

ナノ構造を利用した 量子センシングと準粒子物性の開拓

高瀬 恵子*

Development of Quantum Sensing Using Nanostructures and Quasi-particle Physics

Keiko TAKASE*

The dynamic strain induced by surface acoustic waves on a piezoelectric substrate was calculated using the finite element method. It was found that devising a comb-shaped electrode structure enables to make strain with sufficient levels necessary to induce pseudo-Hall effects or pseudo-quantum Hall effects when graphene is placed at the center of the surface acoustic wave device. Furthermore, we designed and fabricated a mechanical oscillator using Lamb waves induced by the comb-shaped electrodes. Additionally, as part of pioneering millimeter-wave quantum technology useful to measure higher-frequency devices, we implemented a waveguide component in a cryogenic system.

1. 背景

表面を伝搬する波である表面弾性波は、近年、各種センシング素子のみならず新規物性開拓や基礎物性解明にも用いられており、とくにフォノンとマグノンの結合による物理解明やメカニクス・デバイスに利用されるなど優れた物性制御手法の一つになっている。一方、表面弾性波を用いて生じる動的な「歪み」を利用して半導体の電子状態をあらわに変調し、半導体中の準粒子の制御に挑戦する研究は、海外でいくつか報告が出始めたばかりであり未開拓の分野である。

そこで本研究では、表面弾性波が誘起する「動的歪み」と「空間ポテンシャル変調性」に着目する。それらを測定対象となるグラフェンや半導体ナノ構造などの低次元ナノ材料と結合させることで、測定対象の物理自由度を変調し、新たな量子機能が発現するセンシング素子の開発を行うことを目的とした。まずはグラフェンなど低次元層状物質を圧電基板上に配置したデバイスを想定したとき、表面弾性波がどの程度の変位を生じるかについて有限要素法により計算し、くし形電極の構造や印加電圧の大きさを変化させることで様々な物性変化を生じさせるために必要な歪み量が得られることが分かったので報告する。さらに、歪みを印加したりフォノンを利用したりする素子の一つとして機械振動子にも着目し、将来的な核スピンとの共鳴状態の実現を目指した構造も設計・作製した。また、これらの試料の将来的な測定のために冷凍機にDCラインおよび高周波配線等を配備し、さらなる高周波デバイス測定にも適用可能な、ミリ波帯量子技術の開拓にも着手した。

2. 圧電基板を用いた表面弾性波デバイスの設計・計算方法

圧電基板として、 LiTaO_3 および LiNbO_3 を用いた。この基板表面にくし型電極を配置した。電極材料としてはAlを用い、厚みを $0.3 \mu\text{m}$ 、幅を $0.96 \mu\text{m}$ とした。印加電圧を1 Vとし、周波数を1 GHzとして計算を行った。有限要素法の計算においては、特に断りがない限り、メッシュサイズを $0.5 \mu\text{m}$ （波長の1/8程度）とした。このように設定し、くし形電極の組数、配置、形状などを変えて計算を行った。

3. 圧電基板を用いた表面弾性波デバイスにおける計算結果

図1に、圧電基板として LiTaO_3 を用いたときの計算結果を示す。上図はくし形電極の配置を表している。下図は基板の変位量をカラープロットで表している。基板に上述したような条件で交流電圧を印加すると、くし形電極の直下以外に、くし形電極の間の中央部においても、表面近傍の変位が有意に大きくなっていることがわかる。これより、表面弾性波が励起されていることがわかる。これは、グラフェンなど二次元量子薄膜が配置される中央部で表面弾性波により変位が大きくなることを意味し、物性制御対象となる二次元量子薄膜を歪ませることに利用できる。

2026年3月5日 受理

* 豊田理研スカラー

東京農工大学大学院工学研究院先端電気電子部門／大学院工学府知能情報システム工学専攻

さらに、くし形電極の組数を増やす計算により、中央部の最大変位量が増加することがわかった。また、くし形電極の組数や印加電圧等を調整、最適化することで、たとえばグラフェンを中央部に配置した場合に擬ゲージ場により誘起される擬ホール効果を実験的に観測するのに十分な歪み量¹⁾が生成できることがわかった。さらに、局所的歪み量を増加させるため、平行配置されているくし形電極を Focused IDT と呼ばれる集光型に変更し、歪み量を計算した結果、電極配置を工夫することで、最大変位量が単独の平行型に比べて8倍程度増加することがわかった。これは、これまでの実験¹⁾では到達できなかった、エネルギーが離散化された擬ランダウ準位の形成および擬量子ホール状態の観測が可能となる程度に強い歪みを印加できると期待されることを意味する²⁾。

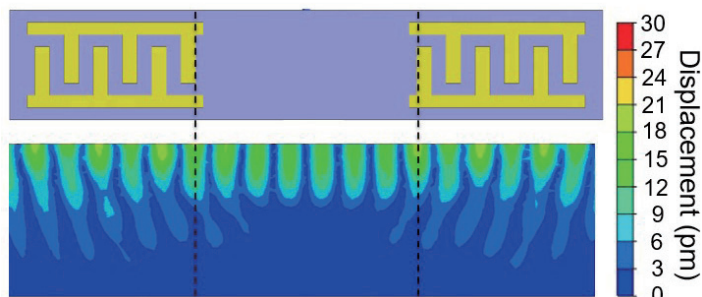


図1 表面弾性波デバイスの計算例.

4. 機械振動子の設計、ミリ波量子技術開拓のための導波管コンポーネント開発

さらに、表面弾性波と同様にくし形電極で加振するラム波を用いた機械振動子の設計も行った。アドミッタンスの共振ピークの周波数を計算し、各振動モードの変位等を計算した。実際に機械振動子の作製を進めるにあたって、両持ち梁の中空構造を作製するためにドライエッチングの条件出し等も行い、試料を作製した³⁾。また、将来的に、より高周波のデバイスを利用できるようにミリ波量子技術の開拓にも着手し、ミリ波導波管コンポーネントの冷凍機実装等を行った⁴⁻⁶⁾。

5. まとめ

本研究では、圧電基板上の表面弾性波により誘起される動的歪み量の計算を有限要素法により行った。くし形電極構造を工夫することで、グラフェンを表面弾性波デバイス中央部に配置した時に擬ホール効果や擬量子ホール効果が期待されるほどの歪み量を達成できることがわかった。さらに、くし形電極により誘起されるラム波を用いた機械振動子の設計と作製、また、より高周波デバイスを評価するときに有用となるミリ波量子技術開拓の一つとして、導波管コンポーネントの冷凍機実装等を行った。

REFERENCES

- 1) F. Guinea, *et al.*, *Nat. Phys.*, **6** (2010) 30.
- 2) 岩井瑛音, 東出桐英, 高瀬恵子, 第73回応用物理学会春季学術講演会 15p-PB2-68 (2026).
- 3) 太田理沙, 金子晋久, 高瀬恵子, 岡崎雄馬, 第73回応用物理学会春季学術講演会 16p-PB3-10 (2026).
- 4) 宮田 楓, 東出桐英, 東島侑矢, 金子晋久, 高瀬恵子, 岡崎雄馬, 第73回応用物理学会春季学術講演会 16p-PB3-9 (2026).
- 5) T. Higashide, K. Miyata, Y. Tojima, N.-H. Kaneko, Y. Okazaki and K. Takase, *IQuRa Symposium* (2026).
- 6) 東出桐英, 宮田 楓, 東島侑矢, 金子晋久, 高瀬恵子, 岡崎雄馬, 第73回応用物理学会春季学術講演会 17p-S4_201-9 (2026).