

研 究 報 告 書

「分極反転構造の圧電トランス薄膜音響共振子による電波発電」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2016 年 10 月～2020 年 3 月

研 究 者: 柳 谷 隆 彦

1. 研究のねらい

大量のパッシブセンサを用いて、あらゆるモノや家電製品がインターネットにつながる IoT 社会の到来が期待されている。一方、ここ十年で通信用周波数バンドの数は何倍にも増加し、環境の電磁波エネルギー密度は年々増加している。5G 規格の立ち上げや、人工密集地における新たな近距離無線通信の普及が予想されており、さらなるエネルギー密度の増大が見込まれる。本研究は、独自の結晶配向制御技術を用いてGHz帯の新しい圧電薄膜昇圧素子を開発し、電磁波発電用のアンテナ整流器へ応用を目指すものである。

アンテナ整流器内のダイオードの電波⇄直流電圧の変換効率、微小なエネルギーの電波に対しては電波の電圧が大きいほど増大する。そのため環境電磁波を十分に昇圧する必要がある。また、地上デジタル放送やスマートフォン通信、無線 LAN 等が最も密集しかつ、エネルギー密度の高いUHF帯(300MHz～3GHz)からエネルギーを得なければならない。

そこで本研究では、現状GHz帯で最も圧電性と機械品質係数Q値が高いScAlN圧電薄膜を用いて、c 軸ジグザク傾斜積層構造を作製する。これにより地デジ帯で動作する昇圧素子を作製し、10倍を超える開放電圧の増幅を目指した。

2. 研究成果

(1) 概要

分極反転構造を持つ圧電薄膜の形成とアンテナ整流器(レクテナ)向けのトランス応用について提案した。地デジ帯を想定して、動作周波数は 500 MHz 付近になるように層厚を調整している。スパッタ源を自作し、斜入射スパッタ成長法を採用することにより、c 軸が傾斜しかつ高配向性を保った ScAlN 薄膜の成長を実現した。さらに分極反転多層構造(12 層ジグザク傾斜反転 ScAlN 薄膜)の形成に成功した。4 層時の $k_{15}^{'2}$ の平均値は 11.3%と非常に良好である(横波の電気機械結合係数では、他機関と比べて最高値)。HBAR 構造(基板付き共振子構造)の 4 層ジグザク傾斜反転 ScAlN 薄膜トランス共振子では、入出力開放電圧において 12 倍の増幅を実現し、等価回路モデルによるシミュレーション結果とも良い一致を示した。さらに、犠牲層エッチングを用いて FBAR 構造(基板除去構造)のトランスも実現し、比帯域幅を HBAR 構造に比べて 30 倍改善させた。また、1MHz付近の AM 帯を目指した昇圧素子も PZT 圧電セラミックス板を積層させて形成し、5 倍を超える増幅を得た。今後、この昇圧素子をアンテナ整流器に搭載することにより、高効率な微小電波—直流電圧の変換が期待できる。

(2) 詳細

研究テーマ A「c 軸ジグザク傾斜反転 ScAlN 薄膜を用いた地デジ帯の昇圧素子の実現」

一般的に電波から直流電圧への変換には、図 1 に示すようなアンテナと整流回路(レクチファイア)を組み合わせたレクテナと呼ばれる素子が使われる。レクテナの変換効率は、ダイオ

ードにしきい電圧がかかる際に、最大となることが知られている。しかしながら、一般的な都会の電波環境においても電磁波強度は微弱であり、効率を引き出すことは難しい。そこで、電波の振幅を増幅するために Dickson charge pump などの昇圧回路が良く用いられる。しかし、昇圧回路には GHz 帯での効率低下やインピーダンス不整合、大型化の問題がある。

そこで、本研究では圧電薄膜音響共振子(FBAR)と圧電トランスの両方の機能・構造を組み合わせた新しい圧電トランス薄膜音響共振子について提案した(図 1)。この構造では、ある特定の周波数の超高周波をトランス機能により増幅できると考えられる。

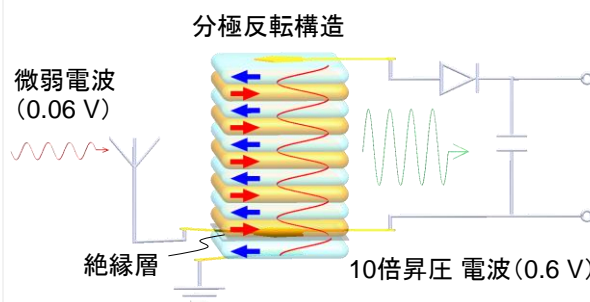


図 1 新しい圧電トランス薄膜音響共振子のレクテナ用昇圧回路への応用

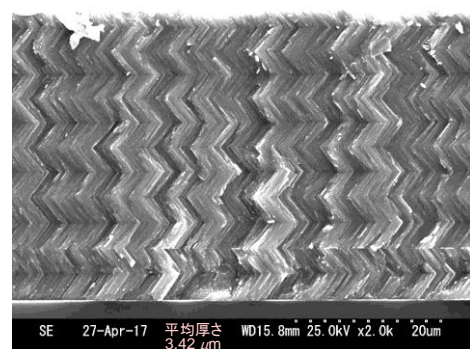


図 2 c 軸ジグザク傾斜配向 ScAlN 薄膜の断面 SEM 画像

本研究室では RF マグネトロンスパッタ法において、スパッタ粒子を基板に対して斜めに入射させることで、c 軸が傾斜した ScAlN 薄膜を成長させる独自技術を保有している。本研究では、各層成膜ごとに基板を 180° 回転させて傾斜角度がジグザクに反転した 12 層の ScAlN 薄膜(ジグザグ構造)の成長を試みた。

まず、単層の c 軸傾斜 ScAlN を成長させ、擬似すべりモードの電気機械結合係数 k_{15}' の c 軸傾斜角度依存性を測定した。その結果、Sc 濃度が上がるに従って k_{15}' が高くなることを確認した。 $k_{15}'^2$ は最大で 17%にも達し、これはすべりモードの圧電薄膜としては、最高の値である。図 2 に作製した c 軸ジグザク傾斜配向 ScAlN 薄膜の断面 SEM 画像を示す。狙いどおり微結晶が 45° 程度傾斜し互いにジグザクに反転したジグザグ構造が形成されていることがわかる。

次に基板を含む HBAR 構造のトランス共振子を作製した。0.5 mm 厚の石英ガラス基板の表面と裏面にそれぞれ 4 層と 1 層の傾斜ジグザグ反転 ScAlN 薄膜を成長させた。

図 3 と図 4 に 4 層構造の(0002)面極点図と断面 SEM 写真をそれぞれ示す。(SEM 写真で) 右に傾斜した偶数層由来の極および左に傾斜した奇数層由来の極がそれぞれ上下に観測されていることがわかる。偶数層の傾斜角度ばらつきの平均を示すピーク角度は $\chi = 45^\circ$ 、奇数層は $\chi = 44^\circ$ でほぼ目標どおりである。傾斜角度ばらつきを示すピーク半値幅は偶数と奇数層でそれぞれ 9.1°、11° であった。X 線の吸収を考えるとあくまで下層部より上層部の配向性を反映したデータではあるものの、全体の傾斜角度ばらつきは良い。

トランスの増幅特性の評価のためには、両面を同時にプロービングする必要がある。そこで基板両面を左右から RF プローブで挟む測定系を構築した。図 5 にネットワークアナライザを

用いて測定した S パラメータにより、計算した開放電圧の入出力電圧比を示す。500 MHz 付近の地デジ帯において 12 倍程度の良好な電圧増幅が得られていることがわかる。Mason の等価回路モデルによる理論値と比べても、遜色なく、特性も良く合っていることがわかる。図 6 に通過特性を示す。500 MHz 付近の動作周波数において、低損失な特性が得られており、図 7 の等価回路モデル(青線)とも良い一致を示している。

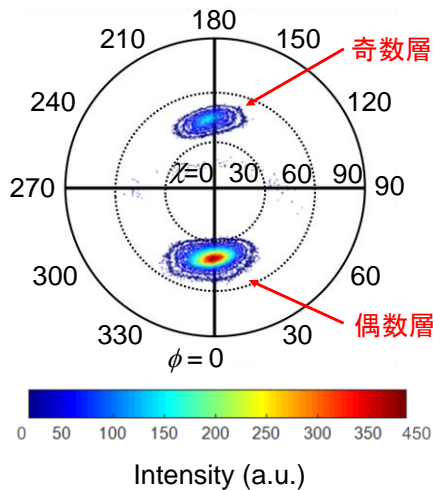


図 3 c 軸ジグザク傾斜配向 ScAlN 薄膜 (4 層)の(0002)極点図

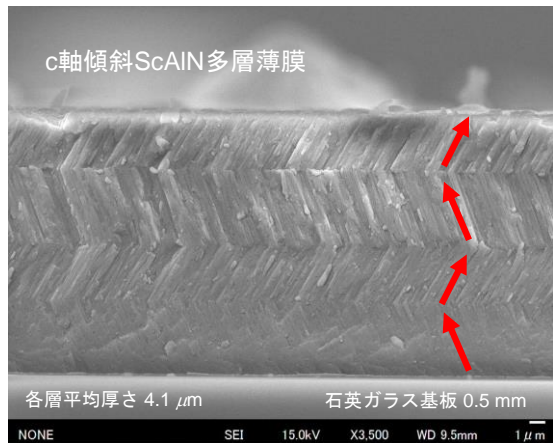


図 4 c 軸ジグザク傾斜配向 ScAlN 薄膜 トランスの断面 SEM 写真

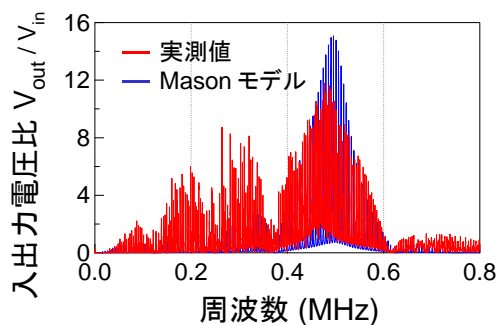


図 5 傾斜ジグザク反転トランスの入出力電圧比(開放電圧)の実測値と Mason の等価回路モデル(図 7)による理論値

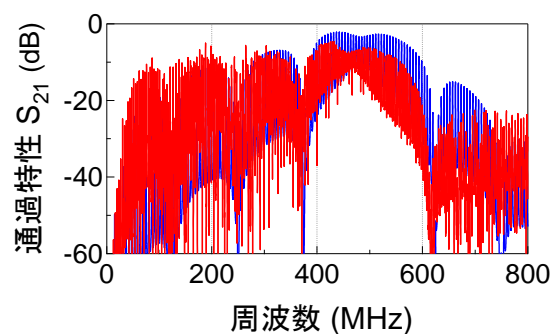


図 6 傾斜ジグザク反転 ScAlN 薄膜トランス共振子の通過特性の実測値と Mason の等価回路モデル(図 7)による理論値

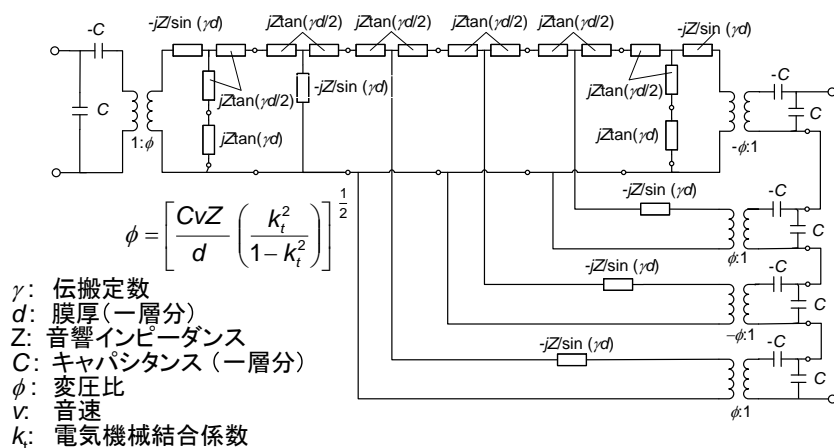


図 7 N 層の分極反転構造を持つ圧電トランス共振子の Mason 等価回路モデル

研究テーマ B「積層 PZT 板を用いた AM 帯の昇圧素子の実現」

ラジオ放送に広く用いられている AM 放送波帯での電波増幅を試みた。今回、電気機械結合係数の大きな PZT(チタン酸ジルコン酸鉛)板を用いた。図 8 に示すように、PZT の分極方向を上下に反転させて積層した構造を用いて 5 倍程度の電圧増幅に成功した。また、積層する層数を増やすことで電圧増幅率が増えることも確認された。

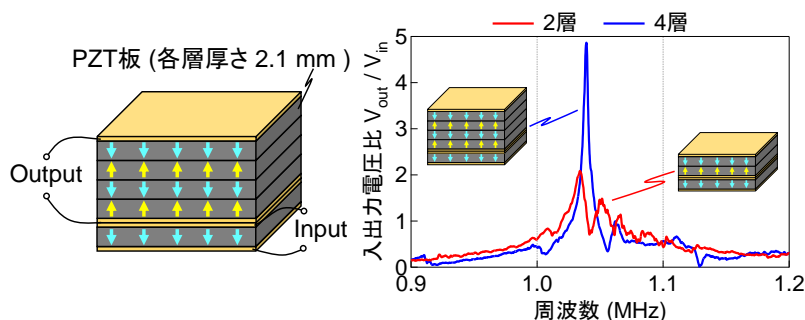


図 8 AM 放送波帯(1 MHz)におけるバルク PZT 積層圧電トランスの電圧増幅率周波数特性

研究テーマ C 「自立構造 c 軸ジグザグ傾斜反転 ScAlN 薄膜を用いた地デジ帯の広帯域昇圧素子の実現」

前述研究テーマ A の基板付き圧電トランスでは基板の多重共振が原因で Q 値は高いものの帯域は狭い。単一の周波数で使う用途には最適だが、広帯域でのエネルギーハーベスティングには不向きである。そこで、基板を挟まない ScAlN のジグザグ多層構造を用いた圧電トランスの作製を試みた。

図 9 のように 4 層ジグザグ構造を用いた自立構造の基板なし圧電トランスを作製した。図 9 のように ScAlN ジグザグ薄膜(出力側)は犠牲層の上に成膜され、中間電極を作製した後に ScAlN 傾斜単層薄膜(入力側)を作製した。その後にヨウ素溶液によって犠牲層(Au)を除去し、上部、下部のパターン電極を作製することで基板を挟まない ScAlN のジグザグ多層構造を用いた圧電トランスの作製に成功した。

作製した圧電トランスの断面 SEM 画像を図 10 に示す。ジグザグ構造が作成されていることが

確認できる。また、作製した圧電トランスの通過特性と入出力比の周波数特性をネットワークアナライザで測定した結果を図 11 に示す。地デジ帯において、入出力比約 3 倍の電圧増幅を得ていることがわかる。また図 12 の通過特性について基板付き圧電トランスと比較すると、30 倍広帯域化に成功している。さらに、電気機械伝送線路モデルとも良い一致を示した。

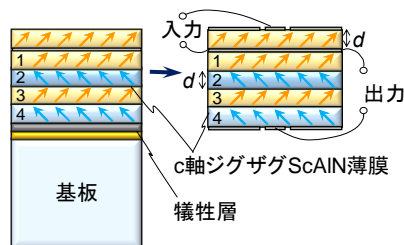


図 9 自立構造の基板なし
圧電トランス

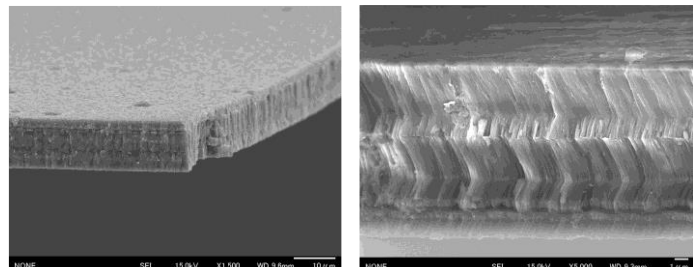


図 10 自立構造の 4 層傾斜ジグザグ反転 ScAlN 薄膜
トランスの断面 SEM 画像(右は拡大図)

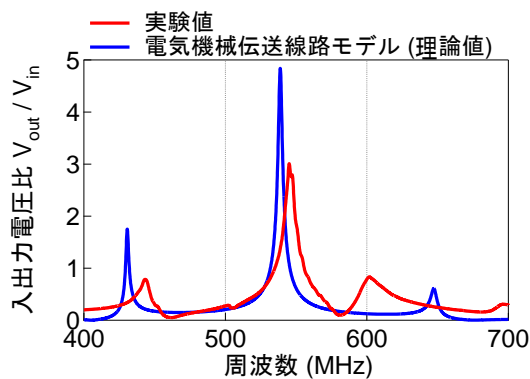


図 11 自立構造傾斜ジグザグ反転トランス
の入出力電圧比(開放電圧)の実測値と
Mason の等価回路モデル(図 7)による理論
値

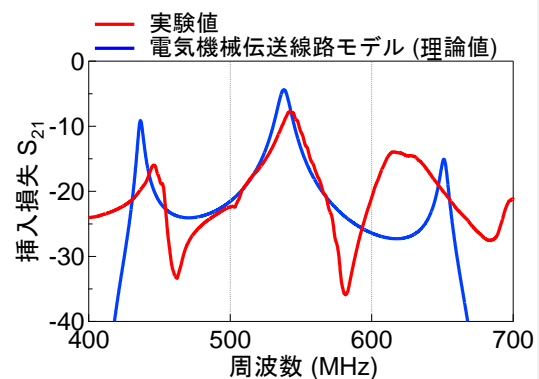


図 12 自立構造傾斜ジグザグ反転 ScAlN
薄膜トランス共振子の通過特性の実測値
と Mason の等価回路モデル(図 7)による理
論値

3. 今後の展開

本研究の圧電トランスを実用化するには、量産化による低コスト化が必要である。そのためには、本研究独自の c 軸傾斜配向 ScAlN をシリコンウエハ全面に均一に成長させる技術を確立しなければ半導体プロセスに載らない。今後ウエハ全面の素子試作を目指して、成膜装置・手法の開発に取り組む。またレクテナへの実装、試作、動作実証も重要な課題であり、今後レクテナ全体を含めたモデル化、最適化にも取り組んでいく。

4. 自己評価

研究の達成状況：

重要な地デジ帯域において、最終目標 10 倍増幅に対して、12 倍増幅を実現しており目標を超える成果が出ている。その他、UHF 帯において横波の電気機械結合係数のワールドレコードの

達成、圧電薄膜を用いた分極反転多層構造の世界初の実現、圧電トランス薄膜共振子のモデル化など得られた成果は大きい。

研究の進め方：

クライオポンプや XRD 装置などの購入設備により、大幅に薄膜の結晶性が向上しており、本研究に果たした役割は大きく、効果的に予算を執行できている。

研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果：

今後、大面積成膜が実現すれば、多くのレクテナ素子に標準的に搭載される可能性があり、波及効果は大きい。また特筆すべきところは、分極反転構造の圧電トランス薄膜共振子のモデル化(等価回路モデル)に初めて成功したことにもあり、実験結果や現象を良く説明している。本モデルは汎用の回路シミュレータにプラグインすることもでき、レクテナ全体の特性を知ることができる。素子をモデル化できることは社会実装に向けて大きな意義を持っている。

5. 主な研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表

1. T. Shimidzu, T. Mori, and T. Yanagitani, "Frequency-switchable polarity-inverted BAW resonators based on PZT/PTO epitaxial films using difference in coercive field," Appl. Phys. Lett., vol. 114, no. 21, pp. 212902, (2019).
2. T. Shimidzu and T. Yanagitani, "Frequency-switchable polarity-inverted BAW resonators based on electric-field-induced piezoelectric PMN-PT/PZT epitaxial film stacks," J. Appl. Phys. vol. 126, pp. 114104 (2019).
3. K-h. Sano, R. Karasawa, and T. Yanagitani, "ScAlN thick film ultrasonic transducer in 40 MHz-80 MHz," IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq.Contr. vol. 65, no. 11, pp. 2097 – 2102, (2018).
4. M. Kawabe, S. Takayanagi, H. Ichihashi, M. Suzuki, T. Yanagitani and M. Matsukawa, "Rapid wave velocity measurement by Brillouin scattering using coherent phonons induced by ScAlN piezoelectric thin-film transducer," IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq.Contr. vol.65, no.10, pp.1882-1887, (2018).
5. S. Tomita, T. Yanagitani, S. Takayanagi, H. Ichihashi, Y. Shibagaki, H. Hayashi, and M. Matsukawa, "Evaluation of the acoustoelectric effect in the thickness direction of c-plane ZnO single crystals by Brillouin scattering," J. Appl. Phys. vol. 121, 235102 (2017)

(2)特許出願

研究期間累積件数:5 件(公開前の出願件名については件数のみ記載)

1.

発 明 者: 柳谷隆彦, 唐澤嶺

発明の名称: トランス及び該トランスを用いたレクテナ

出 願 人: 早稲田大学

出 願 日: 2017/04/28

出 願 番 号: 特願 2017-090568

2.

発 明 者: 柳谷隆彦, 鈴木雅視

発明の名称: Piezoelectric layer and piezoelectric device comprising the piezoelectric layer

出 願 人：早稲田大学
出 願 日：2017/03/30
出 願 番 号：PCT/IB2017/000451

3.

発 明 者：中村大輔、永岡直樹、黒瀬愛美、待永広宣、柳谷隆彦
発明の名称：圧電デバイス、及び圧電デバイスの製造方法
出 願 人：日東電工株式会社
出 願 日：2018/09/28
出 願 番 号：特願 2018-185549

4.

発 明 者：柳谷隆彦，鈴木雅視
発明の名称：Piezoelectric layer and piezoelectric device comprising the piezoelectric layer
出 願 人：早稲田大学
出 願 日：2017/03/30
出 願 番 号：US20190089325A1

5.

発 明 者：柳谷隆彦，鈴木雅視
発明の名称：Piezoelectric layer and piezoelectric device comprising the piezoelectric layer
出 願 人：AVAGO TECHNOLOGIES LIMITED
出 願 日：2017/03/30