使用しており、1GHz の水晶振動子では線幅が 900nm と非常に細くなります。この線幅は 1990 年頃の最先端半導体プロセスの線幅に相当し、半導体と同様のフォトリソプロセスで作製する以外の方法は無く、ステッパを使用して露光する必要があります。今現在では最先端ではないとはいえ、この線幅を露光できるステッパは 1 億円を超える価格で、おいそれと露光装置を購入して試作できるものではありません。また、社内ではなく半導体ファウンドリを利用して水晶ウェハへの露光を行うことも検討しましたが、他の工程での制約から、水晶ウェハの厚さを 100 μm 程度とする必要があ

○解析の流れ

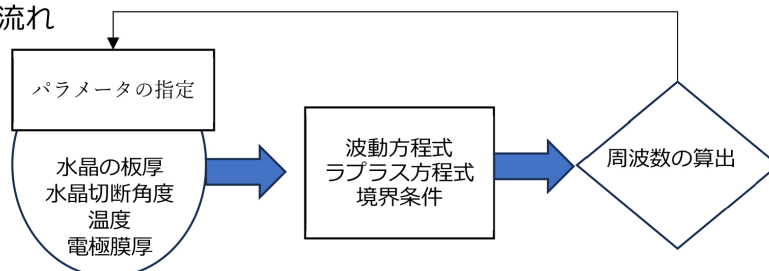


図4 水晶の振動モードを解析する計算の流れ

Orthogonal Plate Acoustic Waves (OPAW)

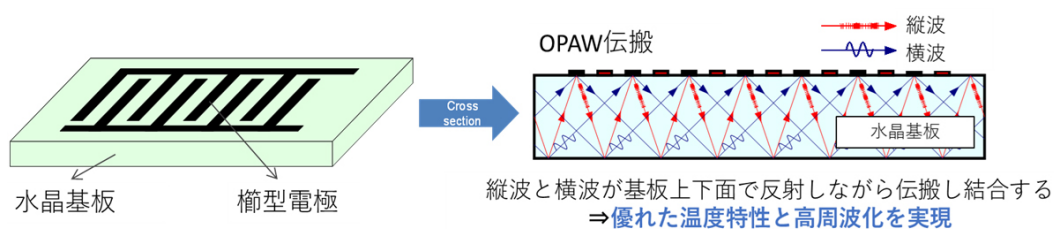


図5 OPAW 振動モードの模式図

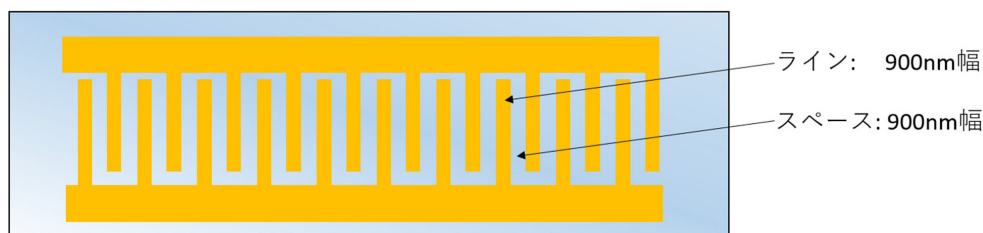


図6 1GHz KoT カット OPAW 振動子の電極

りました。これはSiウェハの標準的な厚さとは大幅に異なるため、露光装置でのウェハ搬送に問題が発生し、フォトリソ工程の最初の段階である露光を実施することすら叶わず、開発が停滞する事態となりました。

3. 共用機器を利用した製品開発

計算で求めたカット角、振動モードの水晶振動子の開発を進めるべく、100 μm 厚の水晶ウェハに900nm線幅を露光する方法を探していたところ、文部科学省のナノテクノロジープラットフォーム事業（2019年当時）で、大学や研究機関の保有する最先端機器を利用することが可能であることが分かりました。利用可能な機器には、i線ステッパー、電子線露光装置、ドライエッチング装置など、今回の水晶振動子開発で使用したいものが揃っていました。

検討の結果、東京大学武田先端知スーパークリーンルームの電子線描画装置で電極を露光するのが良いとの判断に至り、2019年1月に東京大学の三田先生を訪問して機器の利用について相談しました。三田先生からはこの振動子について強い興味を持っていただき、電子線描画装置を用いて水晶ウェハ上に所定の寸法の電極を作製することは可能だとご助言いただきました。

そして、電子線描画装置の担当である藤原様のサポートを受けながら、水晶ウェハの露光を実施することとなりました。描画する予定の線幅に基づき、2台ある電子線描画装置のうち100nm程度の線幅を作製可能なF5112-VD01を使用することに決定しました。

900nm線幅のAu電極パターンの形成は容易ではありませんでした。所定のパターンを電子線描画装置で露光することには大きな問題はありませんでしたが、社内にはAuのウェットエッチングプロセスがあるため、まずはウェットエッチングを検討してみました。

しかし、Auのエッチング液が電子線レジストを侵すなどの問題が発生しました。そのため、ドライエッチングを使用する必要があるとの判断に至り、担当の水島様のサポートを受けながら検討を行い、ようやく所要の線幅の電極パターンを形成することができました（図7）。

ステッパーで露光を行う場合、この900nmという線幅を露光する際には、被写界深度（フォーカスが合う範囲）が数 μm オーダーとなるため、ウェハにソリがあると露光への影響を避けられません。一方、電子線描画装置は被写界深度が深く、F5112-VD01では50 μm までのウェハ内の高低差について装置側で調整可能な範囲として許容されており、フォーカスに起因する様々な問題を回避することができました。

このように、電子線露光装置とドライエッチング装置を利用することで、水晶ウェハの表面にAuの電極パターンを形成することに成功しました。

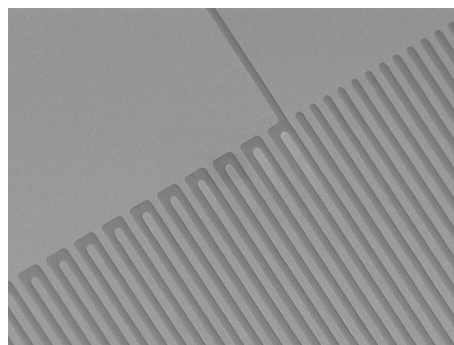


図7 900nm線幅の電極 SEM画像

ウェハで行う電極形成以降の工程や、ウェハを水晶片に分割してからの後工程は従来から生産している水晶振動子と大差ないため、社内で工程を実施し無事に水晶振動子を作製することができました。作製した水晶振動子は特性の評価を行い、想定していた通りの周波数温度特性を持つことが確認されました。

こうして、これまで世の中に存在しなかった、1GHzという非常に高い周波数の基本波で振動し、ATカットよりも良好な周波数温度特性を持つ振動子を実現することができました。この振動子の測定データを元に特許を出願し、日本、アメリカ、イギリス、台湾の各国で特許登録を完了しました[2]。また、カット角を「KoTカット」、振動モードを「OPAW」と命名。商標を出願し登録済みです[3]。

4. サンプルの出荷に向けて

リバーエレテックでのKoTカットOPAW水晶振動子の開発は、純粋な研究目的ではなく、最終的には開発した水晶振動子や発振器を製品として販売し、会社の利益に貢献することが目的となります。東京大学武田先端知スーパークリーンルームを使用して開発を行っていた段階では、すぐに商用利用することは難しいということだったので、サンプルの出荷に向けて商用利用が可能な東北大学マイクロシステム融合研究開発センターの試作コインランドリを使用してものづくりを行うこととしました。試作コインランドリには武田先端知スーパークリーンルームと全く同じ装置があるわけではなく、露光装置はマスクレスアライナー（レーザー描画）とi線ステッパーを使用する検討を行いました。

マスクレスアライナー ハイデルベルグ MLA150 は最小線幅が1 μm 程度のため、1GHzの電極を露光することはできませんでしたが、楕形電極の線幅は周波数に反比例し、600MHz程度の振動子であれば線幅は1.5 μm 程度となるため、大きな問題無く作製することができました。

1GHzの電極は、i線ステッパー キヤノン FPA-3030i5+ を使用して作製することができました。また、一般的なSiウェハと異なる厚さのために搬送系が非対応である間

題を解決するため、0.5mm 厚のサポートウェハに貼り付ける方法を使用し、搬送系が対応可能な 0.6mm 厚のウェハとして露光装置に入れることにより問題に対処しました。

この点でも、ARIM の機器利用は、自ら装置を操作する必要がありますが、100 μ m 厚のウェハに対して露光するというプロセス開発の要素があった今回の水晶ウェハ露光とマッチしており、i 線ステッパーでの水晶ウェハ露光のノウハウを自社で蓄積できたことも意義深かったと考えています。

東北大学で水晶ウェハの電極露光ができるようになったことで、有償でのサンプル出荷に向けた準備が整いました。そして、2024 年 6 月に 3225 サイズの 1 チップ発振器 KCRO-04 のサンプル初出荷を達成しました [4]。



5. ARIM の設備共用事業が 新製品開発に果たした役割

リバーエレテックではフォトリソ技術を使用した水晶振動子の製造を行っています。しかし、これまで生産してきた製品では数 μ m オーダーの線幅で問題は無く、露光装置も必要な線幅に対応したものしか保有していませんでした。今回の新しい水晶振動子を開発するためにはサブミクロンオーダーの線幅のパターンを作製する必要がありますが、本当に製品を実現できるかどうか確認するための段階でも非常に高額な露光装置が必要であり、使用する材料が一般的なシリコンウェハとは異なるサイズであるため、ファウンドリに依頼してウェハの工程を実施することも容易ではありません。

自社の既存製品で使用している製造装置の範囲内で新しい製品を開発できれば問題ありませんが、革新的な製品であるほど新たな装置が必要となることが多く、製品の実現性が不明な段階で多額の投資が必要となります。さらには、機器の高度化に伴い、製造装置の立ち上げやメンテナンスにかかる手間も増加し、実際の製品の生産に寄与しない段階では装置を維持管理する負担が相対的に大きくなります。

そのような中で、大学や研究機関が保有している最先端の装置が常にメンテナンスされた状態で維持されており、必要なタイミングでいつでも利用可能な ARIM の設備共用事業は、企業ユーザーにとって非常に意義のあるものとなります。

本事例のように、サブミクロンやナノメートルオーダーの微細加工が必要な製品開発が典型的な例になると思いますが、そのような加工が必要となる新しいアイデアの実現に挑戦したくても、装置は購入するとなると非常に高額であり、そのような装置が複数必要となれば、挑戦へのハードルはどうしても高くなります。このような場合に大学や研究機関の装置を使用できるということは、

アイデアの実現性を確認するためのハードルを引き下げてくれる大変有効な支援であると実感しています。

もし今回、我々が ARIM の共用設備を利用できなければ、電極露光の部分で高い周波数の振動子に必要な線幅を作製できず、500MHz を超えるような高い周波数の KoT カット OPAW 水晶振動子を実現できないまとなり、発見できた新しいカット角と振動モードを応用可能な分野が狭まっていた可能性もあるでしょう。

また、東北大学マイクロシステム融合研究開発センター試作コインランドリのように、ある程度の規模までは商用利用が可能な拠点があることにより、高額な製造装置を使用し、自分たちでのプロセス開発も必要となる分野でも、自社で大きな設備投資を行わない段階から新しい製品をスモールスタートすることが可能となります。研究段階で少量の製品を実際に行うことができるようになった段階と、自社で設備を持って量産するという段階の間には、崖とも感じられるような非常に大きな段差があります。しかし、ARIM の機器利用により、研究段階で使用していた装置を引き続き使用して初期の小規模な量産まで行えるようになりました。

これは、崖に公共の階段が作られたことによって、長いしごを自分で運んでいかない限り行くことのできなかった場所へ、誰もが階段を歩いて行けるようになったようなもの、と言えるのではないのでしょうか。



6. 終わりに

リバーエレテックは、ARIM の設備共用事業を通じて東京大学および東北大学の装置を利用し、世界初の「KoT カット OPAW 水晶振動子」の開発に成功しました。この水晶振動子は、従来の技術を大きく上回る高周波数・良好な周波数温度特性・低位相ジッタ特性を同時に実現しています。

2024 年 6 月には 500MHz ~ 1GHz の基本波発振を実現する 3225 サイズの 1 チップ発振器「KCRO-04」のサンプル初出荷を達成しました。

今後も、ARIM の共用設備を引き続き利用して開発活動を行い、発振器のサイズを現行の 3225 サイズから 2520 や 2016 サイズへの小型化、1GHz を超える高周波への対応を進める予定です。

KoT カット OPAW 水晶振動子が、次世代の通信・計測・コンピューティング技術において革新的な周波数源となり、これらの分野の発展に大いに貢献できることを期待しています。



7. 謝辞

本成果の一部は、文部科学省「マテリアル先端リサー

チインフラ」(課題番号: 東京大学 22UT1149, 東北大学 23TU0019) の支援を受けて実施されました。深く御礼申し上げます。



参考文献

[1] T. Kon, K. Mizumoto and Y. Saigusa, "An analysis of frequency temperature characteristics of a Lamb wave type quartz acoustic wave device," 2014 IEEE International Frequency Control Symposium (FCS), Taipei, Taiwan, 2014, pp. 1-6, doi: 10.1109/

FCS.2014.6859864.

[2] 日本特許: 第 7249055 号「弾性波素子」
米国特許: US Patent No. 11,258,424
台湾特許: No. I747636
イギリス特許: GB2598165

[3] 商標登録 第 6489253 号「KoT カット」
商標登録 第 6489254 号「OPAW」

[4] https://www.river-ele.co.jp/pdf/newproducts/discro_p240610ygs.pdf

(リバーエレクトック株式会社 商品開発部 元野 智幸)



【お問い合わせ】

東京大学マテリアル先端リサーチインフラ・
データハブ拠点

☎ 微細構造解析部門: 03-5841-6372

☎ 微細加工部門: 03-5841-1506

E-mail info@arim.t.u-tokyo.ac.jp

ホームページ

<https://arim.t.u-tokyo.ac.jp/>



【お問い合わせ】

東北大学ナノテク融合技術支援センター

☎ 022-229-4113

E-mail office.cints@grp.tohoku.ac.jp

ホームページ

<https://www.cints.tohoku.ac.jp/>