

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01432

研究課題名(和文) 弾性表面波を用いたゲート駆動回路の高性能化と次世代マルチレベルインバータへの応用

研究課題名(英文) Improvement of gate-drive circuit using surface acoustic wave devices, and application to a next-generation multi-level inverter

研究代表者

五箇 繁善 (Goka, Shigeyoshi)

東京都立大学・システムデザイン研究科・准教授

研究者番号：80305416

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：次世代電力変換回路の多重化・高信頼化を実現するため、弾性表面波(SAW)を用いたゲート駆動回路の高性能化を最適なSAWフィルタ構造を探索することで実現した。従来のSAWフィルタには要求されない高い絶縁破壊電圧と、十分な伝送電力量を両立するため、新たな視点からSAW構造を設計・作製・評価した。SiO₂/Al/LiNbO₃構造により3500V以上の電気的絶縁特性が得られ、さらにSiO₂/Pt/Al/LiNbO₃構造の一方方向性電極を適用することにより、1chあたり700mW以上の電力伝送と3dB以下の挿入損失を実現した。また、12ch信号伝送試験および電力伝送時のパラメータ最適化についても検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

弾性表面波(SAW)を用いたゲート駆動回路の実用化・普及化に向けた高性能化への研究を通じ、電力変換回路に特化したSAWフィルタの電気的・物理的特性を明らかにすることが出来た。特に電気的絶縁性能はSAWデバイス上部に誘電体層を積むことで飛躍的に向上できることを明らかにし、今後の電力変換分野で必要とされる基礎的な特性・指標を得る事ができた。本研究での成果は、次世代スイッチングデバイスの有効利用領域の拡大や、マルチレベルインバータの普及に伴う省エネルギー化に貢献できると考えられる。

研究成果の概要(英文)：To increase technological advantages of the proposed gate-drive circuit using surface acoustic wave (SAW) devices, a new SAW filter structure design was developed from a new viewpoint to balance enough transmission electric energy and high breakdown voltage that was not required in conventional SAW filters. The measured electrical insulation properties more than 3,500V were obtained by using SiO₂/Al/LiNbO₃ structure. The fabricated transversal-type unidirectional transducers with SiO₂/Pt/Al/LiNbO₃ structure showed the electricity transmission power more than 700mW per channel and the insertion losses less than 3dB. In addition, the optimum parameter estimation method of the power transmission was proposed and the 12ch signal transmission examination were performed.

研究分野：回路システム工学

キーワード：次世代ゲート駆動回路 SAWデバイス 次世代電力変換回路 マルチレベルインバータ

1. 研究開始当初の背景

電力変換回路の研究領域において、マルチレベルインバータと呼ばれるスイッチング素子を多数用いる回路が国内外で活発に議論されている。海外メーカを始め太陽光発電用途などにマルチレベルインバータは実用化しつつあり、電力変換効率は1%程度の向上が実現している。高電圧回路については、高信頼かつ低損失な低耐圧素子を多数直列接続することで実現できるメリットからスマートグリッドなど送配電システムへの適用も期待されている。しかし、多数のスイッチング素子を動作させるため、同数の絶縁型電源回路とドライブ回路が必要となる。したがって、コスト削減かつ故障率低減（高信頼性化）のために(1)信号多重化などによる配線数低減が必須になると考えられる。

一方、SiC や GaN 等のワイドギャップ半導体は、高速応答性と耐熱・放熱性の高さから次世代電力変換素子として実用化が始まっている。次世代スイッチング素子の大きな特徴の一つが幅広い使用温度範囲であり、素子単体での使用温度は200℃を超える動作が期待されるため、これまで熱的問題から困難であったモーター直付、エンジンルーム内設置、インホイールモータなどが実現可能となり、電力配線の短線化によるエネルギー損失の改善やノイズ発生の低減が期待できる。一般的な電力変換回路は、DSP や FPGA 等で演算しゲート駆動波形を生成するが、現状では Si ベースの集積化回路を用いる以外に選択肢が無いため最大動作温度は一般的な125℃以下に制限される。したがって、次世代スイッチング素子の特徴を活かし切れる(2)高温動作可能なゲート駆動回路が要望されている。加えて、ゲート駆動回路に関する市場調査からも、ゲート駆動回路数は増加傾向であること、今後の研究方向性として高温耐性が挙げられていることから、上記(1)と(2)を同時に満たすゲート駆動回路の実現化は大きく期待されている。しかし、これまでの研究報告では(1)または(2)のみのどちらかしか対応できていなかった。

そこで申請者グループでは、次世代電力変換回路の多重化・高信頼化・高温動作化を実現するために、「弾性表面波(SAW)を用いたゲート駆動回路」を提案し、科研費の後押しにより提案システムの原理検証とその有用性を示した。この先行研究により、提案システムの有効性を引き出すためには、解決すべき課題が有る事を明らかにした。本提案システムの研究は、電力変換工学と超音波工学、通信工学とが融合した分野横断型研究である。したがって、これまで各分野で行われてきた研究の中でも、いまだ詳細な調査・研究がなされていない領域を多く含んでいる。具体的には、使用する SAW フィルタの性能について、次世代インバータへ応用するために必要となる従来以上の幅広い範囲における未知・未解明な物理的特性（電氣的絶縁特性、耐電力特性、耐熱・温度特性など）を明らかにする必要があった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、申請者らがこれまで提案した「弾性表面波を用いたゲート駆動回路」の高性能化とマルチレベルインバータへの適用を通じ、実用化・普及化に向けた適用範囲を明らかにすることである。これまで詳細な研究がなされていない電力変換回路に特化した SAW フィルタの電氣的・物理的特性を明らかにすることが可能となれば、今後の電力変換分野で必要とされる基礎的な特性・指標を得る事となり、今後の応用発展のための礎になりえると考えられる。本研究での成果は、特に次世代スイッチングデバイスの有効利用領域の拡大や、マルチレベルインバータの普及に伴う省エネルギー化に貢献できると考えられる。

3. 研究の方法

提案システムでは SAW デバイスを用いることで、ゲート駆動回路に必要な「電氣的絶縁」、「多チャンネル伝送」を可能とするが、上述したように解決すべき課題点がある事が分かっていた。具体的には、「電氣的絶縁」、「耐熱・温度特性」、「動作速度」、「エネルギー伝送」の4特性がまだ十分では無く改善すべき課題であった。この4特性が改善されれば、提案システムは次世代ゲート駆動回路として非常に有用なシステムとなりえた。したがって、本研究ではこれらの課題を解決するために、後述する研究課題を解決することで、次世代電力変換回路に必要なとされる SAW フィルタに関して、従来以上の幅広い電氣的絶縁特性、耐電力特性、耐熱・温度特性範囲の未知・未解明な物理的特性を明らかにすることを目標とした。そして提案法の高性能化と実現可能範囲の明確化を明らかにした上で、次世代電力変換回路としてマルチレベルインバータの普及を目指した。

まず、本提案システムでの主要部品である SAW フィルタの特性向上させるために、提案方式に適した電氣的絶縁性能、櫛型電極の機械的強度、耐電圧、耐電力の向上を目標として、SAW フィルタ単体の特性改善を目指した。具体的には、絶縁性能向上と高温動作における周波数変動の補償のため、電極表面に SiO₂ 皮膜を成膜した。電極から一方向にのみ SAW が励振されるよう、電極幅制御型の電極構造(EWC-SPUDT)を採用して伝送電力向上を図った。SAW 解析シミュレータを用いて構造を設計し、送受電極間の挿入損失がこれまでの 8 dB 程度から双方向損失を削減した 3 dB 以下を得る構造を実現した。

次に、エネルギー伝送方式を構築するための検討を行った。これまでは多チャンネル化に伴い各 SAW フィルタを伝送するエネルギーが減少する傾向にあり、SAW フィルタ単体の特性も向上させるが、今後のさらなる多チャンネル化にも対応できるように別系統による電力供給方式も検討した。電力供給は全てのスイッチング素子に一樣に必要とされるが個別に選り分ける必要が無いため、同一周波数でも問題無く遅延時間も考慮しなくて良い。したがってゲート駆動信号が使用しない周波数帯域で、かつ許容電力量を大きく出来る低周波側の 100 ~ 200 MHz 帯域を利用すれば、ゲート駆動信号用の同軸線にそのままエネルギーを重畳して伝送することが出来る。そこで、両端に反射器を設置した構成で伝送損失低減を図った電力伝送専用 SAW フィルタを設計し、基礎特性測定および実証実験を行った。各 SAW フィルタ当りの電力伝送量は、中期目標で 100 mW 以上、最終目標で 500 mW 以上と設定した。

また、多チャンネル伝送の検証も行った。必要とされるスイッチング素子数は三相 3 レベルインバータの場合 12 ch となる。12 ch の駆動信号を最小限の伝送線（同軸線）で伝達可能になれば、他の様々な用途にも適用可能だと考えられる。そこで本研究では 12 ch 動作を最終目標とした。まず、上述の SAW フィルタ特性の改善および電力量増加を踏まえた上で、多チャンネル時に問題となる信号エネルギーの減少を補うための方策として、SAW フィルタの最適設計（伝送帯域などを決定する電極形状・対数など）と分波方式、および検波回路での出力電圧向上策を講じて 12 ch 伝送を目指した。さらに、信号と電力を同時に伝送するゲート駆動回路に関する検討も行った。SAW フィルタを用いたゲート駆動システムでは、各スイッチング素子に対して絶縁されたゲート信号と駆動電力の両方を同時に供給可能であるため、従来のゲート駆動回路に比べ回路の大幅な簡素化を実現可能である。

4. 研究成果

前述した研究方法に従って研究を遂行した。得られた研究成果を下記に示す。

(1) SAW フィルタの電極構造改善

SAW 共振器構造による電力伝送改善について検討した。入出力櫛型電極の外側に反射器を配置し、エネルギー伝送に特化した共振器型 SAW フィルタを作製した。

一方向電極構造を有する SAW フィルタの設計・作製を行った。作製した SAW フィルタの伝搬損失が予想以上に増加したため原因を調査した結果、電極に反射率の大きな Pt 電極を用いた影響が電極抵抗の増加を招いていた事が分かったため、電極抵抗を低下させる別材料の電極を検討した。

一方向性電極の材料として高い反射率を得るべく質量の大きな Pt が櫛型電極の電気抵抗を増大させることから、改善策として Pt 電極上に電気抵抗率の小さな Al を成膜することで電極抵抗の低減化を試みた。作製した全周波数帯域の SAW フィルタに対して顕著な改善が確認され、特に電極面積の大きな低周波帯域では等価抵抗が 1/9 以下になり大幅な低減効果が確認できた。

(2) SAW フィルタの耐電力試験

エネルギー伝送に特化した共振器構造 SAW フィルタを作製し、耐電力特性を計測した。その結果、伝送電力の大幅な向上（中間目標値 100 mW 以上）を確認できた。

新たな電極構造 ($\text{SiO}_2/\text{Pt}/\text{Al}/\text{LiNbO}_3$) で作製した一方向性 SAW フィルタ（図 1）に対して耐電力試験を行った。通過周波数 300～960 MHz の 12 種、また SiO_2 皮膜が 1 および 2 μm の計 24 種類を作製・評価した。耐電力試験からは、300～550 MHz の低周波側の特性が良好な事（挿入損失 3 dB 以下）と、通過周波数の上昇に伴う伝送損失の増加傾向が確認できた。図 2 に SAW フィルタ出力側で計測した伝送電力量を示す。おおむね全周波数帯域で中間目標の 100 mW 以上が得られ、低周波数側に最終目標値である 500 mW 以上となる設計が 5 種類あることも確認できた。加えて、最大電力伝送量が 700 mW を超える設計値もあることが分かった。以上の結果より、一方向性 SAW フィルタのみで電力供給とゲート駆動信号伝送の両立が可能であるとの指針を得た。また、シミュレーションでは SiO_2 膜厚を調整することで実測値に一致するため、作製した SiO_2 膜のパラメータが多少異なっていることが示唆された。

(3) SAW フィルタの電氣的絶縁破壊試験

SAW フィルタに SiO_2 膜を製膜することで ($\text{SiO}_2/\text{Al}/\text{LiNbO}_3$ 構造) 入出力間の電氣的絶縁性の向上を図った。 SiO_2 膜を成膜した SAW フィルタを作製し、膜厚に対する電氣的絶縁特性を評価した。図 3 に結果を示すが、 SiO_2 皮膜による大幅な絶縁性能の向上 (3,500V 以上) を確認できた。

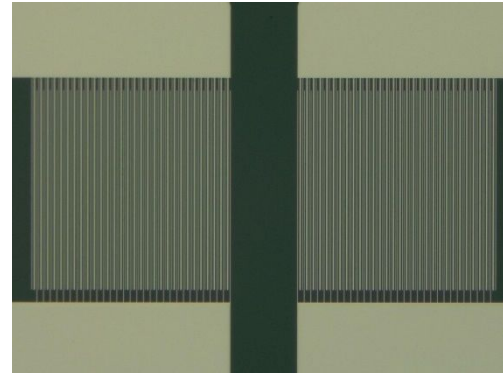


図 1 作製した SAW フィルタ^[1]

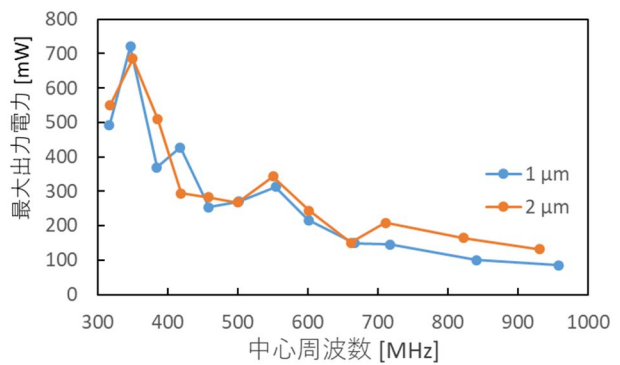


図 2 最大電力伝送特性^[2]

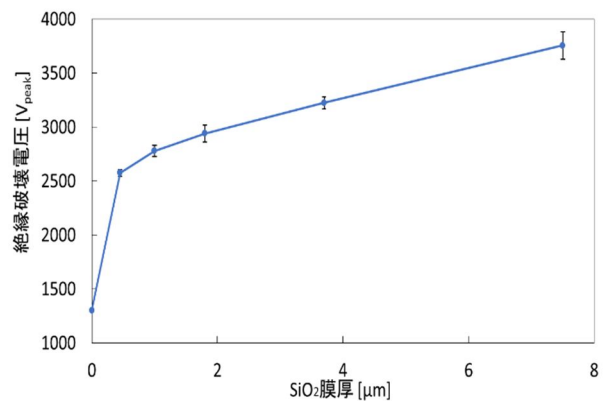


図 3 絶縁破壊電圧^[2]

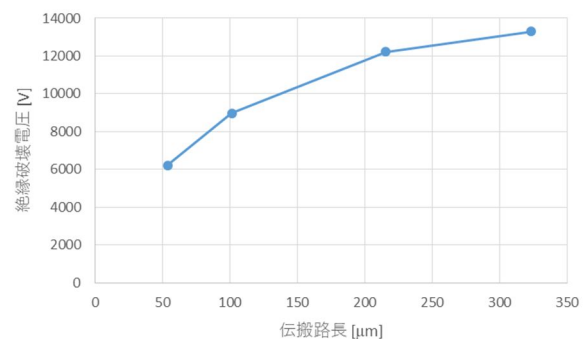


図 4 エポキシ樹脂塗布時の耐電圧特性^[2]

SiO₂/Pt/Al/LiNbO₃ 構造の一方方向性 SAW フィルタに関して絶縁破壊試験を行った，伝搬路長を 50～320 μm の 4 種類，SiO₂ 膜厚が 1 および 2 μm の計 8 種類に対して入出力間の絶縁性能を計測した結果，伝搬路長が 50 から 100 μm の範囲では絶縁電圧が 2 kV 程度から 3 kV 以上へと改善したが，100～320 μm の範囲では絶縁耐圧値がほとんど変化しないことが分かった．SAW フィルタ上面空間での放電を想定していたため伝搬距離に依存して増加数予想であったが，計測結果からは放電電圧がほぼ同一となりその原因が特定できなかった．

そこで，放電が LiNbO₃ と SiO₂ との境界界面に生じる可能性も含めて検証するために，作製した SAW フィルタの上面に SiO₂ 皮膜を厚くする目的で誘電率の近いエポキシ樹脂の塗布を行った．図 4 に結果を示すが，10 kV を超える絶縁耐圧特性が得られたことから，境界界面での放電では無いことが明らかになった．加えて，10 kV 以上の耐圧が得られたことから，今後の研究方向性として境界波デバイスなどが有望であることを明らかにした．

(4) 12 ch の駆動波形伝送

12 ch 分配器と 12 ケの SAW フィルタを用いた受信部を作製した．信号伝送特性実験からは各ポートからの信号を確認でき，本システムの有用性を確認することができた．今後は損失を低減するために分波方式による受信器作製を検討している．

(5) 信号と電力を同時に伝送するゲート駆動回路

作製した SAW フィルタの中で挿入損失が少なかった 315 MHz と 381 MHz の SAW フィルタを用いてゲート駆動信号とエネルギー伝送を実証した．本実験では，原理検証を目的としているためゲート信号にエネルギーを重畳させており，ゲート信号の立ち上り・下り時間が大きい，電力供給用に 1～2 ch 増やすことで大幅な波形立上り・下りの高速化が可能である．

以上のように，本研究ではパワーエレクトロニクス回路のゲート駆動システムに適した SAW フィルタの高性能化を目指し，SiO₂/Al/Pt/LiNbO₃ 構造の一方方向性 SAW フィルタを設計・作製し，耐電力性能，電氣的絶縁性能，多チャンネル化，信号および電力の同時伝送を向上させることが出来た．電力伝送エネルギーは 700 mW を超える設計値もあり，最終目標値である 500 mW 以上を満たすことができた．また，低周波領域での特性が良好なことから，より低い周波数を含めた 200 MHz～550 MHz での利用を今後検討したい．また，絶縁破壊試験の結果からは 3,000 V 以上の耐圧は確保できていることが示されたが，伝搬路長に依存しない挙動理由を解明すべきである．さらに，エポキシ樹脂を塗布した絶縁破壊電圧測定ではトランスバーサル構造でも 10 kV を超える特性が得られる事を確認できたため，境界波デバイスのような封止可能なデバイス利用を検討して行く予定である．

上記の成果より，次世代スイッチング素子用駆動回路に留まらず，耐故障性・コスト削減などの観点から様々な電力変換回路で利用可能となると考えられ，電力変換回路分野へのブレイクスルーに成り得ると考えられる．

< 引用文献 >

- [1] Watada Ken ,Goka Shigeyoshi ,Kakio Shoji ,Kobayashi Fumiya ,Nonaka Ryo ,Wada Keiji, “Power transmission characteristics of EWC-SPUDT SAW filters fabricated for multiplex transmission system of inverter gate drive circuits,” Japanese Journal of Applied Physics,2020, SKKC05
- [2] 五箇繁善，綿田堅，今村圭吾，垣尾省司，「次世代インバータシステム用一方方向性 SAW フィルタの電氣的特性」，第 49 回 E M シンポジウム，2020，EM49-1-08

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Watada Ken, Goka Shigeyoshi, Kakio Shoji, Kobayashi Fumiya, Nonaka Ryo, Wada Keiji	4. 巻 59
2. 論文標題 Power transmission characteristics of EWC-SPUDT SAW filters fabricated for multiplex transmission system of inverter gate drive circuits	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SKKC05 ~ SKKC05
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab85ab	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tokuyama Hiroshi, Wada Keiji, Goka Shigeyoshi	4. 巻 141
2. 論文標題 Gate Drive Circuit Using SAW Filter Capable of Power and Signal Transmissions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 324 ~ 329
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.141.324	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 五箇繁善, 綿田堅, 今村圭吾, 垣尾省司
2. 発表標題 次世代インバータシステム用一方向性 SAW フィルタの電気的特性
3. 学会等名 第49回 E Mシンポジウム(EM49-1-08)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ken Watada, Fumiya Kobayashi, Ryo Nonaka, Shigeyoshi Goka, Shoji Kakio, Keiji Wada
2. 発表標題 Power Transmission Characteristics of EWC-SPUDT SAW Filter for Inverter Gate Drive Circuit
3. 学会等名 USE2019 (3P3-1) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 綿田堅, 小林史弥, 野中凌, 五箇繁善, 垣尾省司, 和田圭二
2. 発表標題 インバータ用ゲート駆動システムに適した一方向性SAWフィルタの耐電力特性
3. 学会等名 電気学会EM委員会 (EM19-2-4)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Tokuyama ; Keiji Wada ; Shigeyoshi Goka
2. 発表標題 Design and Experiment of a Gate Drive Circuit using SAW Filter with Signal and Power Transmission
3. 学会等名 IEEE International Future Energy Electronics Conference (IFEEC) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 市川佑樹, 五箇繁善, 垣尾省司, 野中凌, 和田圭二
2. 発表標題 トランスバーサル型 SAW フィルタの SiO ₂ 膜による絶縁性能向上
3. 学会等名 第47回 E Mシンポジウム(EM47-2-07)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 市川佑樹, 五箇繁善, 垣尾省司, 綿田堅, 野中凌, 和田圭二
2. 発表標題 SiO ₂ 被膜によるトランスバーサル型SAWフィルタの絶縁性能向上
3. 学会等名 応用物理学会 (18p-PA1-6)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野中凌, 五箇繁善, 垣尾省司, 和田圭二
2. 発表標題 SAWフィルタを用いたインバータ用ゲート駆動システムにおける電力伝送方式の検証
3. 学会等名 電子回路研究会(ECT-18-112)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 徳山 寛 和田 圭二 五箇 繁善
2. 発表標題 SAWフィルタを用いたゲート駆動電力伝送に適した検波回路の設計法
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会論文集
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	和田 圭二 (Wada Keiji) (00326018)	東京都立大学・システムデザイン研究科・准教授 (22604)	
研究分担者	垣尾 省司 (Kakio Shoji) (70242617)	山梨大学・大学院総合研究部・教授 (13501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------