

| | | | |
|------|------------|-------|-------|
| 整理番号 | 2020-J-037 | 報告者氏名 | 鈴木 雅視 |
|------|------------|-------|-------|

研究課題名

他元素ドーパ AIN 圧電膜層構造基板を用いた次世代高周波弾性表面波フィルタの開発

<代表研究者> 機関名：山梨大学・大学院総合研究部工学域 職名： 助教 氏名：鈴木雅視

<共同研究者> 機関名： 職名： 氏名：
 機関名： 職名： 氏名：
 機関名： 職名： 氏名：
 機関名： 職名： 氏名：

<研究内容・成果等の要約>

本研究では、弾性表面波 (SAW) デバイスの従来構造(IDT/圧電単結晶基板)では実現できない「高 SAW 位相速度, 高結合係数, 低 SAW 伝搬減衰, 高い温度安定性」を両立し, かつスパッタ法で形成可能な「他元素添加 AIN 層/高音速層/基板」からなる多層構造基板の探索と次世代移動通信端末向けの高周波動作 SAW デバイスへの応用を目的とする。

【最適構造の探索】

ScAlN 膜/水晶, サファイア基板上を伝搬する LLSAW, LSAW 特性理論解析により最適構造探索を行った。LSAW, LLSAW ともに水晶のカット, SAW 伝搬方向(オイラー角)が伝搬特性に大きく影響し, LSAW では(0° 90° 69°)ScAlN 膜(0° 126° 0°)水晶, LLSAW では(0° 90° 90°)ScAlN 膜(90° 90° 30°)水晶が最適構造であることが分かった。但し, ScAlN 膜のオイラー角(0° 90° ψ)は c 軸が基板に対して平行であり, イオンビーム照射成膜法により実験的に形成を試みたが, 実現には至らなかった。

一方で, 高次モード RSAW では「分極反転 ScAlN 層/高音速層 (AIN, ダイヤモンド等) /基板」において, 分極反転構造の各層厚を最適化することで, 高位相速度と高結合係数が実現できることを見出した。この構造では ScAlN 膜の結晶方位制御が必要なく, より実現性が高い構造だと考えられる。

【AIN 系膜における分極制御技術の開発】

高次モード RSAW に最適な「分極反転 ScAlN 層/高音速層/基板」を形成するためには, ScAlN 膜の分極を制御する必要がある。そこで, Si または Ge ドープによる分極制御を用いた分極反転構造 AIN 膜の形成を試みた。Si および Ge を 4%以上添加することで AIN 膜の極性が安定的に制御できることを確認し, 分極反転 AIN 多層膜の形成にも成功した。現在はより高品質な膜が形成可能な成膜条件の探索と ScAlN 膜への適応を目指している。

<研究発表（口頭、ポスター、誌上別）>

口頭発表：

1. 高野佑成, 早川竜盛, **鈴木雅視**, 垣尾省司, 「Cr ドープ c 軸配向 AlN 薄膜の圧電特性」, 第 49 回 EM シンポジウム, 2020/10/6.
2. 関本淳, **鈴木雅視**, 垣尾省司, 「Si 添加による極性制御を用いた 2 層極性反転 SiAlN/AlN 膜 音響共振子」, 第 68 回応用物理学会春季学術講演会, 2021/3/17.
3. 関本淳, **鈴木雅視**, 垣尾省司, 「極性反転 SiAlN/AlN 多層膜の形成と高次モード薄膜音響共振子への応用」, 第 82 回応用物理学会秋季学術講演会, 2021/9/11.
4. 高野佑成, **鈴木雅視**, 垣尾省司, 「極性反転 ScAlN 薄膜/高音速窒化物基板上の 2 次モード RSAW 伝搬特性」, 第 82 回応用物理学会秋季学術講演会, 2021/9/11.
5. **鈴木雅視**, 「他元素 (Si, Sc, Yb) ドープ AlN 圧電膜を用いた BAW・SAW デバイスの開発」第 50 回 EM シンポジウム, 2021/9/29. (招待講演)
6. **Masashi Suzuki** and Shoji Kakio, “Theoretical analysis of Rayleigh SAW propagation characteristics on YbAlN films/high velocity substrates,” The 42nd Symposium on Ultrasonic Electronics, 2021/10/25.
7. 高野佑成, **鈴木雅視**, 垣尾省司, 「Sc,Yb ドープ AlN 分極反転薄膜/高音速基板上的高次モード RSAW における結合係数増幅」圧電材料・デバイスシンポジウム 2022, 2022/1/27.

ポスター：

8. Yusei Takano, **Masashi Suzuki**, Shoji Kakio, “Increase of electromechanical coupling coefficient in c-axis oriented AlN films by chromium doping at low concentrations,” The 41th Symposium on Ultrasonic Electronics, 2020/11/25.
9. Yusei Takano, **Masashi Suzuki**, Shoji Kakio, “Analysis of Higher-Order Mode SAW Propagation Characteristics on Polarity Inverted ScAlN Films/High Velocity III-V Nitride Substrate,” IEEE Ultrasonics Symposium 2021, 2021/9/14.
10. Jun Sekimoto, **Masashi Suzuki**, Shoji Kakio, “Polarity Control of (0001) Oriented AlN Films by Si Doping and Applications to Polarity Inverted SiAlN/AlN Film Bulk Acoustic Wave Resonators,” IEEE Ultrasonics Symposium 2021, 2021/9/14.
11. Yusei Takano, **Masashi Suzuki**, Shoji Kakio, “Enhancement of coupling factor K^2 in higher-mode RSAW on polarity inverted ScAlN films/high velocity AlN or BN substrates,” The 42nd Symposium on Ultrasonic Electronics, 2021/10/25.

査読付き論文：

12. **Masashi Suzuki** and Shoji Kakio, “Analysis of propagation characteristics of Rayleigh surface acoustic waves on $\text{Yb}_{0.33}\text{Al}_{0.67}\text{N}$ piezoelectric films/high-velocity substrates,” Japanese Journal Applied of Physics, vol. 61, pp. SG1014, 2022.
13. Yusei Takano, **Masashi Suzuki**, Shoji Kakio, “Enhancement of coupling factor in 0th to 4th mode Rayleigh surface acoustic waves on polarity inverted multilayered ScAlN film/AlN and BN substrates,” Japanese Journal Applied of Physics, vol. 61, pp. SG1059, 2022.

解説記事：

14. **鈴木雅視**, 高野佑成, 垣尾省司, ”分極反転 ScAlN 薄膜/高音速 AlN, w-BN 基板上を伝搬する高次モード RSAW の結合係数 K^2 増大,” 超音波 TECHNO, vol. 34, pp. 37-42, 2022.

<研究の目的、経過、結果、考察 (5000 字程度、中間報告は 2000 字程度) >

1. 研究の目的

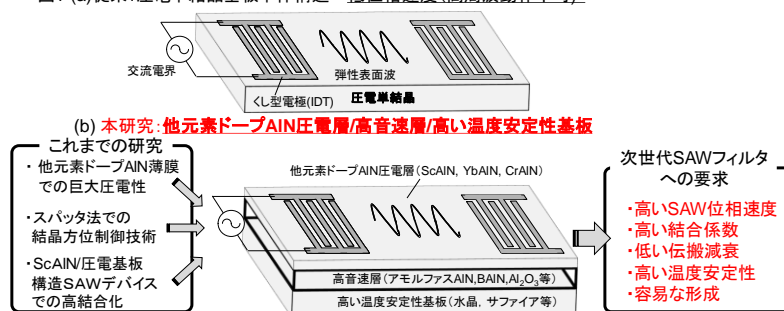
逆圧電効果を利用して弾性表面波 (SAW) を励振する SAW デバイスは、携帯電話等の周波数フィルタとして利用され、移動体通信産業を支える極めて重要な役割を果たしている。現在の移動通信システムの周波数域は 2.2 GHz 以下であるが、膨大な情報通信量を必要とするスマートフォン、タブレット等の急速な発達・普及に伴い、さらなる通信大容量化や高速化が求められ、5G バンド帯等 3 GHz 以上を周波数帯域とした次世代移動通信システムへの移行が進んでいる。高周波化に対応する次世代 SAW フィルタには以下の両立が求められる。

- ・高い SAW 位相速度⇒高周波動作
- ・高い電気機械結合係数⇒広帯域幅
- ・低い SAW 伝搬減衰⇒高 Q 値
- ・高い温度安定性⇒環境変動に対応可能

しかし現在実用化されている圧電単結晶基板単体からなる SAW フィルタ(図 1(a))を次世代通信帯 3 GHz 以上で動作させる場合、SAW の位相速度が 4,000 m/s 程度の SAW モードを利用しているため、IDT 電極幅を 0.3 μm 以下とする必要がある。しかし電極幅 0.5 μm 以下であると電気抵抗や耐電力等が劣化するため、圧電単結晶基板単体のデバイス構造では 3 GHz 以上への対応は不可能であり、3 GHz 付近が動作限界とされている。

そこで本課題では、従来のデバイス構造では対応できない次世代移動通信システム (3 GHz 以上) 用 SAW フィルタに向け、「高 SAW 位相速度 (=6,000 m/s 以上), 高結合係数 (=6% 以上), 低 SAW 伝搬減衰 (=0.003 dB/ λ 以下), 高い温度安定性 (=20~0 ppm/ $^{\circ}\text{C}$)」をすべてを満たし、かつ広く産業応用が進んでいるスパッタ法で形成可能な新たな層構造基板「他元素ドーパ AIN 圧電層/高音速層/高温安定性基板」の創成とその基板を用いた SAW フィルタ(図 1(b))の開発を目的とする。

図1 (a)従来: 圧電単結晶基板単体構造⇒低位相速度(高周波動作不可)



2. 研究成果

2.1 ScAlN 膜/基板上を伝搬する SAW 特性解析による最適構造探索

高位相速度をもつリーキーSAW(LSAW), 縦型 LSAW(LLSAW), 高次モード RSAW 伝搬モード, 圧電層, 高音層, 基板の各組み合わせでの位相速度, 結合係数, 伝搬減衰の理論解析を Farnell と Adler の SAW 伝搬解析法と有限要素法解析(FEM)により行い, 目標値が達成可能な最適構造探索を行った。

・ LSAW および LLSAW の場合 :

まずは ScAlN 膜水晶, サファイア基板上を伝搬する LLSAW, LSAW 特性を理論解析では, LSAW, LLSAW とともに水晶のカット角, SAW 伝搬方向(オイラー角)が伝搬特性に大きく影響することがわかった。また LSAW では(0° 90° 69°)ScAlN 膜(0° 129.5° 0°)水晶, LLSAW では(0° 90° 90°)ScAlN 膜(90° 90° 30°)水晶において, ScAlN 膜厚を最適化することで, 高い位相速度(6000m/s 以上), ある程度大きな結合係数(5%以上), 小さい伝搬減衰(0.001dB/ λ 以下)を有することを見出した。図 2 に FEM 解析による各最適構造 SAW 共振子のアドミタンス周波数特性を示す。両構造ともフィルタ応用に十分な鋭い SAW 共振が得られており, LSAW での最適構造(0° 90° 69°)ScAlN 膜(0° 129.5° 0°)水晶では, 帯域幅=2.9%, アドミタンス比=100 dB, 共振 Q=5,210, 反共振=5,620 (図 1(a)), また LLSAW 最適構造(0° 90° 90°)ScAlN 膜(90° 90° 30°)水晶では, 帯域幅=3.5%, アドミタンス比=87 dB, 共振 Q=2,480, 反共振=2,780 であった (図 1(b))。

実験的にこれらの ScAlN 膜水晶から成る層構造基板を実現するために, イオンビームアシスト成膜法 (AIN 膜では c 軸平行配向が達成されている) により c 軸平行 ScAlN 膜 (第二オイラー角が 90° となる) の形成を試みた。しかし, ScAlN 膜の c 軸方向が十分に制御できず, 狙いとするような層構造基板および SAW デバイス評価には至らなかった。

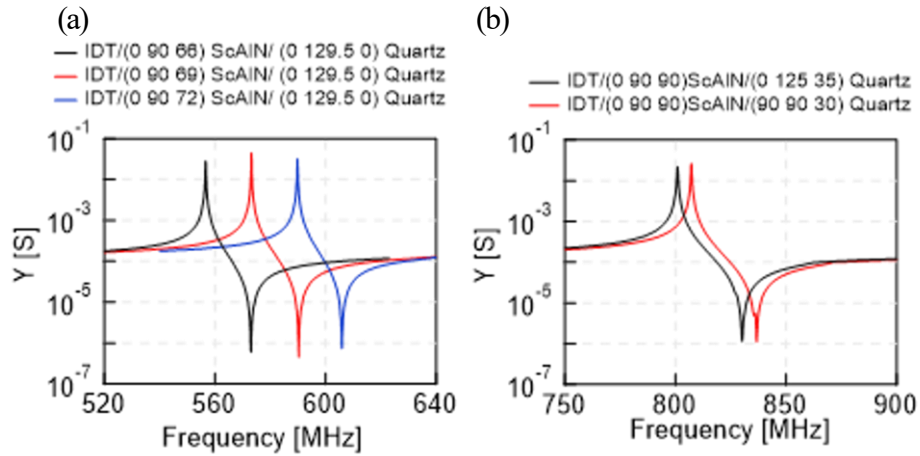


図2 FEM 解析による IDT/ScAlN/水晶構造(a) LSAW 共振子, (b) LLSAW 共振子のアドミタンス周波数特性

・高次モード RSAW の場合：

ScAlN 単層膜/ダイヤモンド基板構造上を伝搬する 1 次モード RSAW の結合係数 K^2 は AlN 膜/ダイヤモンド基板構造より大きくなる。また 1 次モード RSAW のさらなる高 K^2 値化に向け、2 層分極反転構造 ScAlN 膜/基板構造も検討されており、ScAlN 膜/IDT/分極反転 ScAlN 膜/ダイヤモンド基板 IDT/ScAlN 膜/ダイヤモンド基板構造上の K^2 に比べて約 2.8 倍となることが報告されている。そこで我々は、分極反転多層構造 ScAlN 薄膜/高音速基板を用いることでより高位相速度を持つ 2 次モード以上の RSAW においても高 K^2 がえられると考え、図 3(b) に示す分極反転構造 ScAlN 膜/高音速窒化物 w-BN 基板上を伝搬する高次モード RSAW の検討を行った。

ScAlN 薄膜全体の膜厚 $H/\lambda (=h_{1st}/\lambda + h_{2nd}/\lambda)$ は ScAlN 単層膜/BN 基板構造(図 3(a))での RSAW 解析により各モードにおいて K^2 最大となった膜厚で固定し、第一層目の規格化膜厚 h_{1st}/λ を $0 \leq h_{1st}/\lambda \leq H/\lambda$ の範囲内で変化させた。図 4 に 2 層分極反転 ScAlN 膜/BN 基板での 0-3 次モード RSAW の位相速度と K^2 の h_{1st}/λ 依存性を示す。全てのモードで h_{1st}/λ 変化による大きな位相速度の低下は見られなかった。 K^2 は h_{1st}/λ に大きく依存し、既報の 1 次モードのみならず 2 次モード以上の RSAW においても h_{1st}/λ を最適化することで、 K^2 が増大することがわかった。図 5 (a),(b) に単層、2 層分極反転構造 ScAlN/BN 基板上を伝搬する 3 次モード RSAW の x3 方向(RSAW の主変位方向)粒子変位分布を示す。2 層分極反転構造の境界は粒子変位が極大値を示す薄膜表面から約 0.28λ 付近に設定されていることがわかった。

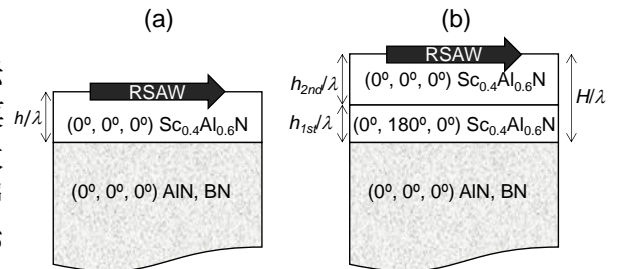


図 3 (a) ScAlN 単層膜, (b) 2 層分極反転 ScAlN 膜/AlN, BN 基板での SAW 解析モデル

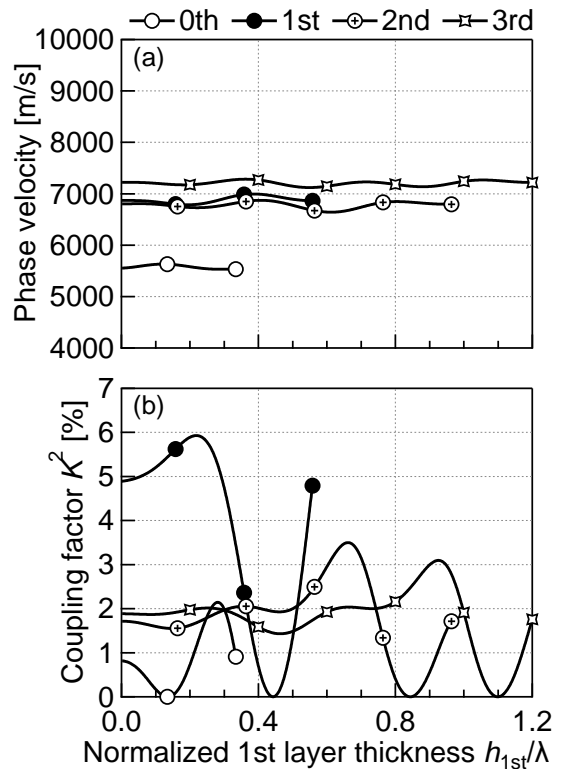


図 4 2 層分極反転 ScAlN 膜/BN 基板上を伝搬する 0-3 次モード RSAW の(a) 位相速度, (b) 結合係数の第 1 層規格化膜厚依存性

この結合係数増大時の粒子変位極大値と分極反転境界の関係から、粒子変位極大値が現れたすべての深さ (図 5(c), 薄膜表面から約 0.28λ , 0.641λ , 1.029λ) に分極反転境界を設定すればさらに結合係数が増幅すると考え、IDT/ScAlN 単層膜、2 層分極反転 ScAlN 薄膜/BN 基板構造 3 次モード RSAW 共振子のアドミタンス周波数特性を FEM 解析により評価した(図 6)。共振周波数は単層構造および 2 層分極反転構造よりも低くなったが、分極反転 4 層構造での結合係数 K_{eff}^2 値は 3.72% となり、単層構造の約 1.9 倍、2 層分極反転構造の約 1.1 倍となった。よって x3 方向粒子変位で極大値を示すすべての位置に分極反転境界を設定することが結合係数のさらなる向上に有効であることがわかった。

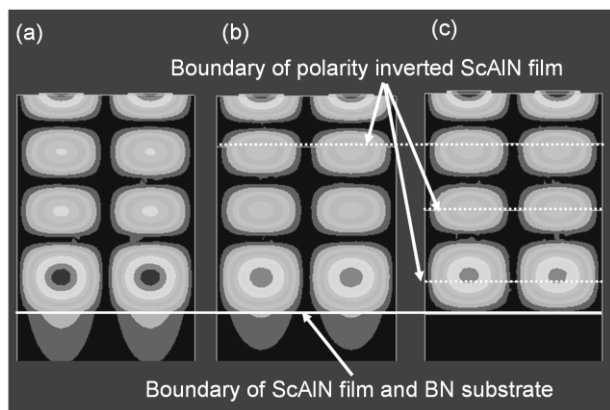


図 5 (a)ScAlN 単層膜, (b)2 層分極反転 ScAlN 膜, (c)4 層分極反転 ScAlN 膜/BN 基板における 3 次モード RSAW の x3 方向粒子変位分布

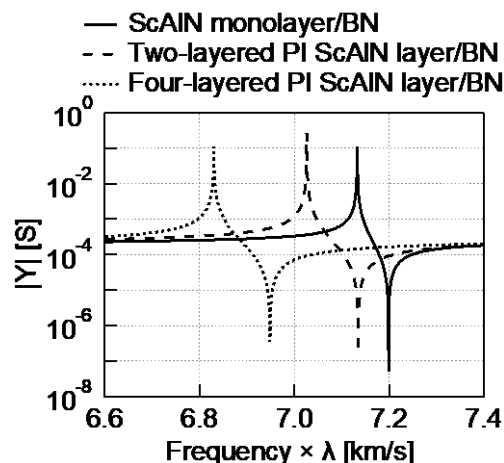


図 6 IDT/ScAlN 単層膜, 2 層分極反転(PI) ScAlN 膜, 4 層 PI ScAlN 膜/BN 基板 3 次モード RSAW 共振子のアドミッタンス周波数特性

2.2 c 軸配向 AlN 系膜の分極制御と分極反転多層膜の形成

前章にて高次モード RSAW において高結合係数を実現するには、c 軸配向 AlN 系膜の分極を制御し、かつ層厚を最適化した分極反転多層膜が必要となるが分かった。そこで、Si または Ge ドープによる分極制御を用いた分極反転構造 AlN 系膜の形成を試みた。

まず c 軸配向 SiAlN 膜および GeAlN 膜を RF マグネトロンスパッタ法により形成した。薄膜内の Si, Ge 濃度は Al ターゲット上に配置する Si または Ge 金属粒量を変化させることで制御した。膜の分極方向はプレステストにより評価した。図 7 より応力印加時に AlN 薄膜では Al 極性を示す負電圧, SiAlN 薄膜ではドープ濃度 2.4% 以上で N 極性を示す正電圧が観測された。同評価を GeAlN 膜にも行ったところ, Ge 濃度約 2.4% 以下では Al 極性を示す負電圧, Ge 濃度約 3.5% 以上では N 極性を示す正電圧が観測された。以上より Si もしくは Ge を約 4% 程度添加することで分極方向が安定的に制御できることが分かった。

次に RF マグネトロンスパッタ法により Ti/石英基板上へ奇数層に Al 極性 AlN 膜, 偶数層に N 極性 SiAlN 膜を成膜することで, 8 層の SiAlN/AlN 多層膜を形成した。形成した多層膜を用いて薄膜共振子 (Au 膜/SiAlN 膜/AlN 膜/Ti 膜/石英ガラス基板) を作製, ネットワークアナライザにより縦波変換損失周波数特性の測定を行った。図 8 に 1 層 AlN 膜, 8 層 SiAlN/AlN 膜共振子での縦波変換損失周波数特性を示す。1 層 AlN 膜共振子では 1 次モード (6.6 dB, 1.4 GHz) で共振しているのに対し, 8 層では 8 次モード (3.1 dB, 1.7 GHz) で共振し, かつその他の共振モードでは変換損失が大きく, 励振が抑えられている。加えて分極反転構造を考慮した Mason の等価回路による理論曲線と比較すると傾向がよく一致している。以上の結果より SiAlN 膜と AlN 膜を積層することで, 8 層の分極反転多層構造が

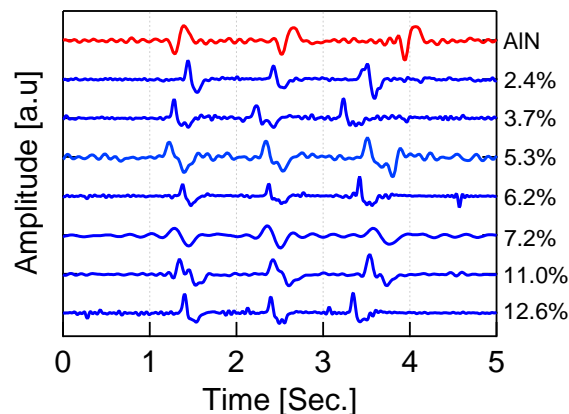


図 7 SiAlN 薄膜におけるプレステスト

形成できることを確認した。同様の実験を GeAlN 膜でも行ったところ、8 層分極反転多層膜も形成に成功した。

現在はより高品質な膜が形成可能な成膜条件の探索と ScAlN 膜への適応を目指している。また作成した分極反転 ScAlN 多層膜/高音速基板を用いた高次モード RSAW デバイスの実験的評価も予定している。

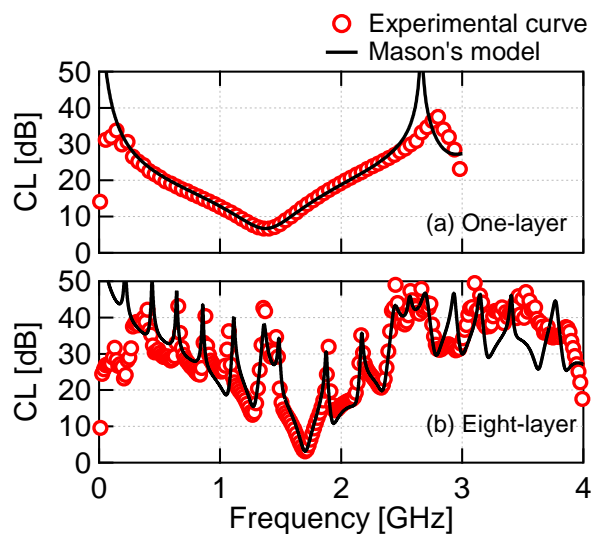


図 8(a) 1 層 AlN 膜, (b) 8 層 SiAlN/AlN 膜共振子の縦波変換損失(CL)周波数特性

以上