

令和2年12月14日

東京都千代田区四番町5番地3

科学技術振興機構 (JST)

Tel : 03-5214-8404 (広報課)

URL <https://www.jst.go.jp>

窒化ガリウムでMEMS振動子を開発 ～5G通信向けの高集積発振器に期待～

ポイント

- 第5世代移動通信システム(5G)に求められる高精度な同期を実現する高性能な周波数基準発振器として、微小電気機械システム(MEMS)発振器が期待されている。
- シリコン系MEMS振動子は高温下で品質が悪化したが、窒化ガリウムのひずみ制御により、600ケルビンの高温でも優れた性能を維持するMEMS振動子を開発した。
- 窒化ガリウム系振動子は集積性に優れ、タイミングデバイスへの応用が期待される。

JST 戦略的創造研究推進事業において、物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点のサン・リウエン 独立研究者(JST さきがけ研究者 兼任)は、窒化ガリウム(GaN)の熱によるひずみを制御することで、高温でも安定に動作するMEMS振動子を開発しました。

高速大容量の第5世代移動通信システム(5G)には高精度な同期が求められ、そのためには一定周期の信号を発生させる「タイミングデバイス」として優れた時間安定性と時間分解能を両立させた高性能な周波数基準発振器が必要です。従来の水晶発振器は集積性が悪く応用は限定的でした。微小電気機械システム(MEMS)^{注1)}発振器は高性能で集積性に優れていますが、シリコン(Si)系MEMS振動子は高温で品質が悪化するという問題がありました。

本研究では、優れた特性を持つGaN結晶を、引っ張りひずみを制御しながらSi基板上に成長させることに成功しました。さらに、このGaN結晶膜で作製したMEMS振動子は、温度が600ケルビンまで上昇しても自ら温度上昇に対応して安定に動作することを実証しました。熱によって内部に生じるたわみによって性能が維持されたと考えられます。今後、GaN系MEMS振動子の5G向けタイミングデバイスへの応用が期待されます。

本成果は2020年12月12日～18日(米国東部時間)にオンライン開催される国際学会「IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM2020)」で発表されます。

本成果は、以下の事業・研究領域・研究課題によって得られました。

戦略的創造研究推進事業 個人型研究(さきがけ)

研究領域: 「熱輸送のスペクトル学的理解と機能的制御」

(研究総括: 花村 克悟 東京工業大学 工学院 教授)

研究課題名: 「分極場工学による界面フォノン輸送の最適化」

研究者: サン・リウエン(物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 独立研究者)

研究実施場所: 物質・材料研究機構

研究期間: 令和元年10月～令和4年3月

<研究の背景と経緯>

第5世代移動通信システム（5G）によって高速大容量、多接続、低遅延が実現すれば、人が持つデバイスからモノのインターネット（IoT）まで幅広い需要が期待されます。携帯電話、自動運転や先進運転支援システム、鉄道などの通信には高精度な同期が求められ、そのためには一定周期の信号を発生させる「タイミングデバイス」として優れた時間安定性と時間分解能を両立させた高性能な周波数基準発振器が必要です。

従来の水晶発振器は大きく集積性が悪いため、半導体電子デバイスへの応用は限定的でした。一方で、MEMS発振器は、熱安定性、位相雑音の低減、周波数の調整、小型化によるCMOS（相補型金属酸化物半導体）との集積性に優れ、タイミングデバイスの強力な選択肢となっています。

時間安定性は通常、周波数温度係数（TCF）^{注2)}で表される振動子の熱安定性が影響しており、時間分解能は品質係数（Q値）^{注3)}で定めます。正確なタイムセンシングには、高温でも安定に動作し、低いTCFと高いQ値を兼ね備えたMEMS振動子が求められます。

通常、Si系MEMS振動子は弾性体のTCFが負で、最高でもマイナス30ppm/K（百万分率毎ケルビン）程度です。温度上昇に対応して安定に動作させるためのさまざまな工夫によりTCFは改善されてきましたが、いずれも振動子のQ値が低く、特に高温で悪化するという課題がありました。

<研究の内容>

窒化物半導体の1つである窒化ガリウム（GaN）は、バンドギャップが大きく、独特の圧電特性を持ち、熱安定性が高く、化学的に不活性で、IoTセンサーや通信におけるMEMS周波数基準発振器の振動子として有望視されています。Si基板上のGaN「GaN-on-Si（ガン・オン・シリコン）」の品質が向上すれば、MEMS振動子がCMOS技術と統合される可能性はさらに高まります。特に、エピタキシャル膜のGaNと基板Siの結晶構造が似ていないことによるひずみを、エピタキシャル成長方法や構造設計から調整でき、デバイス工学の新たな戦略になります。

本研究では、有機金属気相成長法（MOCVD）^{注4)}を用いてSi基板上に高品質GaN結晶を成長させることに成功しました。GaNとSiの界面のひずみを除去するための、大きな内部ひずみを実現するGaNを、Si上に直接成長させました。MOCVD成長での温度の下げ方を最適化したことによって、亀裂がなく、ひずみ除去層を用いる従来手法に匹敵する高品質のGaN結晶膜を得ました。

このGaN結晶膜で、レーザー描画技術やSi離型技術を用い、両持ち梁型の構造をしたMEMS振動子を作製しました（図1）。Si離型の前後でそれぞれ770メガパスカル、640メガパスカルの引張応力が得られました。

作製したGaN系MEMS振動子には2つの共振モードがあります。典型的な曲げモード^{注5)}を除くと、引っ張りひずみによって誘発される特別なモードも観測されます。これらは、座屈モード^{注6)}に分類されます。両持ち梁型振動子では、曲げモードの共振周波数はヤング率^{注7)}で決まりますが、座屈モードの共振周波数は座屈たわみとヤング率の両方で決まります。温度が上がるとヤング率は低下しますが、座屈たわみは増加します。GaNとSiの熱膨張係数は温度によって異なるため、熱によって内部に生じる応力が座屈たわみを起こします。そのため、座屈モードの温度に対する周波数安定性は大幅に改善しました。

座屈モードのTCFの温度依存性を調べたところ、最高でマイナス5 ppm/Kと、Si系MEMS振動子の6分の1の低いTCFが得られました（図2左）。最高のQ値は10万以上と、GaN系MEMS振動子としては最高値を達成しました。温度上昇に伴う変化が少なく、600ケルビンまで上昇しても悪化しません。GaNとSi基板の熱膨張率の差が大きなひずみを誘発してエネルギーを蓄え、高温でのQ値の向上に寄与したと考えられます（図2右）。

<今後の展開>

開発したGaN系MEMS振動子とそのひずみ制御技術は、周波数基準発振器の時間安定性と時間分解能を大幅に向上させます。小型で高感度なため、CMOS技術との統合による高集積化によって5G通信とIoT向けタイミングデバイス、車載アプリケーションおよび先進運転支援システムへの応用が期待されます。

<参考図>

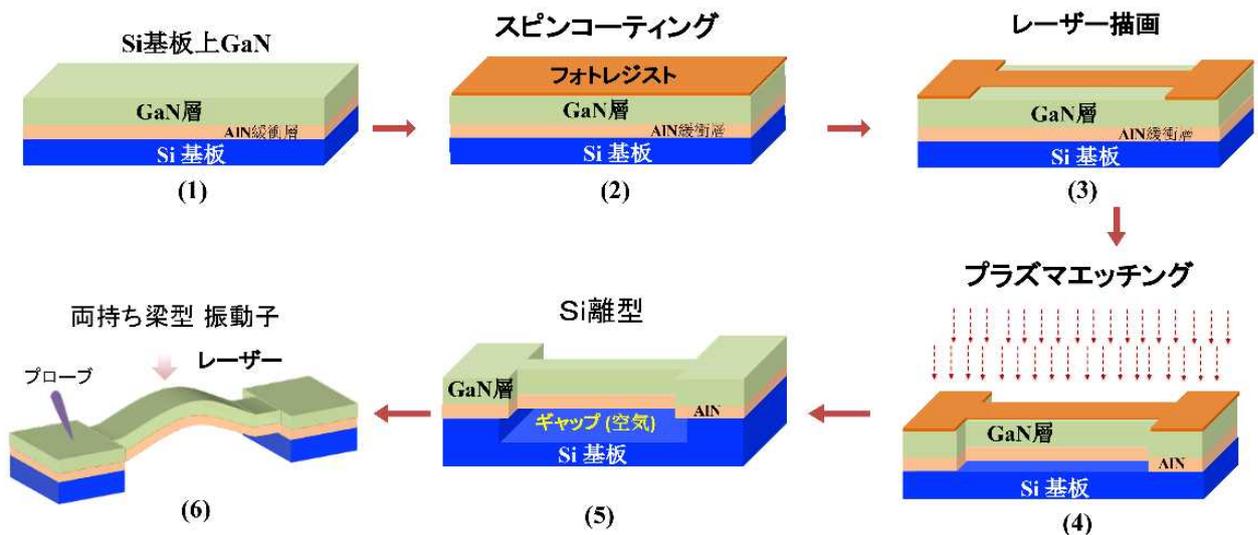


図1 両持ち梁型GaN系MEMS振動子の作製

開発したGaN結晶膜で両持ち梁型のMEMS振動子を作製した。Si基板上GaN薄膜成長層に、スピンコーティングでフォトリソを塗布し、レーザー描画でマスクを作製。さらにドライエッチングでGaNとAlNを削り取り、化学エッチングでフォトリソを除去し、Siを離型した。

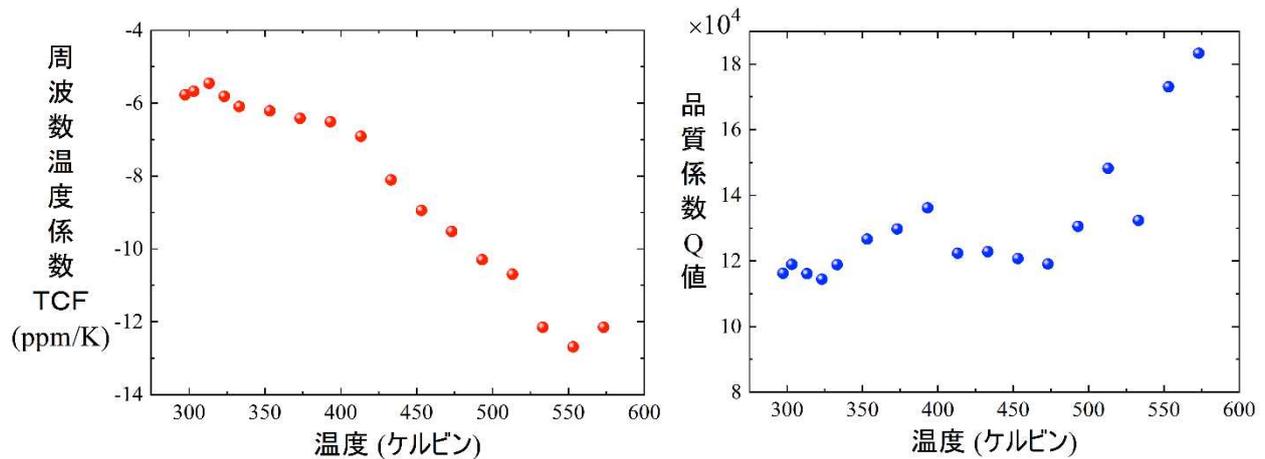


図2 GaN系MEMS振動子の座屈モードの温度依存性

- 左：周波数温度係数（TCF）。最高で約マイナス5 ppm/Kと、低いTCFが得られた。
- 右：品質係数（Q値）。10万以上と、GaN系MEMS振動子としては最高値を達成した。温度上昇に伴う変化が少なく、600ケルビンまで上昇しても悪化しなかった。

<用語解説>

注1) 微小電気機械システム (MEMS: Micro Electro Mechanical Systems)

機械要素部品、センサー、アクチュエーター、電子回路を1つの半導体、ガラス、有機材料などの基板上に微細加工技術によって集積化したデバイス。主要部分は立体形状や可動構造をエッチングプロセスで形成する。

注2) 周波数温度係数 (TCF: Temperature Coefficient of Frequency)

温度変化に伴う共振周波数の変化の度合いを示す。振動子の熱安定性はTCFで定義される。

注3) 品質係数 (Q値: Quality Factor)

振動において、1周期の間に系に蓄えられるエネルギーを、系から散逸するエネルギーで割ったもの。通常、 $Q = f_0 / \Delta f$ (f_0 : 共振ピークでの共振周波数、 Δf : 共振ピークの半値幅) から決定できる。共振周波数をレーザードップラー法あるいはリングダウン法で測定して評価する。Q値が大きいほど振動子のエネルギー散逸が小さく、時間分解能が高い。

注4) 有機金属気相成長法 (MOCVD: Metal Organic Chemical Vapor Deposition)

化合物半導体デバイスのウェハーを作製する有力な結晶成長法。加熱した基板結晶表面にⅢ族の有機金属化合物とⅤ族の有機金属化合物を同時に供給し、エピタキシャル成長をさせる。

注5) 曲げモード

振動における「モード」とは、「振動形態」を意味する。例えば、梁の曲げ振動の形態は「曲げモード」と呼ばれる。

注6) 座屈モード

両端の変位を拘束された梁（両端支持梁、ブリッジ）の内部に圧縮性の応力を加えると、中央部分が左右のどちらかに振れて、そこで安定位置を保つ。この振動モードを座屈モードと呼ぶ。

注7) ヤング率

フックの法則が成立する弾性範囲における、同軸方向のひずみと応力の比例定数のこと。

<論文タイトル>

“Self-Temperature-Compensated GaN MEMS Resonators through Strain Engineering up to 600 K”

(ひずみ工学による自己温度補償型窒化ガリウムMEMS振動子)

<お問い合わせ先>

<研究に関すること>

サン・リウエン

物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 独立研究者

〒305-0044 茨城県つくば市並木1-1

Tel : 029-860-4970 Fax : 02-9851-4005

E-mail : SANG.Liwen[at]nims.go.jp

<JSTの事業に関すること>

嶋林 ゆう子 (シマバヤシ ユウコ)

科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町

Tel : 03-3512-3525 Fax : 03-3222-2067

E-mail : presto[at]jst.go.jp