

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 14 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360131

研究課題名(和文)単結晶ダイヤモンドを利用した超高性能弾性波デバイスの実現

研究課題名(英文)Development of High Performance Acoustic Wave Devices Using Single Crystalline Diamond

研究代表者

橋本 研也 (Hashimoto, Ken-ya)

千葉大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90134353

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、単結晶ダイヤモンド(SCD)基板を利用して、際立った性能の弾性表面波(SAW)デバイスを実現し、新たな工学領域を創出することを目的とした。

まず、高品質AIN薄膜をSCD上に堆積し、5 GHz帯でQが5700の高性能SAW共振子を実現した。また、SCD表面の平滑性が素子性能に大きく影響することを示した。次に、圧電性の大きいSc-AINをSCD上に堆積し、既存の圧電基板では実現困難な3 GHz帯でも低損失で広帯域なSAWフィルタが実現できることを示した。

さらに、これらの圧電薄膜/高音速基板構造では電極膜厚の影響により実効的な圧電性を大きく向上できることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This project was aimed at developing surface acoustic wave (SAW) devices with excellent performances using single-crystalline diamond (SCD).

First, a high quality AlN film was deposited on the SCD, and a high performance SAW resonator with the Q factor of 5,700 at 5 GHz was realized. We showed that the surface roughness of SCD critically influence the achievable Q factor. Next, highly piezoelectric Sc-AlN films were also deposited on the SCD, and it was demonstrated that wideband and low loss SAW filters are realizable in the 3 GHz range, which is hard when conventional piezoelectric materials are applied.

We also revealed that on the piezoelectric film/non-piezoelectric substrate structure, the effective electromechanical coupling can be enhanced by the mass-loading of electrodes.

研究分野：超音波工学

キーワード：弾性表面波 単結晶ダイヤモンド AlN Sc-AIN 共振子

1. 研究開始当初の背景

現在、これらの用途には、弾性表面波(SAW)やバルク弾性波(BAW)を用いた高周波(RF)弾性波素子が多用されている。この素子の更なる特性改善には、新規材料・プロセス技術の開拓が必須である。

以上の観点から、研究代表者らは、ダイヤモンドの弾性波素子応用について検討を進めている。これはダイヤモンドの弾性波速度が高く、超音波吸収が少ないため高周波应用到していることに着目したものである。また、熱伝導度が大きいこと、耐電力性にも優れる。

最近、研究代表者らは、単結晶ダイヤモンド(SCD)基板を利用すると、これまでの多結晶ダイヤモンド基板の場合に比べて格段に優れた性能が得られることを示している。これはSCDの利用により、多結晶の場合に発生する結晶粒界での弾性波散乱が除去できることによる。

また、SCDの大寸法化にも挑んでおり、既に5 cm角基板が実現され、10 cm角基板も実現しつつある。このため、将来的には基板価格も実用的なレベルまで低下することが期待され、電子素子として商品化する際の障害は全て解決しつつある。

2. 研究の目的

本研究では、SCDを利用して、既存の圧電材料では実現し得なかった際立った性能を有するSAW素子を実現し、新たな工学領域を創出することを目的とした。

なお、ダイヤモンドは圧電性を有しないため、高性能SAWデバイスの実現には圧電薄膜と組み合わせる必要がある。ここでは高音速であるAlNもしくは高圧電性を有するScAlNとの組み合わせを検討した。

3. 研究の方法

(1) AlN 薄膜/SCD 基板構造 SAW 共振子の高Q化

図1に試作したAlN薄膜/SCD基板構造SAW共振子のアドミタンス特性例を示す。高音速の妹沢(2次)モードが大きな圧電性を持つようにAlN膜厚を0.7 μm 、Cu IDTの線幅を0.5 μm 、その膜厚を90 nmに選んだ。IDTの線幅は市販デバイスで利用されている値とほぼ同一で、LiTaO₃、LiNbO₃等通常の圧電基板を利用した場合の共振周波数は約2 GHzである。

5.2 GHzと非常に高い周波数に鋭い共振ピークが観測される。これはAlN、SCD共に高音速であることを反映して、この構造上のSAWも高音速であることによる。また、その共振Qは2,450に達している。同一設計で多結晶ダイヤモンドを利用した場合に得られるQは500程度であることから、Q向上の主因はダイヤモンド粒界による散乱が消失したことと考えられる。

なお、この共振子ではIDT外へのSAWの漏れを抑圧するようにIDTと反射器の周期に若

干差を与えている。この対策を実施する以前のQは1,500程度であった。

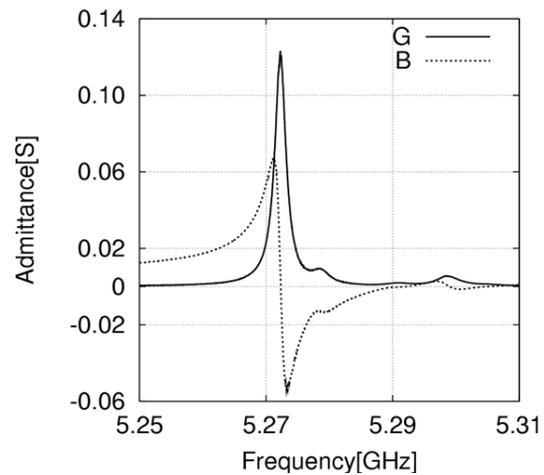


図1 試作したAlN薄膜/SCD基板構造SAW共振子の共振特性

次に、SCD表面の研磨の影響を調べた。図2に高精度研磨を適用した場合の特性を示す。素子の設計等は上述の共振子と同一である。5 GHz帯で基本共振が観測され、Qは5,180に達している。この値はこの周波数帯の単一共振としては極めて高く、この構造が如何に低損失であるかを反映している。

なお、この改善は、表面研磨によりAlN表面並びにAlN/diamond界面での散乱が減少したこととAlNの結晶性が向上したことが主因と考えられる。

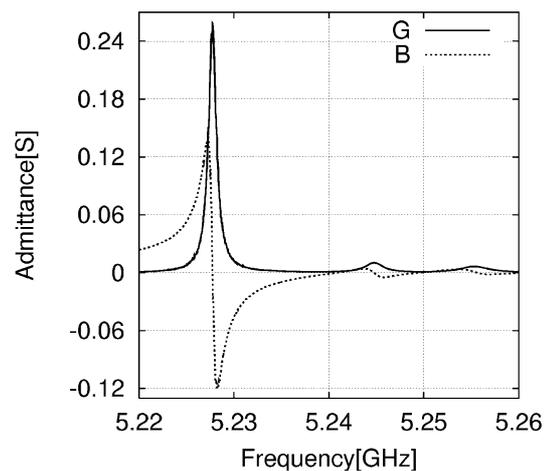


図2 高精度研磨後の特性

(2) Sc-AlN 薄膜/SCD 基板構造 SAW 共振子の実現

図2に試作したScAlN薄膜/SCD基板構造SAW共振子のアドミタンス特性例を示す。高音速の妹沢(2次)モードが大きな圧電性を持つように、AlN膜厚を1.0 μm 、Cu IDTの線幅は0.7 μm 、その膜厚を110 nmに選んだ。

線幅が比較的広いにも関わらず2.9 GHzと

高い周波数に鋭い共振ピークが観測される。共振並びに反共振周波数から算出される実効的電気機械結合係数 K^2 は3.77%に達し、共振 Q は630と見積もられた。比較的大きな K^2 を有することを勘案すると、この Q 値は比較的大きな値と言える。なお、この素子の設計にはIDTと反射器の周期に差を与えていない。

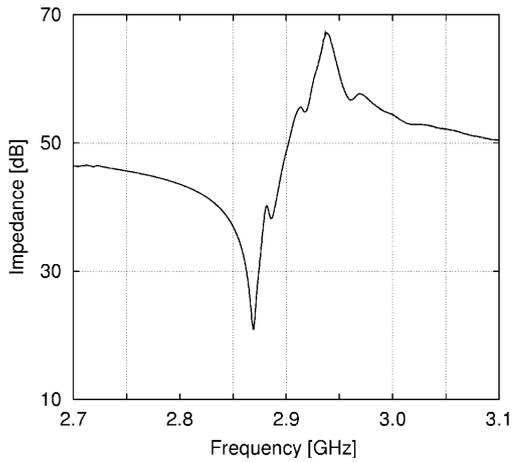


図3 試作したScAlN薄膜/SCD基板構造SAW共振子の共振特性

なお、研究代表者らはSCDの代わりに高音速の6H-SiCを基板として利用して同様のSAW共振子をしている。その結果、SCDを利用すると6H-SiCに比べて高い Q が得られ、しかも周波数が高いほどその影響が顕著となることが判った。これはSCD固有の損失が6H-SiCのそれよりも格段に小さいことを示している。

(3) 電極指による質量負荷の影響

通常、SAWデバイスにおける最適構造の探索においては、時間短縮のため電極指の影響を無視して解析し、その中から有望そうな構造の周辺をさらに詳細に探索するという手順が取られてきた。

本研究者は、AlN/SCD や ScAlN/SCD 等の最適構造を探索している中で、電極の影響に電極ない場合よりも K^2 が数倍大きくなる場合があることを見出した。

図4はその一例で、ScAlN 薄膜/Si 基板構造における妹沢モードの K^2 の値が ScAlN 膜厚と Cu 電極膜厚によってどの様に变化するかを示す。電極負荷によって、電極がない場合に比べて約 2 倍となることが判る。これは、電極負荷の影響により IDT のある圧電膜表面付近に SAW のエネルギーが集中すること起因する。同様の現象は圧電バルク基板を用いた場合でも発生するが、圧電薄膜を用いた場合はこの現象が顕著となる。なお、他の薄膜、基板材料の組み合わせも調査したが、結果は同様であった。

また、以上の結果より、質量を与えるのは IDT 構造である必要はなく、均一に薄膜を堆積した場合にも生じると予想された。

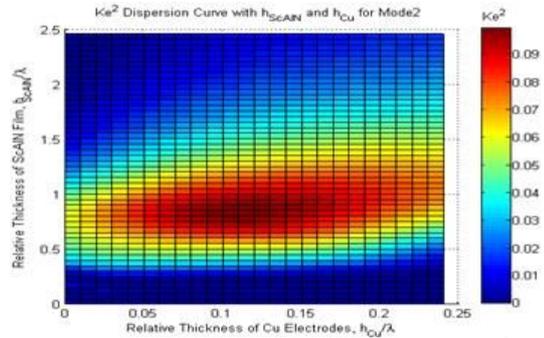


図4 ScAlN 薄膜/Si 基板構造における K^2 の ScAlN 膜厚と Cu 電極膜厚の依存性

図5にCu IDT上にSiO₂を均一に堆積した場合の K^2 をSiO₂膜厚の関数として示す。3本の曲線はCu電極膜厚を変えた場合の計算結果である。Cu電極膜厚を変えても、最大を与えるCu膜厚が変わるだけで、最大の K^2 はほぼ変わらないことが判る。

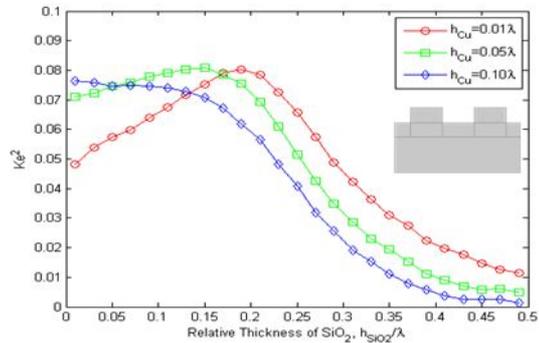


図5 SiO₂ 薄膜/ScAlN 薄膜/Si 基板構造における K^2 の SiO₂ 膜厚依存性

(4) 合金ターゲットによる ScAlN 薄膜の堆積

以上のように、AlN と共に ScAlN の優位性の実証されたため、その産業応用に向け、ScAl の合金ターゲットを用いた高周波スパッタ法による大面積堆積についても検討した。

検討の結果、堆積条件の最適化により大面積にわたって均質な高品質薄膜が得られた。ただし、図6に示すように薄膜の含有率が23%程度とターゲットのそれ(32%)よりも極端に低いことがわかった。また、その差はスパッタの経過時間にほとんど影響されない。なお、同図中に示す X 線回折ロックアップの半値全幅(FWHM)はスパッタ時間の経過とともに向上しているが、これは使用したスパッタ装置にロードロックを備えているため、時間経過とともに残留ガスが減少するためと考えられる。

また、Sc 含有率が43%のターゲットも準備したが、薄膜のそれは33%付近で経過時間に対してほぼ不変であった。なお、経過時間とともに膜質の劣化が顕著であった。

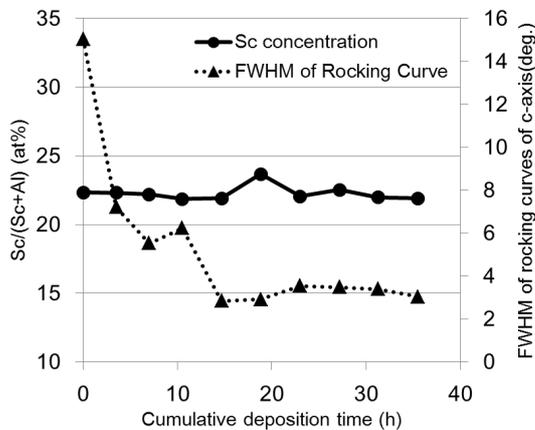


図 6 堆積された ScAlN 薄膜の Sc 含有率と XRD ロッキングカーブの半値全幅(FWHM)の経過時間依存性

図 7 に Ar の流量を 24 sccm と一定として N₂ の流量のみを変化させた場合の成長速度並びに膜中の Sc 含有率の関係を示す。N₂ 流量を減少させると 9 sccm 当たりから成長速度並びに Sc 含有率が急速に増加し始める。そして、N₂ の流量がほぼ零の場合にはターゲットの Sc 含有率とほぼ同一となることが判る。ただし、N₂ 流量が 3 sccm 以下では、堆積膜が窒化されず、金属光沢であった。

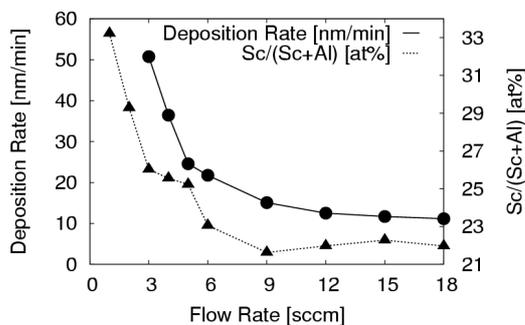


図 7 N₂ の流量を変化させた場合の成長速度並びに膜中の Sc 含有率の関係

このような堆積速度の N₂ 流量依存性はターゲット表面の窒化により説明される。即ち、N₂ の流量が 9 sccm 以上の時にはターゲット表面を窒化物が覆い、それがスパッタされることにより膜が堆積されるのに対し、それ以下ではターゲット表面に金属が露出し、それがスパッタされ、基板表面で窒化される。

堆積速度と Sc 含有率が非常に相関を持つことより、Sc 含有率のずれもターゲット表面の窒化によるものと結論づけられる。Sc と Al のスパッタ率の差よりも ScN と AlN のスパッタ率の差が大きいためと考えられる。

現在、この知見を元に Sc/Al 比のずれを最小とする成長条件を探索している。

4 . 研究成果

本研究では、SCDをAlNやScAlNと組み合わせることで、既存の圧電材料で

は得られない極めて優れた性能のSAWデバイスが実現できることを明らかにした。

これらの素子では、耐電力性・非線形性も極めて優れることが予想され、その検討も進めている。更には、高 Q を活かした SHF 帯低雑音発振器への応用も期待されるため、その開発も進めている。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 15 件)

M.Sumisaka, K.Yamazaki, S.Fujii, G.Tang, T.Han, Y.Suzuki, S.Otomo, T.Omori, and K.Hashimoto, "Sputter Deposition of ScAlN Using Large Size Alloy Target with High Sc Content and Reduction of Sc Content in Deposited Films," Jpn. J. Appl. Phys., **54**, 7 (2015) [to be published] (査読有)

S.Fujii, M.Sumisaka, G.Tang, Y.Suzuki, S.Otomo, T.Omori, and K.Hashimoto, "Highly C-Axis-Oriented ScAlN Thin Films Deposited Using Sc-Al Alloy Target," Tech. Digest, IEEE Microwave Conf. (2015) [to be published] (査読無)

A.Kochhar, Y.Yamamoto, A.Teshigahara, K.Hashimoto, S.Tanaka, and M.Esashi, "NSPUDT Using C-axis Tilted ScAlN Thin Film," Proc. IEEE Freq. Contr. Symp. (2015) [to be published] (査読無)

G.Tang, T.Han, A.Teshigahara, T.Iwaki, and K.Hashimoto, "Enhancement of Effective Electromechanical Coupling Factor by Mass Loading in Layered SAW Device Structures," Proc. IEEE Freq. Contr. Symp. (2015) [to be published] (査読無)

S.Fujii, S.Shimizu, M.Sumisaka, Y.Suzuki, S.Otomo, T.Omori and K.Hashimoto, "Deposition of Highly C-Axis Oriented ScAlN Thin Films by RF Magnetron Sputtering Using Sc-Al Alloy Target," Proc. IEEE Freq. Contr. Symp. (2014) pp. 350-353 (査読無)

A. Konno, H.Hirano, M.Inaba, K.Hashimoto, M.Esashi, and S.Tanaka, "Tunable Surface Acoustic Wave Filter Using Integrated Micro-Electro-Mechanical-System Based Varactors Made of Electroplated Gold," Jpn. J. Appl. Phys., **52**, 7 (2013) 07HD13-1~5 (査読有)

藤井隆将, 佐藤修平, 大森達也, 橋本研也, 梅澤仁, 鹿田真一, 勅使河原明彦, 加納一彦, "ScAlN/単結晶ダイヤモンド構造を用いた SHF 帯広帯域 SAW デバイス," 電子情報通信学会論文誌 A, **J96-A**, 6 (2013) pp. 351-356 (査読有)

A.Konno, M.Sumisaka, A.Teshigahara, K.Kano, K.Hashimoto, H.Hirano, M.Esashi, M.Kadota, and S.Tanaka, "ScAlN Lamb Wave Resonator in GHz Range Released by XeF₂ Etching," Proc. IEEE Ultrason. Symp. (2013) pp.1376-1381 (査読無)

S.Fujii, H.Yamada, T.Omori, K.Hashimoto, H.Torii, H.Umezawa, and S.Shikata, "One-port SAW Resonators Fabricated on Single-Crystal Diamond," Tech. Digest, International Microwave Symp. (2013) TU-1D6-1~4 (査読無)

K.Hashimoto, S.Sato, A.Teshigahara, T.Nakamura, and K.Kano, "High Performance Surface Acoustic Wave Resonators in the 1 to 3 GHz Range Using a ScAlN/6H-SiC Structure," IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., and Freq. Contr., **60**, 3 (2013) pp. 637-642 (査読有)

K.Hashimoto, T.Fujii, S.Sato, T.Omori, A.Teshigahara, K.Kano, H.Umezawa, and S.Shikata, "ScAlN: A New Piezoelectric Thin Film for SAW Filter and Sensor Applications in Multi GHz Range," Proc. 2012 Int'l Symp. on Acoustic Wave Devices for Future Mobile Comm. Systems (2012) pp.113-118 (査読無)

S.Fujii, H.Yamada, T.Omori, K.Hashimoto, H.Torii, H.Umezawa, and S.Shikata, "High Frequency SAW Devices Using a Single Crystal Diamond," Proc. 2012 Int'l Symp. on Acoustic Wave Devices for Future Mobile Comm. Systems (2012) pp.119-124 (査読無)

[Invited] A.Teshigahara, K.Hashimoto, and M.Akiyama, "Scandium Aluminum Nitride: Highly Piezoelectric Thin Film for RF SAW Devices in Multi GHz Range," Proc. IEEE Ultrason. Symp. (2012) pp. 1917-1921 (査読無)

K.Hashimoto, T.Fujii, S.Sato, T.Omori, C.Ahn, A.Teshigahara, K.Kano, H.Umezawa, and S.Shikata, "High Q Surface Acoustic Wave Resonators in 2-3 GHz Range Using ScAlN/Single Crystalline Diamond Structure," Proc. IEEE Ultrason. Symp. (2012) pp. 1926-1929 (査読無)

K.Hashimoto, S.Sato, A.Teshigahara, T.Nakamura, and K.Kano, "High Performance Surface Acoustic Resonators in 1-3 GHz Range Using ScAlN/6H-SiC Structure", Tech. Digest, International Microwave Symp. (2012) TU1B-5-1~3 (査読無)

[学会発表] (計 2 4 件)

S.Fujii, M.Sumisaka, G.Tang, Y.Suzuki, S.Otomo, T.Omori, and K.Hashimoto, "Highly C-Axis-Oriented ScAlN Thin Films Deposited Using Sc-Al Alloy Target," IEEE Microwave Conf. (2015.5.21, Phoenix, アメリカ合衆国)

G.Tang, T.Han, A.Teshigahara, T.Iwaki, and K.Hashimoto, "Enhancement of Effective Electromechanical Coupling Factor by Mass Loading in Layered SAW Device

Structures," IEEE Freq. Contr. Symp. 日本学術振興会弾性波素子技術第 150 委員会研究会(2015.5.12, 東京)

G.Tang, T.Han, A.Teshigahara, T.Iwaki, and K.Hashimoto, "Enhancement of Effective Electromechanical Coupling Factor by Mass Loading in Layered SAW Device Structures," IEEE Freq. Contr. Symp. (2015.4.13, Denver, アメリカ合衆国)

隅坂将大, 山崎健太, 藤井知, 大森達也, 唐供寛, 鈴木雄, 大友将平, 橋本研也, "Sc-Al 合金ターゲットによる ScAlN 薄膜のスパッタ堆積," 圧電材料・デバイスシンポジウム 2015 (2015.2.18, 仙台)

S.Fujii, S.Shimizu, M.Sumisaka, Y.Suzuki, S.Otomo, T.Omori and K.Hashimoto, "Deposition of Highly C-Axis Oriented ScAlN Thin Films by RF Magnetron Sputtering Using Sc-Al Alloy Target," IEEE Freq. Contr. Symp. (2014.5.12, 台北, 中華民国)

K.Hashimoto, "[招待講演] Exotic Materials for High Performance Radio Frequency Acoustic Wave Devices," International Workshop on Lead-Free Ferro-/Piezoelectric Materials and Their Applications (2013.10.27, 上海, 中華人民共和国)

A.Konno, M.Sumisaka, A.Teshigahara, K.Kano, K.Hashimoto, H.Hirano, M.Esashi, M.Kadota, and S.Tanaka, "ScAlN Lamb Wave Resonator in GHz Range Released by XeF₂ Etching," 日本学術振興会弾性波素子技術第 150 委員会研究会(2013.8.1, 東京)

A.Konno, M.Sumisaka, A.Teshigahara, K.Kano, K.Hashimoto, H.Hirano, M.Esashi, M.Kadota, and S.Tanaka, "ScAlN Lamb Wave Resonator in GHz Range Released by XeF₂ Etching," IEEE Ultrasonics Symposium (2013.7.25, Prague, チェコスロバキア)

S.Fujii, H.Yamada, T.Omori, K.Hashimoto, H.Torii, H.Umezawa, and S.Shikata, "One-port SAW Resonators Fabricated on Single-Crystal Diamond," IEEE Microwave Conference (2013.6.4, Seattle, アメリカ合衆国)

K.Hashimoto, "[招待講演] Clock Generation and Transfer: Bottleneck in Digital Era," Joint Scientific Symposium on Advances in Bioinspired Engineering and Biomedical Engineering (2013.4.25, 香港, 中華人民共和国)

山田晴也, 藤井知, 大森達也, 橋本研也, 鳥居博典, 梅沢仁, 鹿田真一, "AIN/単結晶ダイヤモンド構造 SAW 共振子の高 Q 化," 圧電材料・デバイスシンポジウム 2013 (2013.1.28, 仙台)

A.Teshigahara, K.Hashimoto, and M.Akiyama, "Scandium Aluminum Nitride:

Highly Piezoelectric Thin Film for RF SAW Devices in Multi GHz Range”, 日本学術振興会弾性波素子技術第 150 委員会研究会 (2013.1.22, 東京)

K.Hashimoto, T.Fujii, S.Sato, T.Omori, A.Teshigahara, K.Kano, H.Umezawa, and S. Shikata, “[招待講演] ScAlN: A New Piezoelectric Thin Film for SAW Filter and Sensor Applications in Multi GHz Range,” 2012 International Symposium on Acoustic Wave Devices for Future Mobile Comm. Systems (2012.12.7, 千葉)

藤井隆将, 佐藤修平, 大森達也, 橋本研也, 安昌俊, 梅澤 仁, 鹿田真一, 勅使河原明彦, 加納一彦, “ScAlN/単結晶ダイヤモンド構造を用いた SHF 帯広帯域 SAW デバイス,” 日本学術振興会弾性波素子技術第 150 委員会研究会(2012.10.25, 東京)

A.Teshigahara, K.Hashimoto, and M.Akiyama, “[招待講演] Scandium Aluminum Nitride: Highly Piezoelectric Thin Film for RF SAW Devices in Multi GHz Range,” IEEE Ultrasonics Symposium (2012.10.8, Dresden, ドイツ連邦共和国)

K.Hashimoto, T.Fujii, S.Sato, T.Omori, C.Ahn, A.Teshigahara, K.Kano, H.Umezawa, and S. Shikata, “High Q Surface Acoustic Wave Resonators in 2-3 GHz Range Using ScAlN/Single Crystalline Diamond Structure,” IEEE Ultrasonics Symposium (2012.10.8, Dresden, ドイツ連邦共和国)

K.Hashimoto, “[招待講演] ScAlN: A New Piezoelectric Thin Film for SAW Sensor Applications,” Wireless Surface Acoustic Wave Sensor Symposium (2012.9.20, Villach, オーストリア)

K.Hashimoto, S.Sato, A.Teshigahara, T.Nakamura, and K.Kano, “High Performance Surface Acoustic Resonators in 1-3 GHz Range Using ScAlN/6H-SiC Structure,” IEEE International Microwave Symposium (2012.6.20, Montreal, カナダ)

K.Hashimoto, “[招待講演] New Materials Extending SAW Device Capabilities,” Microwave Materials and their Applications Conference (2012.6.5, 台北, 中華民国)

橋本研也, “[招待講演] 新規材料が開拓する弾性表面波デバイスの新展開,” 誘電体研究委員会(2012.5.12, 京都)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 1 件)

名称: ラム波センシングデバイス

発明者: 勅使河原明彦, 加納一彦, 橋本研也, 江刺正喜, 田中秀治

権利者: デンソー, 東北大学, 千葉大学

種類: 特許

番号: 特願 2013-231427

出願年月日: 2013/11/7

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橋本 研也 (Ken-ya Hashimoto)
千葉大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 90134353

(2) 研究分担者

藤井 知 (Satoshi Fujii)
千葉大学・事務局・特任研究員
研究者番号: 30598933

(3) 研究分担者

大森 達也 (Tatsuya Omori)
千葉大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 60302527