

平成 24 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「水晶振動子極小化に対応した周波数調整技術の研究開発」

研究開発成果等報告書

平成 25 年 3 月

委託者 関東経済産業局

委託先 タマティーエルオー株式会社

目次

第1章 研究開発の概要	
1. 1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1. 2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	4
1. 3 成果概要	9
1. 4 当該研究開発の連絡窓口	10
第2章 新型周波数調整装置の開発	11
第3章 コンタクト技術の開発	
3. 1 高耐久性プローブピンの開発	13
3. 2 基準測定治具の開発	14
第4章 計測アルゴリズムの開発	15
第5章 イオンガンの開発	15
第6章 全体総括	
6. 1 研究開発の概要	17
6. 2 研究開発成果	18
6. 3 研究開発後の課題・事業展開	20
6. 4 おわりに	20
参考文献	21

第1章 研究開発の概要

1. 1 研究開発の背景・研究目的および目標

A. 研究開発の背景

水晶振動子の歴史はキューリー兄弟が圧電効果を発見した1880年に遡る。1917年にはランジュパンが水晶振動子を発明し、無線通信の発展に大きく寄与した。[1]

周波数安定度が極めて良好な水晶振動子の特徴を最大限生かすため、水晶振動子の個々の周波数偏差を極力小さくすることが望まれてきた。その後、水晶振動子表面に電極膜を形成した後、個々の周波数を測定しながら電極膜厚を変化させることによって個々の周波数を所望の値に合わせこむ周波数調整工程が製造工程に取り込まれるようになった。[2]

また、「産業の塩」と呼ばれる水晶デバイスは、パソコン、携帯電話、デジタルカメラといったデジタル家電から自動車や基幹通信系などの産業インフラに至る、あらゆる電子機器に搭載されている。近年の電子機器は、高機能化と複合化、そして小型化・薄型化に拍車がかかり、様々な電子部品は小型化の一途を辿っている。水晶振動子のパッケージサイズも従来使用されていた7.0mm×5.0mmサイズ（通称：7050）から5.0mm×3.2mmサイズ（5032）へと移り、現在では3.2mm×2.5mmサイズ（3225）が市場の主流を成している（図1-1参照）。更には、2.0mm×1.6mmサイズ（2016）から1.6mm×1.2mmサイズ（1612）といった極小サイズも上市され始めてきている。[3]

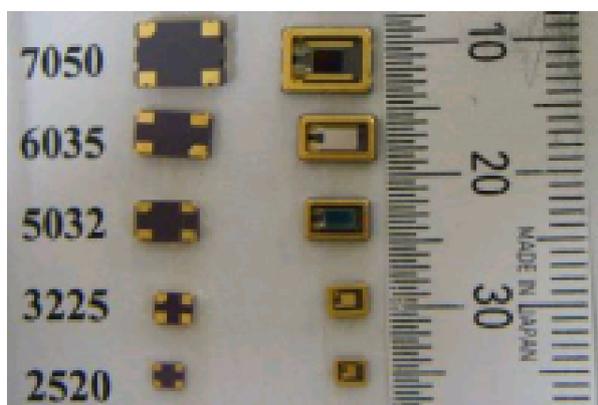


図1-1 パッケージサイズ

日本水晶デバイス工業会（QIAJ）によると、2011年度通期の数量としては、スマートフォン、タブレットPCに牽引され、120億個を超え（図1-2参照）、前年度比111.6%の数量増と予測している。[3]

2011年度についても主要各社では、数量的には二桁の伸びが確保出来るとの見方をしており、史上最高の生産規模になるためには生産能力の拡大が鍵を握る。

主要各社では市場が拡大している小型パッケージ品を中心に国内外で生産能力の拡大に乗り出している。[4]

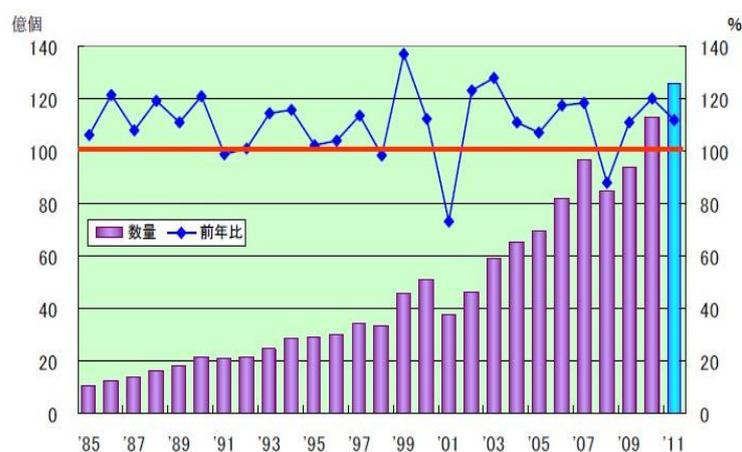


図1-2 水晶デバイス生産量推移

図 1-3 は 2010 年に QIAJ が発表した水晶デバイスの 2020 年までのロードマップである [5]。小型化は 1210 サイズから 1008 サイズへと移り、精度は一桁向上していくと予測している。

以上のような背景から、今後数年のうちに市場の主力となるであろう 2016、1612 サイズをターゲットとした量産型の周波数調整装置を開発し市場投入することが急がれている。

	現在 (2010)	5 年後 (2015)	10 年後 (2020)
小型化・低背化		2.0×1.6×0.5 (t) → 0.4 (t)	
		1.6×1.2×0.4 (t) → 0.3 (t)	
		1.2×1.0 (w) ×0.3 (t)	
		1.0×0.8 (w) ×0.25 (t)	
高精度化		TCXO ±2.5×10 ⁻⁶ → ±0.5×10 ⁻⁶	
		OCXO ±0.1×10 ⁻⁶ → ±0.01×10 ⁻⁶	
		Crystal unit ±100×10 ⁻⁶ → ±10×10 ⁻⁶	
高周波化		BAW : 622MHz → 1GHz → 3GHz	
		SAW : 2GHz → 3GHz	
		F-BAR	
高信頼性耐候性		高温環境下への対応 85℃ → 125℃	
		機械的強度、耐衝撃性への対応	
		厳しい環境化での実装性能の確保	
低パワー		間欠動作、スタンバイモード、スリープモードへの対応 (AT+音叉)	
		低消費電力化 (RTC等)	
		低電圧対応	

図 1-3 水晶デバイス技術ロードマップ

B. 本研究開発の目的と概要

水晶振動子の小型化に伴い周波数調整装置もパッケージサイズに合わせた技術を取り入れて来たが、7050、5032 サイズから 3225、2520 サイズへの移行は従来技術の延長線での対応が可能であった。しかし、今後の主流となる 2016、1612 サイズへの移行は従来技術の延長だけではなく新技術の導入が不可欠である。従って、本研究では極小パッケージサイズと量産型に対応した新型周波数調整装置の開発を目的とする。

今年度の研究は、昨年度に開発した月産 200 万個、調整精度±1.1ppm、生産タクト 0.52 秒/個に対応した試作機から、最終目標である極小サイズ 1612 への対応と、月産 400 万個、調整精度±1ppm、生産タクト 0.4 秒/個を実現した実用機を開発する。

具体的には、昨年度までの試作機の問題点の抽出と、周波数調整プロセスのパラメータであるエッチング速度、周波数調整工程のターゲット周波数等の最適条件を探すことにより調整精度の向上を図る。また、①極小化した水晶振動子の測定、②生産タクト向上、③生産量向上、を主眼とした新規要素技術の研究開発も併せて行う。

C. 研究開発の目標

本研究で開発する新型周波数調整装置の目標は、

- 1) パッケージサイズ 1.6mm×1.2mm (1612) に対応
- 2) 周波数調整精度：±1ppm
- 3) 生産量：月産 400 万個 (生産タクト：0.4 秒/個)

また、本研究開発で行う新規要素技術の研究は、1) コンタクト技術の開発、2) 計測アルゴリズムの開発、3) イオンガン開発の 3 項目である。

上記 1)~3) の目標を実現するための個別テーマと実施内容は以下の通りである。

①新型周波数調整装置の開発（実施：株式会社昭和真空）

昨年度改良した試作機で最終目標のパッケージサイズ 1612 サイズでの問題点の抽出と対策、および周波数調整プロセスの見直しによる調整精度の向上を行う。その上で前述の周波数調整装置の目標値を達成するため、下記②～④の基礎技術を搭載した実用機の開発を行う。

②コンタクト技術の開発

（実施：株式会社昭和真空、公立大学法人首都大学東京、三生電子株式会社）

水晶振動子の周波数測定は水晶振動子の電極に電針（プローブピン）を接触（コンタクト）させ行っている。微小化した水晶振動子の高精度測定には、プローブピンをコンタクトする際の機械的位置精度と電気的接触抵抗の低減が必要となる。

また、測定結果の信頼性が極めて重要視されるため、周波数を評価する基準測定治具が必要となる。

高信頼性プローブピンの開発では昨年度に引き続き、材質やメッキ厚を変更したプローブピンの開発（耐久性 20 万回以上）を行う。基準測定治具の開発では 1612 サイズ用治具の実用化、および 1612 サイズの周波数測定の安定性評価を行う。

③計測アルゴリズムの開発（実施：株式会社昭和真空）

水晶振動子の生産タクトを向上させるためには水晶振動子の周波数を高速で計測する必要がある。従来法では 0.8 秒／個の生産タクトが限界であるため、計測アルゴリズムの開発を行う。

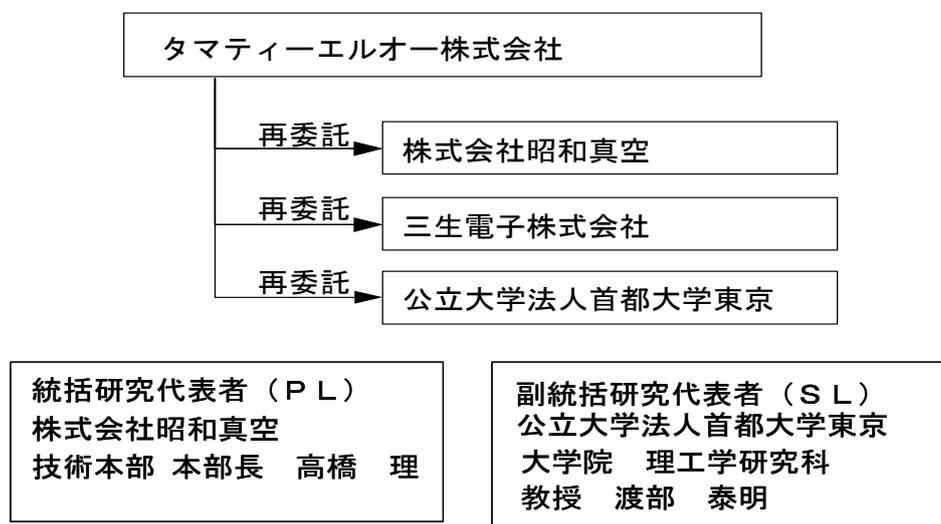
今年度は、 π 回路のインピーダンス変更による、計測時間を短縮したアルゴリズムの実用化を目指す。計測時間は、100ms 以下（従来法：300ms）を目標とする。

④イオンビーム用イオンガンの開発（実施：株式会社昭和真空）

昨年度改良したイオンガンは、連続 200 間動作においてイオン電流密度 $\pm 10\%$ 以下と良好な結果が得られた。今年度は加速試験を行い、メンテナンスサイクルの 2 倍延長を目標とする。

1. 2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

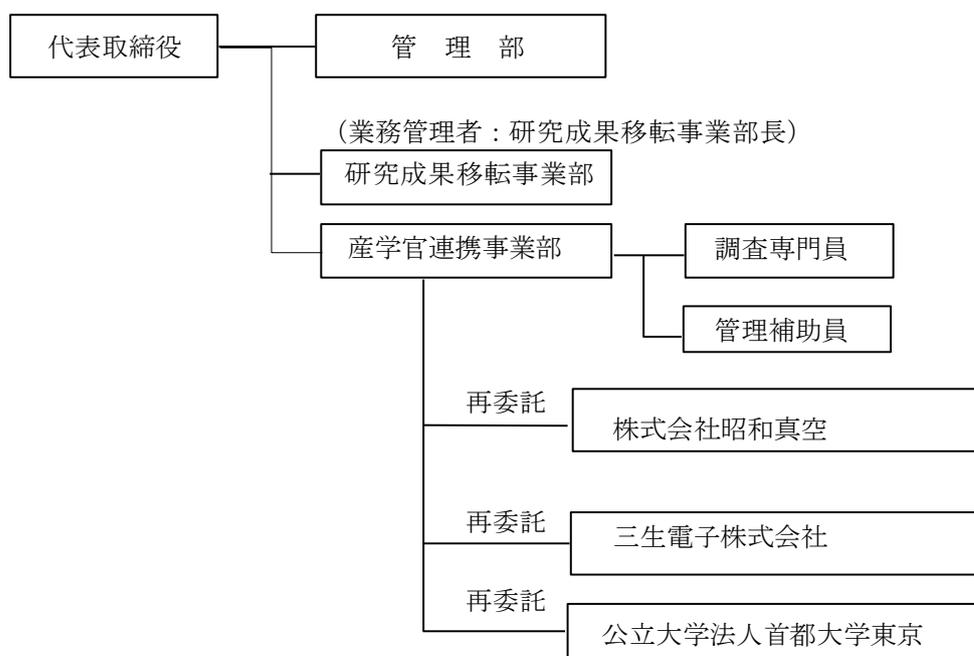
1) 研究組織（全体）



2) 管理体制

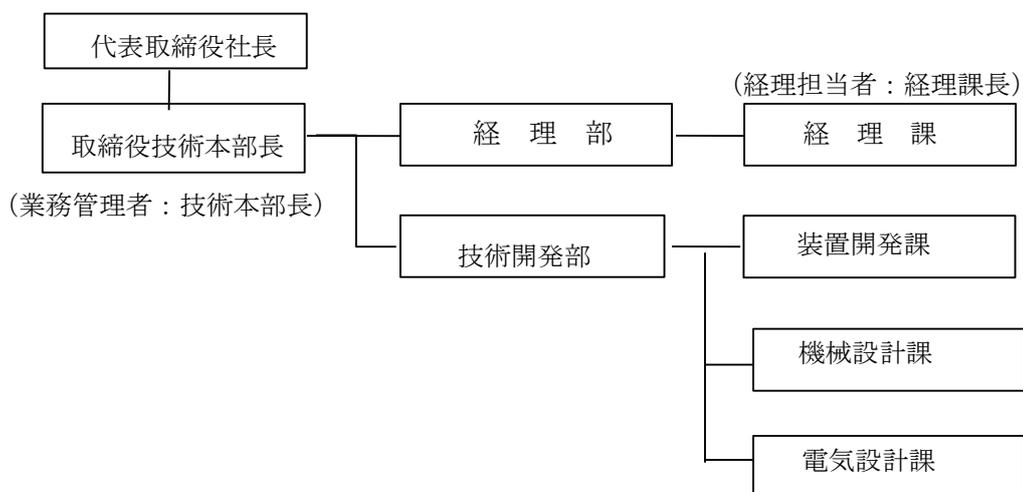
① 事業管理機関

[タマティーエルオー株式会社]

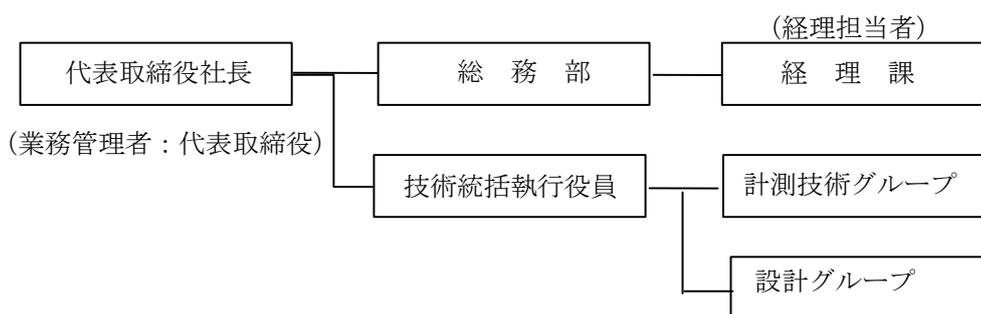


② 再委託先

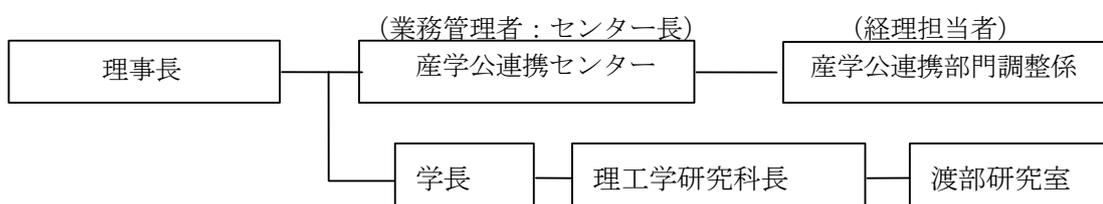
[株式会社昭和真空]



[三生電子株式会社]



[公立大学法人首都大学東京]



3) 管理員及び研究員

【事業管理機関】 タマティールエルオー株式会社

① 管理員

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
小鷹 光雄	産学官連携事業部 調査専門員	⑤

② 研究員 無し

【再委託先】 (研究員)

株式会社昭和真空

氏名	所属・役職	実施内容 (番号) ※
高橋 理	取締役技術本部長	①、②、③、④
久保 信一	技術開発部次長	①、②、③、④
白井 修	技術開発部装置開発課 課長	①、②、③、④
塩野 忠久	技術開発部専門研究員	②
長田 佑介	技術開発部装置開発課 係長	④
森 広宣	技術開発部装置開発課 主任	①
松岡 範佳	技術開発部装置開発課 主任	②
石原 達也	技術開発部装置開発課	③
跡邊 好寿	技術開発部装置開発課	③

三生電子株式会社

氏名	所属・役職	実施内容 (番号) ※
内野 正	代表取締役社長	②
石井 浩	技術統括執行役員	②
小柳津 康夫	計測技術グループリーダー	②
安江 拓	計測技術グループ	②
木村 尚弘	計測技術グループ	②

公立大学法人首都大学東京

氏名	所属・役職	実施内容 (番号) ※
渡部 泰明	大学院 理工学研究科 教授	②

※印：①新型周波数調整装置の開発、②コンタクト技術の開発

③計測アルゴリズムの開発、④イオンビーム用イオンガンの開発

4) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

タマティーエルオー株式会社

(経理担当者)	管理部長	吉野 正喜
(業務管理者)	研究成果移転事業部長	松永 義則

(再委託先)

株式会社昭和真空

(経理担当者)	経理部 経理課長	杉山 茂紀
(業務管理者)	取締役 技術本部長	高橋 理

三生電子株式会社

(経理担当者)	総務部経理課	竹熊 達也
(業務管理者)	代表取締役	内野 正

公立大学法人首都大学東京

(経理担当者)	産学公連携部門調整係	中島 宇寿
(業務管理者)	産学公連携センター長事務取扱	理事長 高橋 宏

5) 他からの指導・協力者

研究開発推進委員会 委員

氏名	所属・役職	備考
高橋 理	株式会社昭和真空 技術本部 本部長	PL
渡部 泰明	公立大学法人首都大学東京 大学院理工学研究科 教授	SL
久保 信一	(株)昭和真空 技術開発部次長	
白井 修	(株)昭和真空 技術開発部装置開発課 課長	
塩野 忠久	(株)昭和真空 技術開発部専門研究員	
長田 佑介	(株)昭和真空 技術開発部装置開発課 係長	委
森 広宣	(株)昭和真空 技術開発部装置開発課 主任	委
石原 達也	(株)昭和真空 技術開発部装置開発課	委
松岡 範佳	(株)昭和真空 技術開発部装置開発課 主任	委
跡邊 好寿	(株)昭和真空 技術開発部装置開発課	委
内野 正	三生電子(株) 代表者(代表取締役社長)	
石井 浩	三生電子(株) 技術統括執行役員	委
小柳津康夫	三生電子(株) 計測技術グループリーダー	委
木村 尚弘	三生電子(株) 計測技術グループ	委
櫻田 武	株式会社ケンウッドデバイス 技術部 課長	アドバイザー (謝金、 旅費)
井深 丹	タマティーエルオー(株) 代表取締役社長	
松永 義則	タマティーエルオー(株) 研究成果移転事業部長	
小鷹 光雄	タマティーエルオー(株) 産学官連携事業部 調査専門員	委

1. 3 成果概要

3機関が毎月1回行う研究開発推進委員会と適宜行う個別研究会で逐次摺り合わせを行い、計画通りの研究内容で進めることが出来た。

以下に開発テーマ毎の成果概要を示す。

1. 3. 1 新型周波数調整装置の開発

今年度は、昨年度改良した装置に下記に記した3つの基礎技術を搭載した。その結果、1612サイズでの周波数調整タクト：0.38s/pcs、周波数調整精度：±1.0ppmが得られた。これにより、月産400万個の生産（周波数調整）が可能となり、水晶メーカー各社の生産に大いに貢献することが出来る。また、米国の競合会社装置と大きく差別化を図ることも出来る。

今後は、本研究開発で得られた技術を更に発展させ、1210、1008サイズに対応した周波数調整装置に繋げていく予定である。

1. 3. 2 コンタクト技術の開発

今年度は、表面メッキの異なる（メッキ厚及びメッキ材質）プローブピンの耐久性評価を行った。Rhメッキプローブピンは耐久性に優れているがメッキ厚の管理が難しく、収縮したまま元に戻らない現象が発生した。一方、PdCoメッキプローブピンは、初期の接触抵抗値はAuメッキプローブピンと比較すると3～5倍高い。然しながら、50万回動作後の接触抵抗値は、Auメッキプローブピンは1桁増加するが、PdCoメッキプローブピンは2～3倍程度の増加に止まっている。従って、初期状態で校正処理を行うことにより、PdCoメッキプローブピンの方が安定して長寿命で使用可能となる。

また、水晶振動子の共振周波数の絶対・標準測定のための測定治具を考案し、設計・製作した。共振周波数の温度特性は最大でも、その偏差は±9ppm（基準値以下）であり、良好な結果が得られた。また共振抵抗の温度測定（R1）は、温度上昇に伴い共振抵抗が徐々に増えていく傾向にある。0℃から70℃の間で10Ω（誤差±5%）であり、許容誤差範囲と言える。同じ実験を、固定抵抗を用いて行った結果、固定抵抗では温度変動に寄らず一定値であった。すなわち共振抵抗が微小に変わるのは、振動子自身の特性であることが示された。

1. 3. 3 計測アルゴリズムの開発

水晶振動子の等価抵抗と計測回路とのインピーダンス整合をとることにより応答速度を約1/6に短縮することが可能となった（昨年度実績）。応答速度の改善効果により、水晶振動子の周波数計測時に於ける、周波数掃引ポイントを削減することが可能になる。

今年度は、水晶振動子の周波数測定時（3回測定し周波数を決定）の掃引ポイント数を削減し、計測時間を100ms以下に短縮することが可能となった。この結果、周波数調整時のタクトは0.4秒/個が可能となった。

1. 3. 4 イオンビーム用イオンガンの開発

今年度は実際の生産を考慮して、メンテナンスサイクルの改善を目的とした。

- ① Ar イオンビームを引き出すための2枚のグリッド電極（加速グリッドと遮蔽グリッド）間を絶縁するためのテフロン製スペーサ（名称：グリッド間スペーサ）の形状を変更した。
 - ② 加速グリッド上に敷いているテフロン製スペーサーを取り外した。
- 上記2つの改善により、イオンガンのメンテナンスサイクルは3倍以上に向上した（目標値：2倍）。

1. 4 当該研究開発の連絡窓口

事業管理機関 タマティーエルオー株式会社

産学官連携事業部 研究成果移転事業部長

電話 042-570-7240 FAX 042-570-7241

松永義則

E-mail: Matsunaga@tama-tlo.com

第2章 新型周波数調整装置

本研究開発で製作した新型周波数調整装置の外観を図 2-1 に示す。装置本体の寸法は幅：1000mm×奥行：1250mm×高さ：1825mm となっている。装置手前側が仕込室、処理室の真空槽であり、奥側が各種の制御機器が搭載されている操作盤になる。装置の操作は前面のタッチパネルで行い、周波数調整用の条件設定は PC から行う。装置右側面の赤丸で囲まれた部分にオペレータが水晶振動子を搭載した搬送キャリアを載せると、自動的に真空槽内へ搬送されるシーケンスとなっている。装置裏側下部の赤丸部には圧縮空気、冷却水、Ar ガスの導入口と導入圧力計を設けている。



図 2-1 新型周波数調整装置外観

新型周波数調整装置の仕様を表 2-1 に示す。装置構成は仕込室と処理室を有する 2 室型のロードロック式である。ロードロック式を採用することにより、

- ① 処理室は高真空状態を保持
- ② 生産タクトが向上
- ③ インライン装置への応用が可能といったメリットがある。また、処理室が常に高真空状態に保持されるため、
- ① イオンガンフィラメントの寿命が向上
- ② イオンガンの動作が安定

表 2-1 装置仕様

項目	仕様
対象パッケージ	1612,2016,2520,3225
装置構成	2室型(仕込室、処理室) ロードロック式
排気系	8インチ ターボポンプ
イオンガン	100mmビーム幅 24源×1基
測定系	ネットワークアナライザ×4式
周波数調整工程	2～4段階調整
周波数調整精度	±1ppm
周波数調整タクト	0.4秒/個

③ コンタミが舞わない

といったメリットもある。

周波数調整用イオンガンのビーム幅は100mmで、ビーム数は24源である。水晶振動子の周波数計測にはネットワークアナライザを使用する。周波数調整精度は±1ppmであり、その際のタクトは0.4秒/個である。

図2-2に処理室内部の概略を示す。パッケージサイズ1612に対応するためキャリア搬送機構とコンタクト機構の位置精度は10μmが得られている。

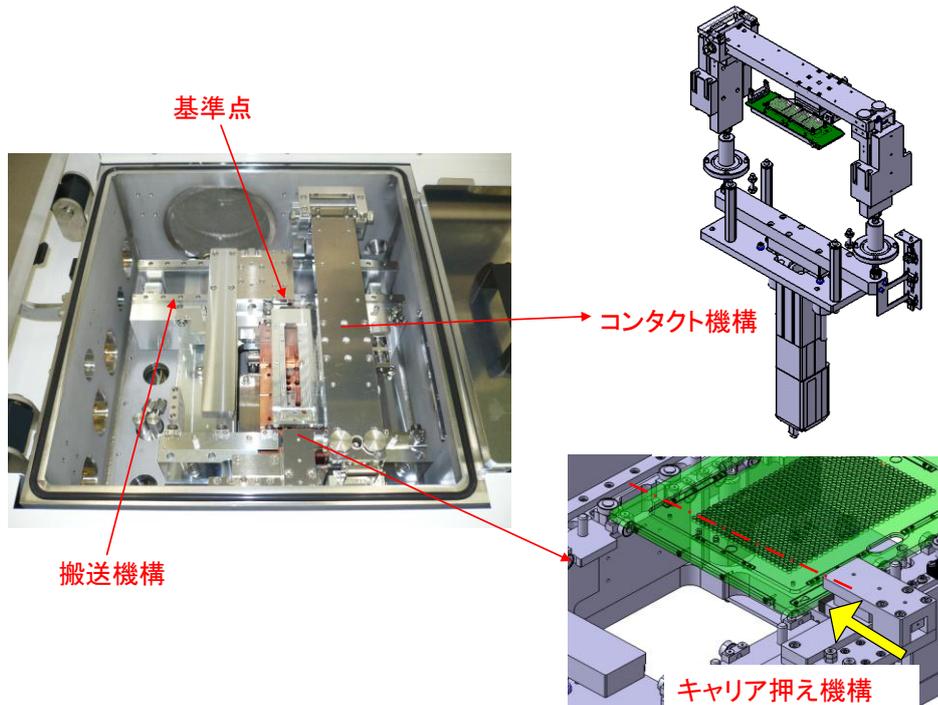


図 2-2 処理室内部の概略

実際に1612サイズの水晶振動子（周波数：24MHz、電極：Au）を周波数調整した結果を図2-3に示す。周波数調整工程は2段階で行い、1段階目の調整レートは1000ppm/s、2段階目の調整レートは100ppm/sとした。

調整精度は±1ppm、調整タクトは0.38秒/個と共に目標値を満足する結果が得られた。

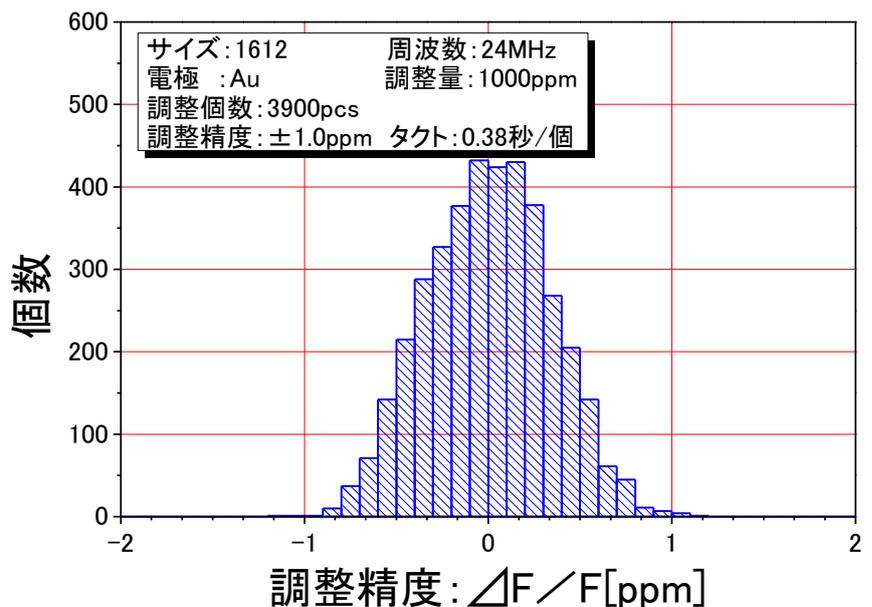


図 2-3 周波数調整結果

第3章 コンタクト技術の開発

3.1 高耐久性プローブピンの開発

新型周波数調整装置で使用しているプローブピンの構造を図3-1に示す。プローブピンはプランジャ・ボトム、バーレル、スプリング、プランジャ・トップの4つの部品で構成されている。両側のプランジャはスプリングで伸縮する構造となっている。プランジャ・ボトム（水晶振動子との接触側）表面のメッキ材には、従来はAuを使用していたが、本研究ではPdCoを評価した。また、先端部の外形は $\phi 0.21\text{mm}$ で形状は逆円錐型となっている。

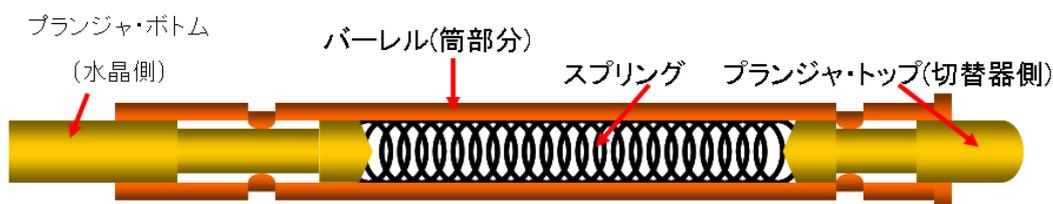


図3-1 プローブピン構造

各プローブピンの評価結果を図3-2、3-3に示す。従来のAuメッキプローブピンは連続動作回数が20万回を越えるあたりから接触抵抗が増加し始め、50万回動作後では約1~5 Ω となり、初期値と比較すると約3~10倍に増加しているのが判る。一方、プランジャ表面をPdCoでメッキしたプローブピンは初期値が0.8 Ω 前後とAuメッキプローブに比べて約3~5倍高くなっている。然しながら、50万回動作後は1 Ω 前後であり、初期値と比較すると1~2倍程度の増加である。従って、初期状態で計測系を校正することにより、PdCoメッキプローブピンはAuメッキよりも長期間安定して使用することが可能である。

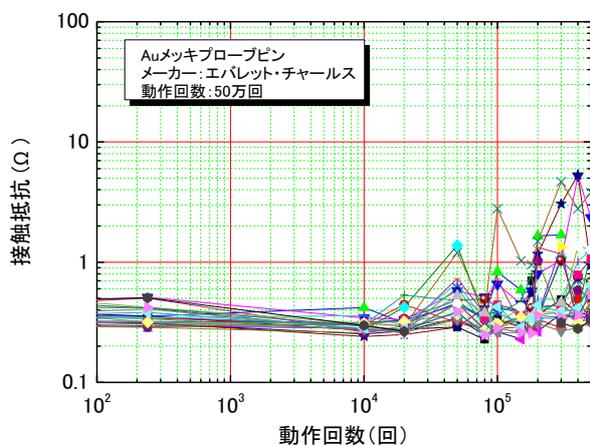


図3-2 Auメッキ評価結果

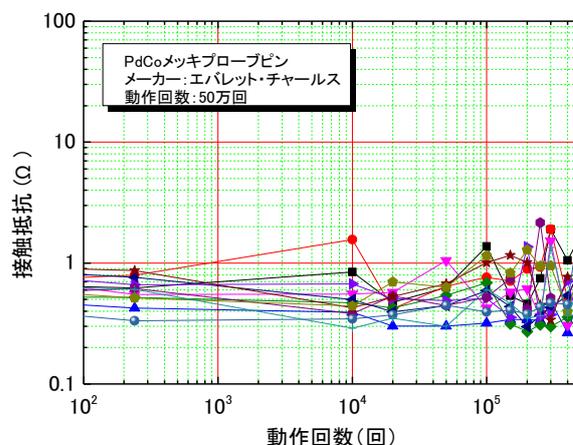


図3-3 PdCoメッキ評価結果

3. 2 基準測定治具の開発

図 3-4 は本研究開発で製作した 1612 サイズ型水晶振動子用測定治具である。この治具は、反射法により被測定振動子の無誘導周波数および無誘導抵抗の測定を行うもので、反射法の校正は、1) 特性インピーダンスでの終端(Termination)、2) 短絡(Short)、3) 開放(Open)が行える 3 種類の標準素子を取り付けることで行う。



図 3-4 1612 型水晶振動子用測定治具

治具全体は、全て同軸構造として特性インピーダンス (50Ω) からの偏差が最小となるように考慮した。また、測定される振動子の大きさにあわせ、同軸接地電極の内径 1.00 mm が同軸変換アダプタ (1.00mm-3.5mm) の 1.00mm 側表面を平坦に加工したアダプタを製作した。

本治具を使用して共振周波数の温度特性を測定した。常温 (25°C) から 70°C まで昇温させ、次は 0°C まで降温させた。更に、再び 25°C まで昇温させた。結果を図 3-5 に示す。この図から分かるように温度特性に対する周波数偏差は ± 9 ppm (基準値以下) であり、良好な結果であることが分かる。更に、温度に対する共振周波数も昇温/降温とも一致する結果が得られている。

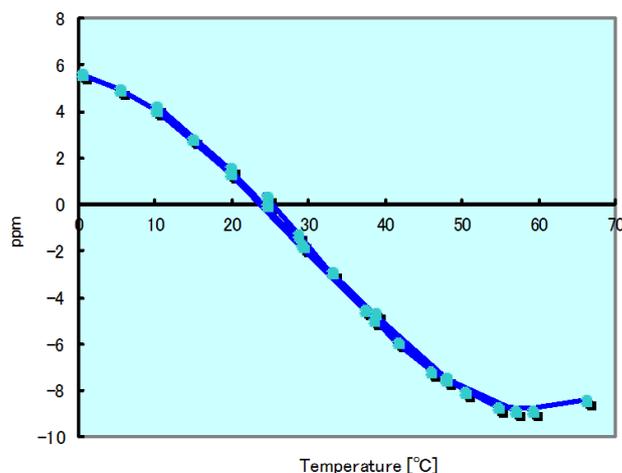


図 3-5 共振周波数の温度特性

第4章 計測アルゴリズムの開発

水晶振動子の周波数測定は π 回路とネットワークアナライザを用いた伝送法を用いている。従来の π 回路は、水晶振動子側から見たインピーダンスが 12.5Ω となっている。

本研究では、 π 回路のインピーダンス増大化に伴い水晶振動子の応答時間は短縮傾向にあることから（図4-1 応答速度結果参照）、 π 回路のインピーダンスをFL近傍のリアクタンス値と同程度とした。その結果、応答時間は従来よりも1/6に短縮することが可能となった。

応答時間が短縮したことによりネットワークアナライザの周波数掃引ポイント数の削減も可能となる。具体的には、3回行う周波数測定の内、1回目のポイント数を30%削減、2回目のポイント数を20%削減、更に3回目を10%削減した。3回合計の計測時間は98msとなり、目標とする100ms以下の結果が得られた。

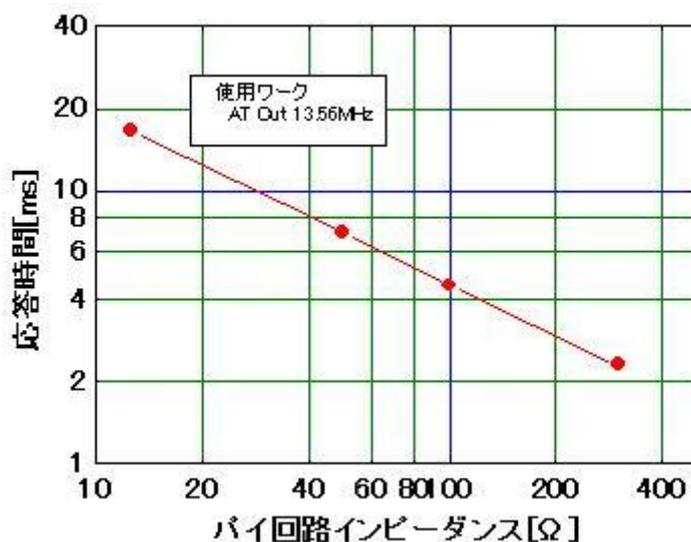


図4-1 応答速度

第5章 イオンガンの開発

本研究開発で製作したイオンガンは、

- ① 2式のフィラメント（カソード）を個別に制御
- ② 補助磁石による最適化した磁場分布

といった特長を有しており、ビーム幅：100mmでのイオン電流密度分布は $\pm 10\%$ 以下である（図5-1 参照）。

また、実際の生産を考えると長時間にわたる安定動作が重要となるため、最大出力による加速試験を行った。図5-2は200時間の加速試験前後でのイオン電流密度分布である。図より200時間の加速試験後でも $\pm 10\%$ 以下の安定した分布が得られているのが判る。

更にメンテナンスサイクルは初年度から比べると3倍以上に改善され、メンテナンス時於けるグリッド交換に要する時間も1/3に短縮することが出来た。

イオンガン電源内部のノイズ対策としては、イオンガン本体と電源回路間にノイズ対策回路を付加した。ノイズ対策回路の付加によるイオン電流密度の低下等は無く正常に動作している。

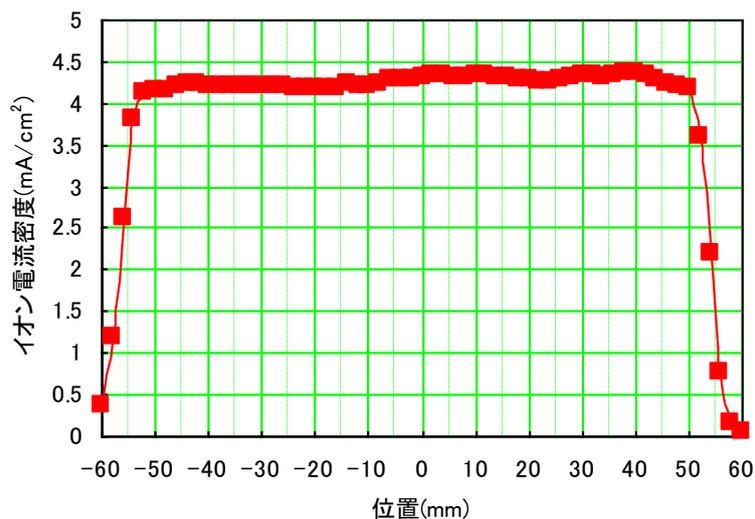


図 5-1 イオン電流密度分布

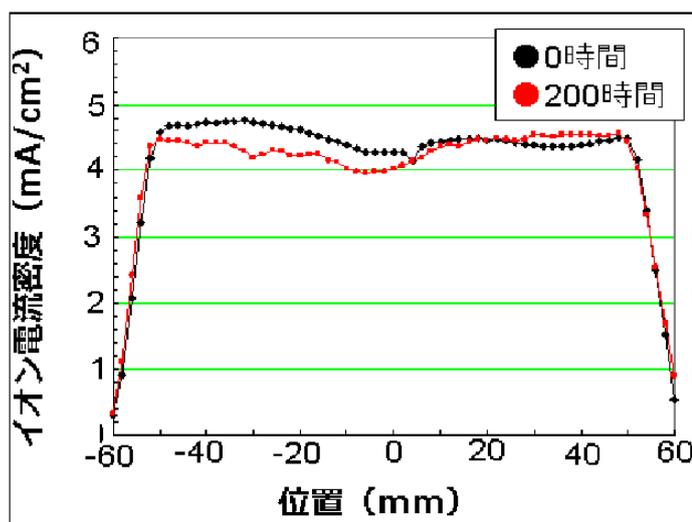


図 5-2 加速試験前後でのイオン電流密度分布

第6章 全体総括

関東経済産業局の委託により平成 22、23、24 年度戦略的基盤技術高度化支援事業における 3 年間の研究成果を総括する。

6. 1 研究開発の概要

6. 1. 1 プロジェクト名

水晶振動子極小化に対応した周波数調整技術の研究開発
(呼称：COM プロジェクト)

6. 1. 2 研究組織

事業管理者：タマティーエルオー株式会社

再委託先：株式会社昭和真空、三生電子株式会社、公立大学法人首都大学東京

PL：高橋 理（株式会社昭和真空 取締役技術本部長）

SL：渡部泰明（公立大学法人首都大学東京大学院 理工学研究科教授）

アドバイザー：櫻田 武（株式会社ケンウッド・デバイス 技術部 課長）

6. 1. 3 研究背景と目的

近年の電子機器は、高機能化と複合化、そして小型化・薄型化に拍車がかかり、様々な電子部品は小型化の一途を辿っている。水晶振動子のパッケージサイズも従来使用されていた 7.0mm×5.0mm サイズ（通称：7050）から 5.0mm×3.2mm サイズ（5032）へと移り、現在では 3.2mm×2.5mm サイズ（3225）が市場の主流を成している。更には 2.0mm×1.6mm サイズ（2016）から 1.6mm×1.2mm サイズ（1612）といった極小サイズも上市され始めてきている。

水晶振動子の小型化に伴い周波数調整装置もパッケージサイズに合わせた技術を取り入れて来たが、7050, 5032 サイズから 3225, 2520 サイズへの移行は従来技術の延長線での対応が可能であった。しかし、今後の主流となる 2016, 1612 サイズへの移行は従来技術の延長だけではなく新技術の導入が不可欠である。従って、本研究では極小パッケージサイズと量産型に対応した新型周波数調整装置の開発を目的とした。

6. 1. 4 研究開発実施内容

本研究では極小パッケージサイズと量産型に対応した新型周波数調整装置を開発するため、以下に記したメインテーマ及び 3 つのサブテーマを設定し、研究開発を行った。

① 新型周波数調整装置の開発（メインテーマ）【実施機関：株式会社昭和真空】

以下の②～④の基礎技術を搭載し、パッケージサイズ 1.6mm×1.2mm（1612）に対応、周波数調整精度：±1ppm、生産量：月産 400 万個（生産タクト：0.4 秒/個）を目標とした。

② コンタクト技術の開発（サブテーマ）

【実施機関：株式会社昭和真空、公立大学法人首都大学東京、三生電子株式会社】

高信頼性プローブピンの開発（耐久性 20 万回以上）と 1612 サイズ用基準測定治具の開発を行った。

③ 計測アルゴリズムの開発（サブテーマ） 【実施機関：株式会社昭和真空】

水晶振動子の周波数を高速で計測するため、計測アルゴリズムの開発を行った。

④ イオンビーム用イオンガンの開発（サブテーマ） 【実施機関：株式会社昭和真空】

長時間連続動作に耐え、従来品よりメンテナンス・サイクルを延ばすイオンガンの開発を行った。

6. 2 研究開発成果

6. 2. 1 新型周波数調整装置の開発

本研究で開発する周波数調整装置は、

- 1) 1612 サイズに対応
- 2) 周波数調整精度：±1ppm
- 3) 周波数調整タクト：0.4 秒/個

を目標とした。この目標を達成するため

本研究で開発した周波数調整装置には、

- ① 極小パッケージに対応したコンタクト機構
- ② 極小パッケージに対応したキャリア搬送機構
- ③ 高速計測が可能な周波数計測アルゴリズム
- ④ ビーム幅：100mm のイオンガン

を搭載している。

実際に 1612 サイズの水晶振動子を周波数調整した結果、周波数調整精度は±1.0ppm、周波数調整タクトは 0.38 秒/個と共に目標値を達成する結果が得られた。

また、本装置は 2 室型（仕込室、処理室）のロードロック方式を採用しているため、処理室は常に高真空状態に保たれている。従って、極めて安定した周波数調整が可能となる

6. 2. 2 コンタクト技術の開発

1) コンタクト機構の開発

極小パッケージサイズに対応したコンタクト機構の開発を行い、新型周波数調整装置に搭載した。実際の生産時に重要となるコンタクト機能の着脱再現性評価を、測定不良率及び周波数安定度の観点から行った。コンタクトアーム及びコンタクトブロック着脱時に於ける測定不良率は目標値：0.5%に対して実測値は共に 0.1%以下と極めて良好な結果が得られた。周波数安定度は、目標値：0.1ppm に対して実測値は 0.1ppm 以下と実用上問題の無い良好な結果が得られた。

2) 高信頼性プローブピンの開発

ボトム側プランジヤ表面をPdCoでメッキしたプローブピンは、初期値が 0.8Ω 前後とAuメッキプローブに比べて約3~5倍高いが、初期値と50万回動作後を比較すると1~2倍程度の増加率であった。従って、初期状態で計測系を校正することにより、PdCoメッキプローブピンは、Auメッキよりも長期間安定して使用することが可能である。

また、開発したプローブピンは周波数調整装置の前後工程である過励振装置と中間検査装置で共用することも可能である。

3) 基準測定治具の開発

基準測定治具を用いて水晶振動子の共振周波数の測定を行った。共振周波数の温度特性は最大でも、その偏差は ± 9 ppm（基準値以下）であり、順当な結果であることが分かる。また共振抵抗の温度測定（R1）は、温度上昇に伴い共振抵抗が徐々に増えていく傾向にある。 0°C から 70°C の間で 10Ω （誤差 $\pm 5\%$ ）であり、許容誤差範囲と言える。同じ実験を、固定抵抗を用いて行った結果、固定抵抗では温度変動に寄らず一定値であった。すなわち共振抵抗が微小に変わるのは、水晶振動子自身の特性であることが示された。

次に、水晶振動子を発振状態で使用することを目的に、その温度特性について調べた。発振周波数は 47.99 MHzである。まず、温度 25.00°C に維持した状態で、約90日に渡る長期安定度測定を試みた。なお周波数基準には、セシウム原子発振器を用いている。これより分かったことは、最大でも ± 0.2 ppm以内の精度・確度であり、 ± 0.2 ppm/月の周波数安定度から比べると、非常に安定していることが判った。

6. 2. 3 計測アルゴリズムの開発

ネットワークアナライザとの組み合わせで使用している π 回路のインピーダンスを従来の 12.5Ω から 200Ω に変更することにより、水晶振動子の応答時間は従来の18msから3msと1/6に短縮することが可能になった。

また、応答時間が短縮したことによりネットワークアナライザの周波数掃引ポイント数の削減も可能となる。具体的には3回行う周波数測定の内、1回目のポイント数を30%削減、2回目のポイント数を20%削減、更に3回目を10%削減した。3回合計の計測時間は98msとなり、目標とする100ms以下の結果が得られた。

6. 2. 4 イオンビーム用イオンガンの開発

フィラメント（カソード）構成の最適化と磁気回路の最適化を行うことで、ビーム幅100mmにて、最大イオン電流密度 $10\text{mA}/\text{cm}^2$ 及びイオン電流密度分布 $\pm 10\%$ 以下の良好な結果が得られた。

連続生産を考慮したイオンガンの加速試験では200時間を超えるフィラメント寿命を確認した。実際の周波数調整工程を考慮すると約300時間に相当し、目標値を満足する結果が得られた。加速試験前後でのイオン電流密度分布も $\pm 10\%$ 以下と良好な結果である。

また、メンテナンス・サイクルは、従来比：3倍以上の結果が得られ、目標値を上回る良好な結果である。更に、メンテナンス時に於けるグリッド交換時間は約 1/3 に短縮することが可能となった。

6. 2. 5 工業所有権

1 件の特許を出願した。

特願 2012-043992

発明の名称：基板位置決め装置

発明の概要：搬送キャリアの位置精度向上 1/100 以下

6. 3 研究開発後の課題・事業展開

3 年間のプロジェクト成果として以下の基礎技術が得られた。

- ① 極小サイズ用コンタクト機構
- ② 極小サイズ用搬送機構
- ③ 高耐久性プローブピン
- ④ ビーム幅：100mm イオンガン
- ⑤ 計測時間短縮アルゴリズム
- ⑥ 基準測定治具による測定系の校正

平成 25 年度は、これらの基礎技術を搭載した、1612 サイズ対応の周波数調整装置を 4 月にリリースする予定である。平成 25 年度及び 26 年度の販売台数は各 30 台を予定している。

市場では 1210 サイズの水晶振動子も上市されており、この 2～3 年で 1612 サイズから 1210 サイズへと移行していくものと思われる。この市場要求に応えられるよう、極小化に向けて技術開発を継続していく。

6. 4 おわりに

平成 22、23、24 年度の 3 年間にわたり、タマティーエルオー(株)の管理法人および高橋理(株)昭和真空技術本部長の PL、渡部泰明公立大学法人首都大学東京教授の下に研究開発を進めてきた。本研究開発を委託された関東経済産業局、アドバイザーとして貴重なアドバイスを頂いた櫻田武(株)ケンウッド・デバイス課長およびオブザーバーとしてご参加いただいた沖川八王子市相談員および中小企業基盤整備機構の有識者の方々をはじめ、ご関係各位に厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] 「水晶振動子とその使い方 トリケップス技術資料集 第57号」 pp1
(株)トリケップス
- [2] 塩野忠久 「水晶振動子の周波数調整に関する研究」 博士論文 pp4-5, pp72-
80, pp109-135 2008年3月
- [3] 「水晶デバイス動向説明会(2011年・春)」 日本水晶デバイス工業会
- [4] 電波新聞 2011年1月31日付 4面 (株)電波新聞社
- [5] 「水晶デバイスの技術動向(2010年)」 日本水晶デバイス工業会