

2次元フォノンニック結晶導波路における弾性表面波の時間分解イメージング

Time-resolved imaging of surface acoustic waves on two-dimensional phononic crystal waveguides

Keisuke Nanri^{1,†}, Osamu Matsuda¹, Motonobu Tomoda¹, Oliver B. Wright¹, Dieter Profunser¹, Abdelkrim Khelif², Vincent Laude², and Sarah Benchabane²

(¹Grad. Sch. Eng., Hokkaido Univ., Sapporo, Japan; ²FEMTO-ST, Besancon, France)

南里圭佑^{1,†}, 松田理¹, 友田基信¹, Oliver B. Wright¹, Dieter Profunser¹, Abdelkrim Khelif², Vincent Laude², Sarah Benchabane²

(¹北海道大 工; ²FEMTO-ST, Besancon, France)

Surface acoustic wave propagation at frequencies up to 1 GHz is imaged in the time domain on several two-dimensional phononic crystal waveguides by means of ultrashort pulsed optical excitation and detection. These images are Fourier Transformed and analyzed.

1. はじめに

弾性定数の異なる物質が周期的に配列された構造を持つ物質内では音響分散関係中にバンドギャップが発生しうることが知られている[1]。このような周期構造はフォノンニック結晶と呼ばれる。1次元周期構造による弾性表面波デバイスは高周波数領域での信号処理に広く活用されている。2次元フォノンニック結晶はフォノンニック導波路回路など、さらに幅広い応用が期待される。これまでにシミュレーション、実験も含め様々な方法によるフォノンニック結晶の解析が行われている[2-4]。これらの中でも、弾性表面波の伝搬の様子を光によって時間分解で可視化する方法は特に有用である [5]。

本研究では μm オーダーの2次元フォノンニック結晶中に導波路を作り、そこを伝搬する約1 GHzに達する弾性表面波の伝搬の時間分解イメージングデータを光学的手法によって取得し、解析する。

2. 試料

試料として Si(100)面に光学リソグラフィとDRIE (Deep Reactive Ion Etching) により作製した2次元フォノンニック結晶を用いた。光学リソグラフィによりマスクの周期パターンを試料に転写し、そこに SF_6 と C_4F_8 の高密度プラズマを用いたDRIE によってパターンにあわせてエッチングをし、周期的に配置された直径 $5.0 \sim 5.5 \mu\text{m}$ 、深さ $50 \mu\text{m}$ のホールを作製した。

また、フォノンニック結晶直線導波路の比較のために同様の手法により作製された別のパターンの導波路をいくつか用意した。

3. 実験

実験系の概要を Fig. 1 に示す。繰り返し周波数 80.45 MHz、中心波長 830 nm、パルス幅 $\sim 200 \text{ fs}$ のモードロック Ti-サファイアレーザーを用いてポンプ・プローブ法により実験を行った。波長 830 nm の光はプローブ光として使われ、その第二高調波である波長 415 nm の光はポンプ光として使われた。ロックイン増幅器を用いて信号を検出するために、ポンプ光は音響光学素子(AOM)により 1 MHz に変調される。その後ポンプ光は対物レンズにより直径 $1 \mu\text{m}$ に集光され、試料に垂直に入射する。一方プローブ光は最大 4 m まで可変可能な遅延光路を通る。このプローブ光は、干渉計において2つに分けられ、倍率 50 倍の対物レンズを介して試料に数 100 ps の時間差 τ を持って入射する。その後ディテクターにおいてこの2つの反射光の位相差が干渉強度として検出され、その値から時間 τ の間の試料の表面変位の変化を測定することができる[6]。これは近似的に表面変位速度と見なせる。2軸可動鏡により2次的にプローブ光集光位置を走査することで、ある時刻における一枚のスナップショットが得られ、さらに遅延光路の距離を変えることで各時刻におけるイメージングが可能となる。

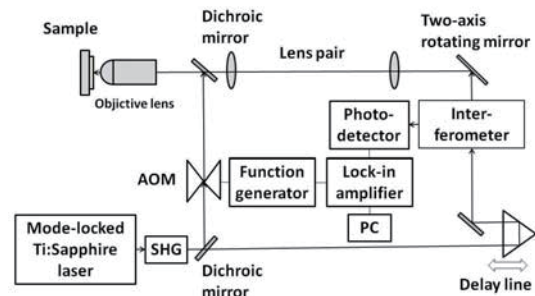


Fig.1. Schematic diagram of the experimental setup for the time-resolved surface acoustic wave imaging. AOM: acousto-optical modulator. SHG: second harmonic generation crystal. PC: personal computer.

k-nanri@eng.hokudai.ac.jp

4. 結果と考察

様々なフォノンニック結晶の導波路における時間分解イメージングデータを取得した。

得られたデータの一部を Fig. 2 に示す。(a)は光反射率測定による導波路の構造の様子であり、(b)が位相変化による表面変位速度のイメージである。遅延光路を走査することで計 30 枚からなる約 0.4 ns 刻みの時間分解イメージを得た。レーザーの繰り返し周波数は 80.45 MHz のため、フーリエ変換を行うことで 80.45 MHz の整数倍の周波数の画像が 14 枚得られ、結果として最大で 1126.3 MHz までのデータが得られた。

Fig. 3 は得られたフーリエ振幅イメージから 321.8 MHz の振動についてのある時刻のスナップショットを再構築したものである。

一連のフーリエ振幅イメージから、フォノンニック導波路では 300 MHz 付近の周波数成分のみが導波路を伝搬していることがわかった。フォノンニック結晶中の導波路内ではフォノンニックバンドギャップに対応する周波数成分が導波路構造に強く閉じ込められて伝搬することが期待される。実験に用いたフォノンニック結晶のバンドギャップは 300 MHz 付近に存在すると予想され、これは上記実験で観測された導波路モードの周波数 321.8 MHz とよく一致する。

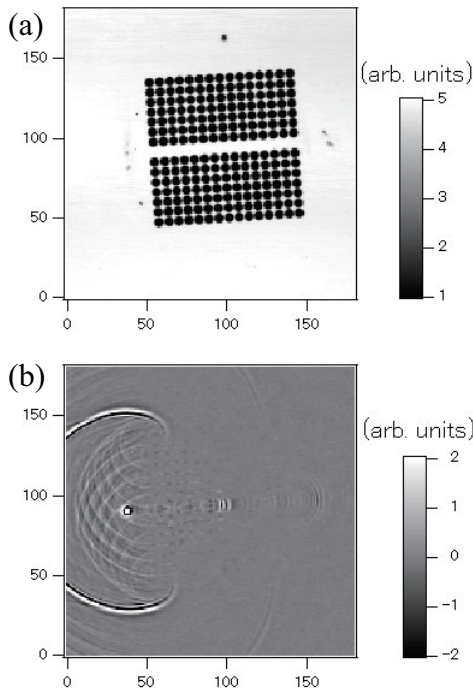


Fig. 2. (a) Optical reflectivity images for a 180 μm \times 180 μm region of a phononic crystal waveguide. (b) Corresponding snapshot of the SAW propagation at the moment of pump pulse arrival.

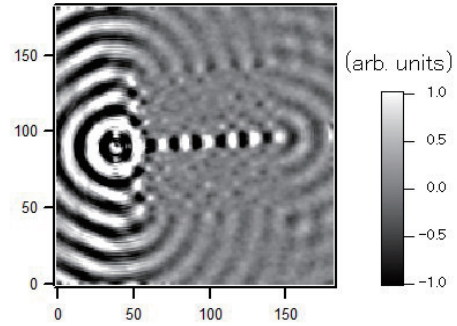


Fig. 3. Component of the SAW propagation field for the frequency 321.8 MHz over a 180 μm \times 180 μm region of the phononic crystal waveguide.

5. まとめ

2次元フォノンニック結晶導波路における弾性表面波をイメージングすることに成功した。今後、さまざまな導波路におけるデータの解析をさらに進めることで、フォノンニック結晶導波路の応用の可能性を調べていく予定である。

謝辞

本研究は科学技術振興機構の戦略的国際科学技術協力推進事業による助成、および日本学術振興会による科研費(19206013)を受けてなされました。

引用文献

1. M. S. Kushwaha, P. Halevi, L. Dobrzynski and B. D.-Rouhani: Phys. Rev. Lett. **71** (1993) 2022.
2. A. Khelif, B. D.-Rouhani, J. O. Vasseur, P. A. Deymier, P. Lambin and L. Dobrzynski: Phys. Rev. B **65** (2002) 174308.
3. T. Gorishnyy, C. K. Ullal, M. Maldovan, G. Fytas and E. L. Thomas: Phys. Rev. Lett. **94** (2005) 115501.
4. S. Benchabane, A. Khelif, J.-Y. Rauch, L. Robert and V. Laude: Phys. Rev. E **73** (2006) 065601.
5. D. M. Profunser, E. Muramoto, O. Matsuda and O. B. Wright: Phys. Rev. B **80** (2009) 014301.
6. T. Tachizaki, T. Muroya, O. Matsuda, Y. Sugawara, D. H. Hurley and O. B. Wright: Rev. Sci. Instrum. **77** (2006) 043713.
7. J.-H. Sun and T.-T. Wu: Phys. Rev. B **74** (2006) 174305.