

一般セッション(口頭講演) | 22 合同セッションM 「フォノンエンジニアリング」 : 22.1 合同セッションM
「フォノンエンジニアリング」

📅 2025年3月15日(土) 13:00 ~ 16:30 🏢 K501 (講義棟)

[15p-K501-1~12] 22.1 合同セッションM 「フォノンエンジニアリング」

中村 芳明(阪大)、野村 政宏(東大)、馬場 寿夫(JST)

◆ 英語発表

13:00 ~ 13:15

[15p-K501-1]

[The 57th Young Scientist Presentation Award Speech] Designing advanced nanophononic devices through genetic algorithm

○Michele Diego¹, Matteo Pirro¹, Byunggi Kim¹, Roman Anufriev¹, Masahiro Nomura¹
(1.Institute of Industrial Science, The University of Tokyo)

13:15 ~ 13:30

[15p-K501-2]

フェムト秒レーザー誘起周期構造を用いたシリコン薄膜の熱伝導率制御

○金 ビョンギ^{1,2}、半間 大基¹、伏信 一慶¹、野村 政宏² (1.科学大、2.東大生研)

◆ 英語発表

13:30 ~ 13:45

[15p-K501-3]

Enhanced thermorefectance coefficient using graphene layers on SiO₂/Si

○(D)WenChiao Lin¹, Yunhui Wu¹, Youhei Ogawara¹, Byunngi Kim², Sotaro Ito¹, Masahiro Nomura¹ (1.IIS Univ. of Tokyo, 2.Science Tokyo)

13:45 ~ 14:00

[15p-K501-4]

時間領域サーモリフレクタンス法を用いたフィラーの熱伝導率測定法の開発

○伊藤 蒼太郎¹、キム ビョンギ^{1,2}、柳澤 亮人¹、Jalabert Laurent^{1,3}、Ikzibane Hafsa¹、野村 政宏^{1,3}
(1.東大生研、2.科学大、3.LIMMS CNRS)

14:15 ~ 14:30

[15p-K501-5]

縞状加熱を用いた薄膜面内方向熱拡散率計測手法の開発

○山下 雄一郎¹、有馬 寛人¹、八木 貴志¹ (1.産総研)

14:30 ~ 14:45

[15p-K501-6]

AFM型温度波熱分析法によるナノスケール熱拡散率マッピング

○森岡 亮太¹、野村 光希¹、内藤 知岳¹、劉 芽久哉²、森川 淳子¹ (1.科学大物質、2.産総研)

14:45 ~ 15:00

[15p-K501-7]

X線非弾性散乱法を用いたΓ-K点間の音響モードスペクトル線幅増大の考察

○横川 凌^{1,2,3}、前田 唯葉⁴、荒井 康智⁵、米永 一郎⁶、萬條 太駿⁷、筒井 智嗣⁷、小椋 厚志^{4,3} (1.広島大 RISE、2.広島大院先進理工、3.明治大MREL、4.明治大理工、5.JAXA、6.東北大、7.JASRI)

15:00 ~ 15:15

[15p-K501-8]

SiGe混晶における低エネルギー局在フォノンモード強度とGeクラスターサイズの関係:分子動力学計算による解析

○(M2)並木 大輔¹、内藤 真慈¹、平井 健太郎¹、横川 凌^{2,3,4}、小椋 厚志^{5,4}、渡邊 孝信¹ (1.早大理工、2. 広大RISE、3.広大先進理工、4.明大MREL、5.明大理工)

15:30 ~ 15:45

[15p-K501-9]

トポロジカルフォノンニック結晶導波路を伝播するラム波の時間分解イメージング

○齊藤 敦¹、Otsuka Paul¹、友田 基信¹、松田 理¹、畑中 大樹²、山口 浩司²、鶴田 健二³ (1.北大院工、2.NTT物性研、3.岡山大院自然)

15:45 ~ 16:00

[15p-K501-10]

三角格子ウェーブマシンを用いたトポロジカルスピンホール系導波路の設計

○(B)倉野 弘海¹、笹井 遥貴¹、松田 理¹、友田 基信¹ (1.北大工)

16:00 ~ 16:15

[15p-K501-11]

GaAs/AlGaAs超格子およびGaN/AlGaN超格子上に形成した金属半導体ストライプ構造からの加熱輻射の観測

○吉川 大樹¹、大島 拓巳¹、長井 奈緒美²、斎藤 巧夢³、平川 一彦²、岩谷 素顕³、石谷 善博¹ (1.千葉大院工、2.東京大院、3.名城大院)

16:15 ~ 16:30

[15p-K501-12]

金属-半導体マイクロ正方格子構造の加熱による縦光学フォノン共鳴輻射

○(B)大島 拓巳¹、貴志 優彦¹、吉川 大樹¹、石谷 善博¹ (1.千葉大工)

Designing advanced nanophononic devices through genetic algorithm

IIS, The University of Tokyo¹

◦Michele Diego^{1*}, Matteo Pirro¹, Byunggi Kim¹, Roman Anufriev¹ and Masahiro Nomura¹

*email: diego@iis.u-tokyo.ac.jp

Controlling acoustic/phononic properties at the nanoscale is essential for various applications, ranging from thermal transport to mechanical resonators and quantum technologies. Phononic crystals have become the most established class of structures for engineering and tailoring phononic properties in advanced nanophononic devices [1]. However, their design typically relies on conventional shapes and simple guidelines based on human intuition. Here, we first present the experimental realization of an automated approach to designing phononic crystals through an inverse design method based on a genetic algorithm [2]. With this method, the desired phononic properties are input into the algorithm, which automatically finds the optimal structural design to meet these specific requirements. By moving beyond traditional, human-made designs, this approach can find novel structures with unique properties. Then, we demonstrate how inverse design can be applied to more complex devices, such as one-dimensional hybrid diamond-piezoelectric phononic cavities [3]. In this context, the goal is to enhance the device efficiency in exciting localized acoustic resonant modes, which can be used to control transitions in qubits based on diamond color centers.

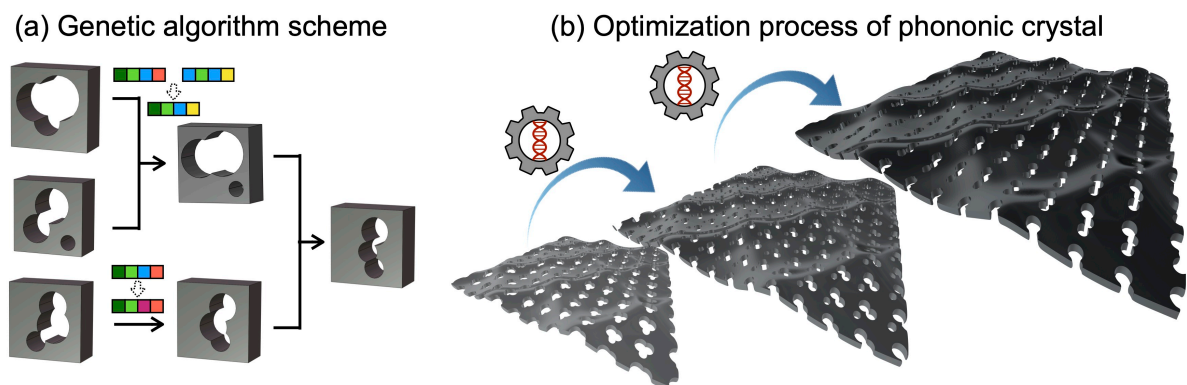


Fig.1 Automated design for phononic crystals

a. Schematic representation of the genetic algorithm optimization process, where crossover and mutations guide the evolution of phononic crystals. **b.** Optimization for a two-dimensional phononic crystal, obtained through the genetic algorithm process.

References

- [1] M.Diego, R.Anufriev, R.Yanagisawa and M.Nomura, *Phonon dispersion of nanoscale honeycomb phononic crystal: gigahertz and terahertz spectroscopy comparison*, **Eur. Phys. J. Plus** 139, 1032 (2024)
- [2] M. Diego, M.Pirro, B.Kim, R.Anufriev and M.Nomura, *Tailoring Phonon Dispersion of Genetically Designed Nanophononic Metasurface*, **ACS Nano** 18, 28, 18307–18313 (2024)
- [3] M. Diego, B.Kim, M.Pirro, S.Volz, and M.Nomura, *Piezoelectrically driven diamond phononic nanocavity by phonon-matching scheme for quantum applications*, **Phys. Rev. Applied** 21, 064064 (2024)

Acknowledgements

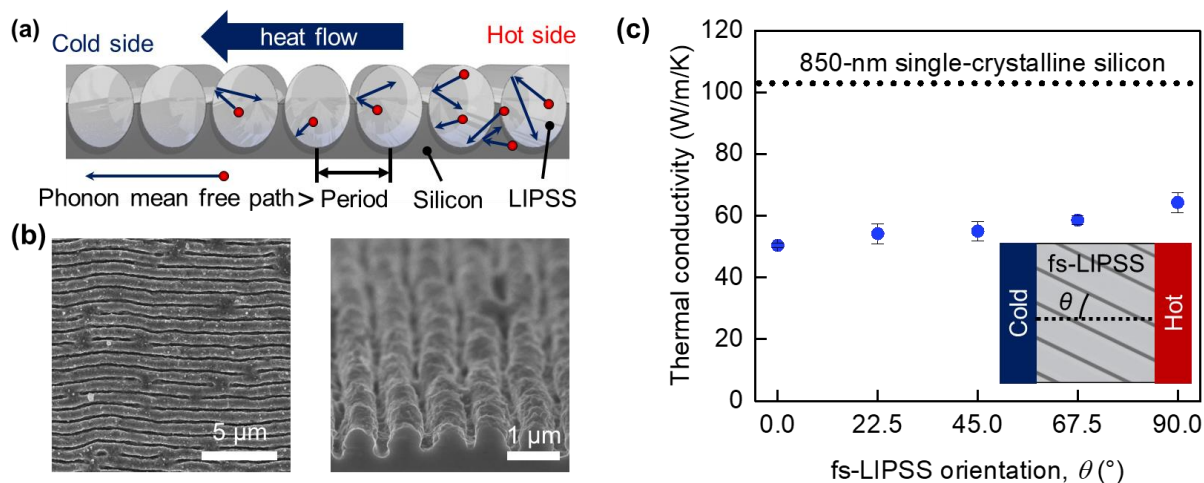
This work was supported by JST Moonshot R&D grant (JPMJMS2062), by the JSPS KAKENHI Research Activity Start-up (Grant Number JP23K19196) and by the JSPS KAKENHI (Grant Number JP23KF0203)

フェムト秒レーザー誘起周期構造を用いたシリコン薄膜の熱伝導率制御 Controlling thermal conductivity of silicon thin films using femtosecond laser-induced periodic surface structures

科学大¹, 東大生研² ◦キム ビョンギ^{1,2}, 半間 大基¹, 伏信 一慶¹, 野村 政宏²
Science Tokyo¹, IIS UTokyo², ◦Byunggi Kim^{1,2}, Hiroki Hanma², Kazuyoshi Fushinobu¹, Masahiro Nomura²

E-mail: kim.b.aa@m.titech.ac.jp

- 序論**：固体薄膜にナノ構造体を作製することで、熱フォノン輸送に大きな影響を与えることができ、熱伝導率変調[1]、マイクロ熱電変換素子[2]などの高度な熱制御技術に利用できる。しかし、ナノ構造の作製には電子線リソグラフィーが用いられる場合が多く、実用化には高速かつ高スループットなナノ加工技術の開発が求められている。本研究では、従来の電子線リソグラフィーよりも 10^3 - 10^4 倍も高速にナノ構造形成が可能な手法であるフェムト秒レーザー誘起周期構造 (femtosecond Laser-Induced Periodic Surface Structures; fs-LIPSS) 形成法を用いて、シリコン薄膜の熱伝導率制御を行ったので報告する。
- 手法**：厚さ 850 nm の単結晶シリコン薄膜に対し、波長 1,030 nm、パルス幅 220 fs のフェムト秒レーザーを照射することで周期 860 nm で平均溝深さ 560 nm の fs-LIPSS を作製した。fs-LIPSS をエアブリッジ化させ、マイクロサーモリフレクタンス法を用いて面内方向の熱伝導率を評価した。
- 結果および考察**：図 1(a)に fs-LIPSS を用いた熱フォノン輸送制御の原理を示す。熱フォノンの周期より小さい fs-LIPSS 構造では表面散乱が増加し、熱伝導率が減少する。図 1(b)に作製した fs-LIPSS の SEM 像を示す。図 1(c)に熱流方向と走査方向の角度 θ を変えて作製した fs-LIPSS の熱伝導率測定結果を示す。すべての fs-LIPSS の方向において、熱伝導率が 40-50% 減少し 50-60 W/m/K となった。室温で単結晶シリコンにおける熱フォノン平均自由行程は $1 \mu\text{m}$ 程度[3]であり、fs-LIPSS の周期より大きいため、熱伝導変調が行われたと考えられる。今後、構造最適化により熱制御技術の新展開が期待される。



謝辞：本研究は科研費(23K13260, 23K20916, 21H04635)、天田財団(AF-2022237-C2)の支援を得て行われた。

参考文献：[1] P. E. Hopkins *et al.*, *Nano Lett.* **11** (1), 107-112 (2011). [2] J.-K. Yu *et al.*, *Nat. Nanotechnol.* **5** (10), 718-721 (2010). [3] K. Esfarjani *et al.*, *Phys. Rev. B* **84** (8), 085204 (2011).

Enhanced thermoreflectance coefficient using graphene layers on SiO₂/Si

Wen-Chiao Lin¹, Yunhui Wu¹, Youhei Ogawara¹, Byunngi Kim², Sotaro Ito¹,
and Masahiro Nomura¹

IIS Univ. of Tokyo¹, Science Tokyo²

E-mail: wclin@iis.u-tokyo.ac.jp

Time-domain thermoreflectance (TDTR) is a widely used non-contact technique for measuring the thermal conductivity of materials, typically employing metal thin films as transducers. However, for suspended thin films and thermolabile materials, metal deposition can be challenging and may risk damaging the material. Graphene, a monolayer of carbon atoms with exceptional thermal, electrical, and optical properties, offers a promising alternative for such applications, including thermal conductivity measurements.

In TDTR, reflectivity changes induced by temperature fluctuations are detected and quantified using the thermoreflectance coefficient (C_{TR}), a critical parameter influencing measurement sensitivity. The C_{TR} typically ranging from 10^{-5} to 10^{-3} K⁻¹, with gold having a C_{TR} of approximately -3×10^{-4} K⁻¹ at a wavelength of 525 nm [1,2]. This study employs 2D TDTR to measure the C_{TR} of few-layer graphene. Results reveal that graphene with 2 to 8 layers exhibits a C_{TR} comparable to gold at 525 nm, ranging from 3×10^{-4} K⁻¹ to 9×10^{-4} K⁻¹. These results demonstrate the viability of graphene as an innovative transducer, paving the way for more accurate and versatile thermal measurements. This study explores the potential of few-layer graphene as a replacement for traditional metal transducers in TDTR measurements.

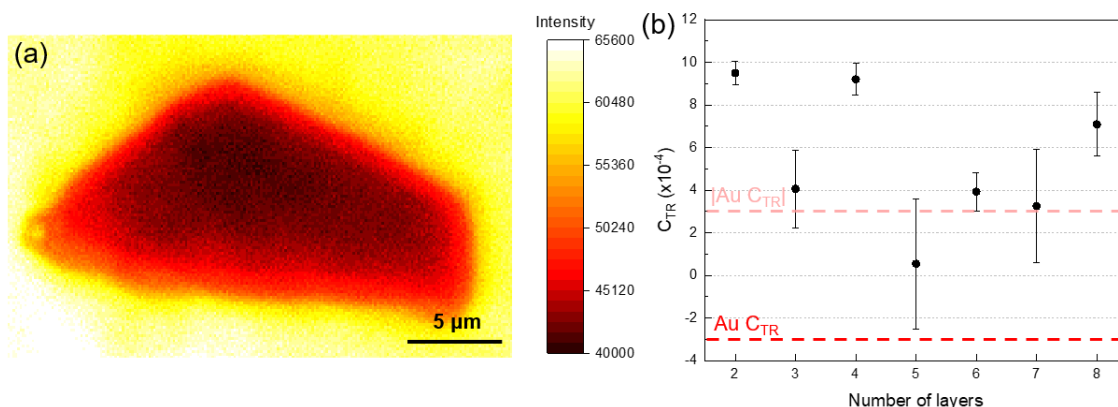


Figure 1. (a) Thermoreflectance image of a six-layer graphene flake on a 290 nm SiO₂/Si substrate under 525 nm LED illumination at 300K. (b) Experimentally measured C_{TR} of few-layer graphene at a wavelength of 525 nm. The red dashed line represents the C_{TR} of gold at 525 nm, as reported in the literature [2], and the pink dashed line is absolute value of gold C_{TR} at 525 nm.

Acknowledgement: This work was supported by JST EIG CONCERT-JAPAN (Grant No. JPMJSC22C6) and SPRING (Grant No. JPMJSP2108).

References: [1] T. Favaloro *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **86**, 024903 (2015). [2] B. Abad *et al.*, Renew. Sust. Energ. **76**, 1348 (2017).

時間領域サーモリフレクタンス法を用いた 5 μm フィラーの熱伝導率測定法の開発

Thermal conductivity measurement method of 5- μm -fillers using TDTR method

東大生研¹, 科学大², LIMMS CNRS³

○伊藤 蒼太郎¹, キム ピョンギ^{1,2}, 柳澤 亮人¹, L. Jalabert^{1,3}, H. Ikzibane¹, 野村 政宏^{1,3}

IIS Univ. of Tokyo¹, Science Tokyo², LIMMS CNRS³

○S. Ito¹, B. Kim^{1,2}, R. Yanagisawa¹, L. Jalabert^{1,3}, H. Ikzibane¹, M. Nomura^{1,3}

E-mail: s-ito831@iis.u-tokyo.ac.jp

背景・目的: 半導体デバイスの微細化が進む中、エネルギー密度は増加している。発熱によるデバイス性能の低下が問題となっており、放熱対策が重要視されている。その中で酸化アルミニウム球・エポキシ混合物フィラーが熱界面材料(TIM: Thermal Interface Material)として利用されており[1]、様々な手法で熱伝導率の計測がされてきた[2,3]。しかしそのサイズ・形状による計測、解析の難しさから、無加工アルミナ球単体での計測は難しく、計測手法の開発が望まれてきた。そこで我々は、マイクロスケール時間領域サーモリフレクタンス法(μ -TDTR 法: μ -Time Domain Thermo-Reflectance)を用いた非接触光学測定と、有限要素シミュレーションの組み合わせにより、微小アルミナ球の熱伝導率計測を初めて可能にした結果について報告する。

手法・結果: 酸化膜を有したシリコン基板上に、フォトレジストを接着層として、アルミナ球を多数散布し、測定用アルミ薄膜を成膜することでサンプルを作製した (Fig. 1a)。作製したサンプルを μ -TDTR 法を用いて 1 μs 以下の微小時間領域における加熱および熱緩和過程を計測した。その後、有限要素シミュレーションを用いた解析を行い、直径 5.3 μm のアルミナ球の熱伝導率として、バルク材とほぼ同じ $28 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ を得た (Fig. 1b)。

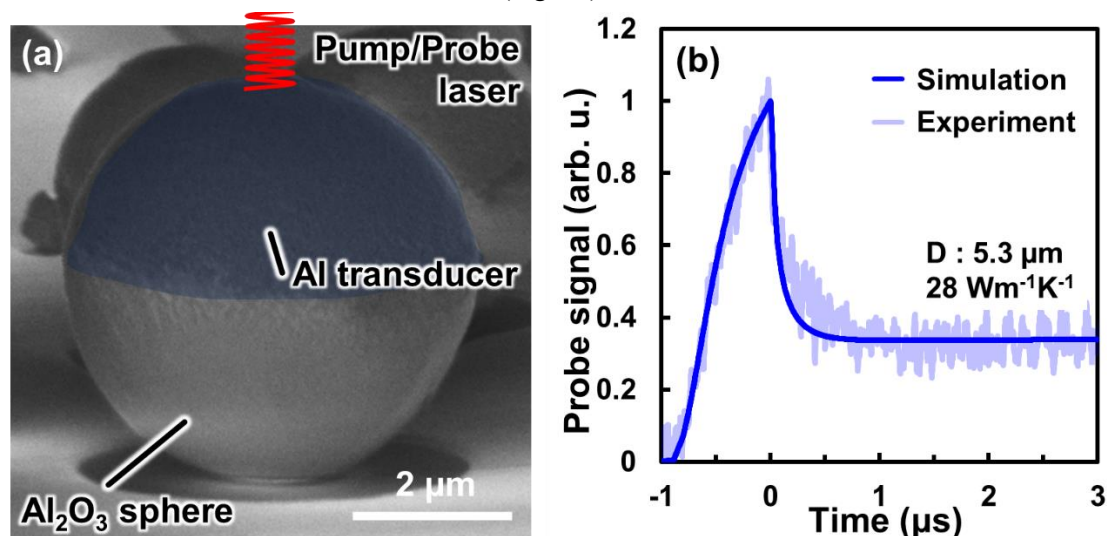


Figure 1 (a) SEM picture of Al_2O_3 microsphere sample for μ -TDTR measurement.

(b) Fitting result of the experimental curve of the TDTR signal by FEM simulations.

謝辞: 本研究は、JST ALCA-Next (JPMJAN23E3) の支援を受けて行われた。**参考文献:** [1] B. Wei et al., *Susmat*. 2024;4:e239. [2] S. Choi et al., *Composites: Part B* 51 (2013) 140-147. [3] M F. Thompson et al., *Appl. Phys. Lett.* 119, 023904 (2021).

縞状加熱を用いた薄膜面内方向熱拡散率計測手法の開発

Development of measurement method for in-plane thermal diffusivity for thin film using striped heating pattern

産総研¹ ○山下 雄一郎¹, 有馬 寛人¹, 八木 貴志¹

AIST¹, °Yuichiro Yamashita¹, Hiroto Arima¹, Takashi Yagi¹

E-mail: yuichiro-yamashita@aist.go.jp

基板上に作成された薄膜熱電材料の性能は、多くの場合で面内方向の電気特性と面直方向の熱特性を基に評価されてきた。材料に依存するが試料厚さが概ね 100 nm を下回るようなナノスケール薄膜では、面内方向の熱輸送特性に表面や界面における散乱効果が顕著に表れる事が分かっており、たとえ結晶構造的に等方的であっても、材料としては面直方向と面内方向で物性値が異なることは想像に難くない。本研究では、測定方向に矛盾の無い熱電特性評価にむけて、薄膜試料における面内方向の熱特性評価を実現することを目的としている。

本手法では時間領域サーモフレクタンス測定（繰返しナノ秒パルス加熱・連続光測温方式[1]）を基礎とし、2次元熱伝導の実現のために、加熱レーザーの光路にメタルマスクを導入して、図1に示すようなライン幅/スペース幅(=2 μm / 2 μm)の縞状パターン加熱を実施した。サーモフレクタンス測定信号はライン上およびスペース上の2か所で取得し、シミュレーションによって得られた温度応答曲線に同時にフィッティングすることで、面内方向の物性を決定する。

図2にC面サファイア基板上のMo薄膜(100 nm厚)における測定信号を示す。スペース個所にも加熱光の回折光が約30%混入するため、その影響を加味した温度応答シミュレーションを実施し、測定と解析結果が矛盾の無いことを確認した。ここでMo薄膜およびC面サファイアは等方性を仮定し、それぞれの熱伝導率を 59.9 Wm⁻¹K⁻¹および 34.8 Wm⁻¹K⁻¹とした。講演では、異方性のある基板などの評価結果についても報告し、測定感度などを議論する。

【謝辞】本研究の一部は科研費基盤研究 B (JP23K26056)、挑戦的研究(萌芽)(24K21593)、JST ERATO 内田磁性熱動体プロジェクト(JPMJER2201)の支援により行われた。

[1] A. Hasegawa et. al, 2024 *Sci. Reports.* **14**(1) 1-15.

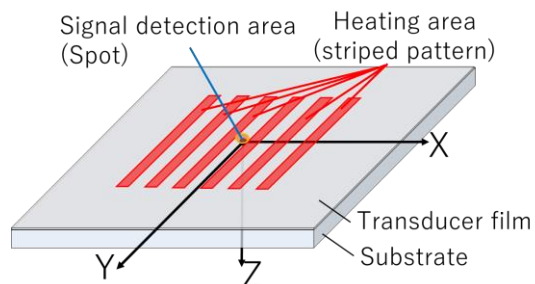


Fig. 1 Schematic of heating and detection layout.

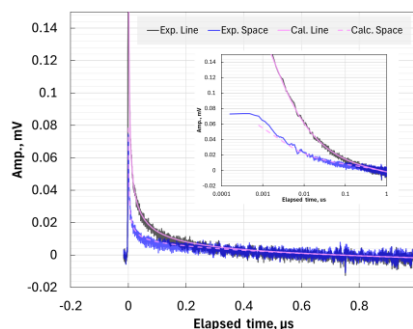


Fig. 2 Thermoreflectance signals of Mo/C-Sapphire specimen at line and space for experiment and simulation.

AFM 型温度波熱分析法によるナノスケール熱拡散率マッピング

Nanoscale thermal diffusivity mapping by AFM-type temperature wave analysis

科学大物質¹, 産総研² ◯(M2) 森岡 亮太¹, 野村 光希¹, 内藤 知岳¹, 劉 芽久哉², 森川 淳子¹

Science Tokyo¹, AIST²

◯Ryota Morioka¹, Koki Nomura¹, Tomotake Naito¹, Meguya Ryu², Junko Morikawa¹

E-mail: morikawa.j.aa@m.titech.ac.jp

【緒言】放熱材として使用されるコンポジット材料や熱的な機能を持つソフトマテリアルの開発において、局所的な熱物性計測技術は重要である。原子間力顕微鏡(AFM)を用いた局所熱物性測定は高い空間分解能を達成できる手法であるが、プローブの先端形状や試料表面形状によって値が変化するなど定量性の確保が難しい。本報告では、温度波熱分析法に基づいた熱拡散率測定とAFMを組み合わせることで、定量的な熱拡散率マッピングを高分解能で行うことを目的とした。

【実験】測定試料として、直径 10 μm ~20 μm 程度のシリカ球を樹脂に包埋し、フィルム状にしたものをITOヒーター上に作製した。AFM探針に熱電対型サーマルプローブを使用し、タッピングモードによって接触制御を行いながら針を走査することで試料の表面形状が得られ、同時にサーマルプローブで周期加熱に対する温度応答を位相遅れとして検出する。周期加熱の周波数を変えてスキャンを行い、各ピクセルにおける位相遅れ周波数依存性を直線近似することで全てのピクセルにおける熱拡散率絶対値を求める。

【結果】図1(a)に試料の光学顕微鏡写真を示す。写真中央にある直径約 15 μm のシリカ球を測定試料として選び、その周辺の 30 μm \times 30 μm の領域をスキャンした。図1(b)はスキャンによって得られた試料の表面形状である。シリカ球のある右側付近が周囲に比べて 60 nm ほど高くなっている。これは試料厚みの 22.4 μm に対して 0.3% 程度であり、熱拡散率計測では全てのピクセルで試料厚みを一定として計算を行った。周期加熱の周波数を $f = 115, 320, 557$ Hz と変えて 3 回スキャンを行うことで 3 つの位相遅れ像が得られ、各ピクセルにおいて周波数の平方根に対する位相遅れの直線勾配から熱拡散率を算出し、熱拡散率マッピングを得た(図1(c))。シリカ球の上での熱拡散率は 2×10^{-7} (m^2/s)程度であり、周囲の樹脂と比較して約 2 倍高いことが分かる。高分解能で熱拡散率の絶対値をマッピングできる測定法として様々な材料への応用が期待できる。

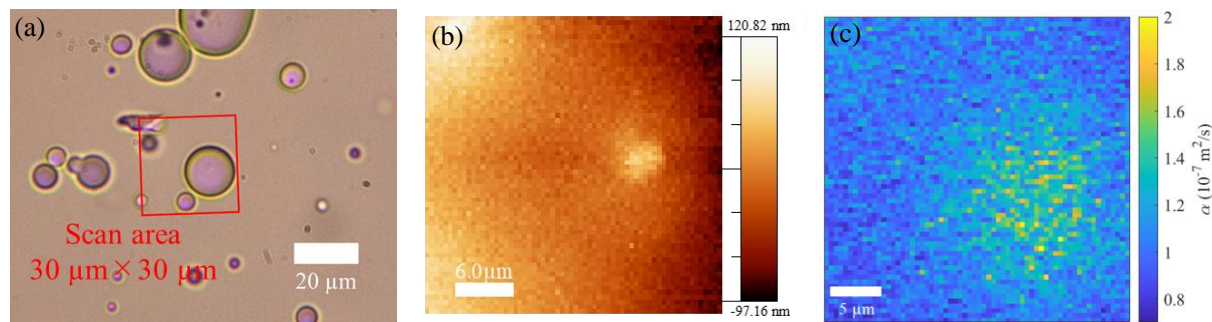


Fig.1 (a) Optical micrograph of silica spheres embedded in the resin. (b) Surface topography of the sample area measured by AFM tapping mode. The scan area is indicated by the red box in Fig.1(a). The number of pixels is 64×64 and the size of one pixel is about 470 nm. (c) Thermal diffusivity mapping calculated from the frequency dependence of the phase delay of the temperature wave in the same area in Fig.1(b).

X線非弾性散乱法を用いた Γ -K 点間の音響モードスペクトル線幅増大の考察 Consideration on acoustic phonon spectral broadening between Γ -K point by inelastic x-ray scattering

○横川 凌^{1,2,3}、前田 唯葉⁴、荒井 康智⁵、米永 一郎⁶、萬條 太駿⁷、筒井 智嗣⁷、小椋 厚志^{4,3}

(1. 広島大 RISE、2. 広島大院先進理工、3. 明治大 MREL、4. 明治大理工、
5. JAXA、6. 東北大、7. JASRI)

○R. Yokogawa^{1,2,3}, Y. Maeda⁴, Y. Arai⁵, I. Yonenaga⁶, T. Manjo⁷, S. Tsutsui⁷, and A. Ogura^{4,3}

(1. RISE, Hiroshima Univ. 2. Grad. Sch. of Adv. Sci. and Eng., Hiroshima Univ. 3. MREL
4. Meiji Univ. 5. JAXA 6. Tohoku Univ. 7. JASRI)

E-mail: yokogawa@hiroshima-u.ac.jp

【背景と目的】 SiGe混晶は純Siや純Geの結晶と比較して熱伝導率が小さいため、次世代熱電デバイスへの応用が期待される。その熱伝導率低下のメカニズムの解明に向けたSiGeにおけるフォノン散乱メカニズムと分散曲線の評価と理解が重要である。

我々はこれまでにX線非弾性散乱(IXS: Inelastic X-ray Scattering)を用いて Γ -X点間のフォノン分散曲線を測定し[1,2]、運動量増加に伴い音響モードのスペクトル線幅が増大する傾向を確認した[3]。しかし、他のブリルアンゾーンでSiGe音響モードスペクトルが Γ -X($[00q]$)点間と同様に増大するかについては未だ確認できていない。ここでは Γ -K($[q0q]$)点間のSiGe音響モードスペクトルに着目し、IXS測定を実施した結果を報告する。

【実験】 試料は飽和溶融帯移動法[4]で作製されたGe組成45%のバルクSiGeで、事前にX線回折法で(001)単結晶であることを確認した。IXS測定は、SPring-8のBL35XUに設置されたIXS装置で行った[5]。X線のエネルギー21.747 keV、分光器のエネルギー分解能1.5 meV、ビームサイズ約50 μm 、室温の条件で実施し、 Γ 点からK点までの音響モードフォノンスペクトルを測定した。

【結果・考察】 バルク SiGe (Ge: 45%) の Γ -K 点間の運動量 $q = 0.5$ における縦音響(LA: Longitudinal Acoustic)、横音響 1(TA1: Transverse Acoustic 1)モードスペクトルを Fig. 1 に示す(図中に逆格子空間座標を示す)。LA($[q0q]$)、TA1($[-q0q]$)モード両方とも Γ 点近傍よりも線幅の増大が確認された。 $[q0q]$ 方向では低エネルギー側に Ge 由来の局在振動モード(LVM: Local Vibrational Mode)が観測され、 Γ -X 点間と同様の傾向を示した[3]。また、LA モードは TA1 モードより高エネルギー側にシフトし、スペクトル線幅も増大した。これらの特徴は $q = 0.5$ 以上の範囲でも同じであることを確認した。

音響モードスペクトル強度も LA と TA1 モードで差異があることが分かり、TA1 モードは弾性散乱スペクトル(ピーク位置: 0 meV)とスペクトル強度がほぼ同等であった。一方、LA モードはそのスペクトル強度が顕著に弱くなった。SiGe は Si と Ge が各原子サイトにランダムに配置しているため、 Γ 点以外で強く観測される弾性散乱は混晶由来の散漫散乱である

と考えられる。しかし、特定の方向のみに強く弾性散乱が観測される結果は、SiGe 中の原子配列が完全にランダムではないことを示唆する。ゆえに SiGe の音響フォノン輸送も方向によって異なる可能性があり、スペクトル線幅の広がり方も方向依存性があると考えられる。

【謝辞】 本研究はJASRI(課題番号: 2019B1750、2020A1463、2023B1556、2024B1623)の承認、およびJSPS 科研費(24K17313)の補助を受けた。

[1] R. Yokogawa *et al.*, Appl. Phys. Lett. **116**, 242104 (2020). [2] R. Yokogawa *et al.*, ECS Trans. **98**, 465 (2020). [3] R. Yokogawa *et al.*, Appl. Phys. Lett. **121**, 082105 (2022). [4] K. Kinoshita *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **54**, 04DH03 (2015). [5] A. Q. R. Baron *et al.*, J. Chem. Phys. Solids **61**, 461 (2000).

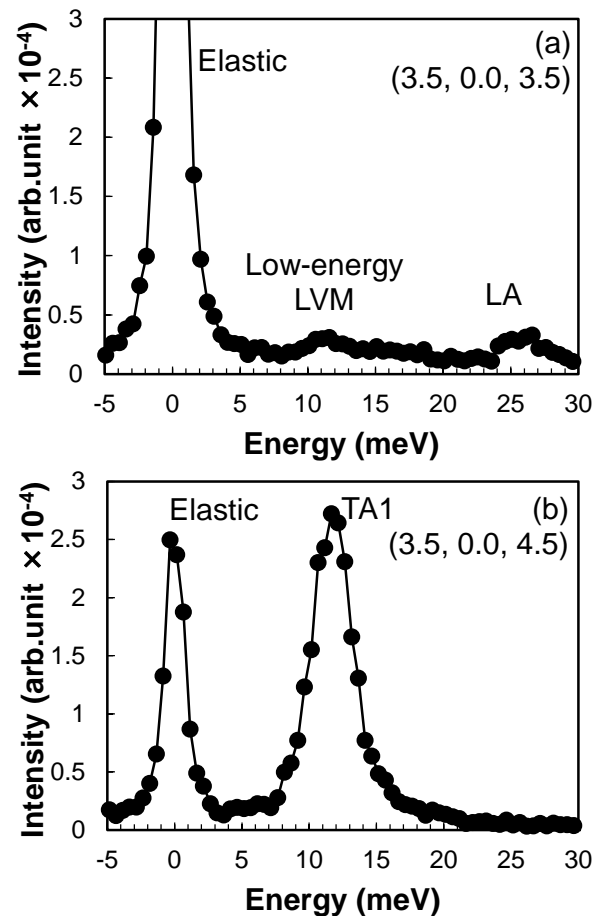


Fig. 1 IXS spectra of (a) LA and (b) TA1 modes for bulk SiGe (Ge: 45%) at momentum $q = 0.5$.

SiGe 混晶における低エネルギー局在フォノンモード強度と Ge クラスターサイズの関係:分子動力学計算による解析

Relationship between Low-Energy Localized Phonon Mode Intensity and Ge Cluster Size in SiGe Alloys: A Molecular Dynamics Study

早大理工¹, 広大RISE², 広大先進理工³ 明大MREL⁴, 明大理工⁵, ○並木大輔¹, 内藤真慈¹, 平井健太郎¹, 横川凌^{2,3,4}, 小椋厚志^{5,4}, 渡邊孝信¹

Waseda Univ.¹, RISE, Hiroshima Univ.², Grad. Sch. of Adv. Eng., Hiroshima Univ.³, MREL⁴, Meiji Univ.⁵ °D. Namiki¹, M. Naito¹, K. Hirai¹, R. Yokogawa^{2,3,4}, A. Ogura^{5,4}, T. Watanabe¹

E-mail: namiki913@fuji.waseda.jp

【はじめに】 SiGe 混晶は高温領域で優れた熱電変換性能を示し、深宇宙探査機の原子力電池で長年用いられてきた。混晶系が優れた熱電変換性能を示す理由の一つとして、フォノンの合金散乱による熱伝導率の低さがあげられる。近年、SiGe 結晶の非弾性 X 線散乱実験で 2~4 THz の低エネルギー領域に新たな局在フォノンモードが発見され[1]、これがさらに SiGe 混晶の熱伝導率低下に寄与している可能性が指摘されている。これまで行われた分子動力学(MD)計算[2,3]で、このモードが混晶中の Ge クラスターを囲む Si-Ge 結合の集団的な振動に関係することが指摘されているが、大小様々なサイズの Ge クラスターが混在する系では、実験で観測されている鋭いピークが再現できていなかった。今回、Ge クラスターのサイズを揃えた系で MD 計算を行ったところ、Ge クラスターのサイズが小さくなるほど局在フォノンモードの強度が増す明確な傾向が確認されたので、その結果を報告する。

【計算方法】 Fig.1 に計算に用いた $\text{Si}_{0.92}\text{Ge}_{0.08}$ 構造モデルを示す。ダイヤモンド型単位格子 $30 \times 4 \times 4$ 個分の単位胞を用意し、3 次元周期境界条件を設けた。Fig.1(a), (b), (c)はそれぞれ、Ge 原子が 5 つのクラスター (Ge5)、3 原子のクラスター (Ge3)、孤立 Ge 原子 (Iso Ge) を無秩序に配置したものである。各構造で Ge 原子の個数は統一している。原子間相互作用は Si-Ge-Sn 混在系に拡張された Stillinger-Weber ポテンシャルを採用した[4]。MD 計算で得られる各原子の速度の自己相関関数をフーリエ変換して振動状態密度 (VDOS) を求めた[5]。

【結果】 Fig.2 に計算で得られた Γ 点近傍の VDOS を示す。Ge クラスターサイズが小さくなるほど局在フォノンモードの強度が増していることがわかる。このことから、少なくとも文献[1]の実験で用いられた SiGe 混晶では、孤立した Ge クラスターが多く含まれていたと推察される。局在フォノンモードの強度と熱伝導率などとの物性の関係はまだ明らかにされていないが、もしマクロな物性との間に相関があることが明らかにされれば、混晶合成時のプロセスによって Ge クラスターサイズの分布を変えることで、SiGe 混晶の物性をチューニングできる可能性が考えられる。

【謝辞】 本研究は、科研費・基盤研究(B)(23K22800)により補助を受けて実施された。

【参考文献】 [1] R. Yokogawa et al., APL **116**, 242104 (2020). [2] S. Y. Y. Chung et al., AIP Advances **11**, 075017 (2021). [3] S. Y. Y. Chung et al., AIP Advances **11**, 115225 (2021). [4] M. Tomita et al., JJAP **57**, 04FB04 (2018). [5] J.A. Thomas et al., PRB **91**, 115308 (2015).

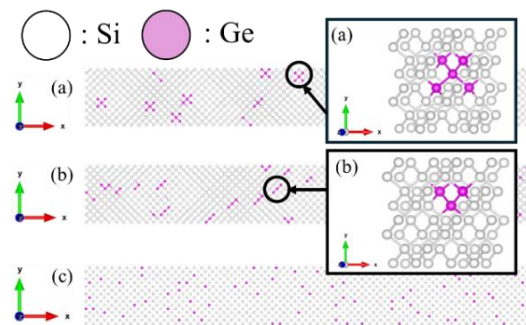


Fig.1 Calculated model of (a)Ge5, (b)Ge3, and (c)Iso Ge.

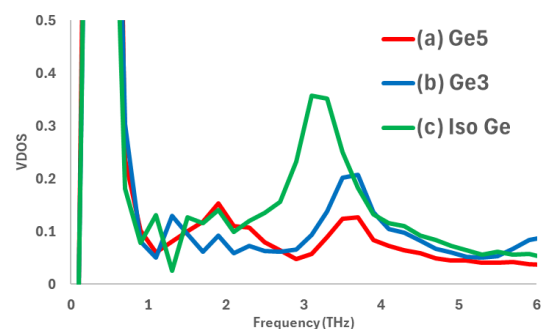


Fig.2 VDOS of (a)Ge5, (b)Ge3, and (c)Iso Ge.

トポロジカルフォニック結晶導波路を伝播するラム波の 時間分解イメージング

Time-Resolved Imaging of Lamb Waves in Topological Phononic Crystal Waveguides

¹北大院工, ²NTT 物性科学基礎研究所, ³岡山大学術研究院環境生命自然,

○(B)齊藤 敦¹, Paul Otsuka¹, 友田 基信¹, 松田 理¹, 畑中大樹², 山口浩司², 鶴田健二³

¹Graduate School of Engineering, Hokkaido University, ²NTT Basic Research Laboratories,

³Graduate School of Environmental, Life, Natural Science and Technology, Okayama University,

○Atsushi Saito¹, Paul Otsuka¹, Motonobu Tomoda¹, Osamu Matsuda¹,

Daiki Hatanaka², Hiroshi Yamaguchi², Kenji Tsuruta³

E-mail: saito.atsushi.d8@elms.hokudai.ac.jp

超高周波数の音響波は超伝導やスピン系などの様々な系と統合でき、さらに電磁波と比べて波長が短いことによるデバイスの小型化が可能である。そのため、超高周波数音響波のマイクロ・ナノスケールでの制御技術の発展が望まれる。重要な制御技術であるフォニック結晶導波路は、音響波を決まった経路に沿って伝播させることができる。近年現れたトポロジーの概念を導入したトポロジカル導波路は従来のフォニック結晶導波路で問題となっていた大きな曲げや欠陥における後方散乱を抑制することができ、高効率なエネルギー輸送が可能となる。

薄板におけるトポロジカル導波路をサブ GHz 周波数帯域のラム波が伝播することは実験的にも観測されている[1]。本研究では、同様の導波路を伝播する音響波を光学的な時間分解イメージングによって観測した。用いた試料は自己保持された GaAs 薄板(板厚 1 μm)にミクロンスケールの周期的な穴をあけて二次元トポロジカルフォニック結晶としたもので、フォニック結晶を挟む形で音響波励起用の二組の IDT 電極を持つ。一方の IDT 電極に高周波電圧を印加して音響波を生成し、その伝播の様子をフェムト秒光パルスを用いた干渉光学系を用いて面外方向表面変位速度の時間分解イメージとして観測した[2]。得られた時間分解イメージの一例を Fig. 1 に示す。図中の平行四辺形領域にフォニック結晶が形成されており、トポロジカル的性質の異なる 2 種の構造が中央付近の逆 Z 字型の境界線を挟んで対向している。フォニック結晶外部左側の IDT 電極より x 方向へ伝播する 493 MHz の平面波を入射すると、逆 Z 字型に音響波が伝播する様子が見られ、この境界がトポロジカル導波路となっていることを示している。試料外右側では導波路から結晶外に放射される波以外に -x 方向に伝播するスプリアス成分が見られるが、その起源およびそれを低減する方策についても講演で解説する。

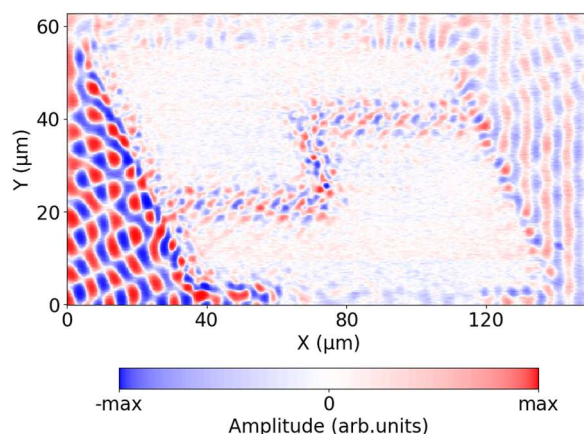


Figure 1. A snapshot of the out-of-plane surface displacement velocity field on a topological phononic crystal waveguide.

[1] D. Hatanaka *et al.*, Nano Lett. **24**, 5570-5577 (2024).

[2] O. Matsuda *et al.*, Appl. Phys. Lett. **125**, 052201 (2024).

三角格子ウェーブマシンを用いたトポロジカルスピンホール系導波路の設計

Design of topological spin-Hall waveguides in a triangular lattice wave machine

北大工 (B)倉野 弘海, 笹井 遥貴, 松田 理, 友田 基信

Hokkaido Univ., Hiromi Kurano, Haruki Sasai, Osamu Matsuda, and Motonobu Tomoda

E-mail: kurano.hiromi.r1@elms.hokudai.ac.jp

導波路は、光や音、電磁波などを特定の経路で効率よく伝えるための技術であるが、従来の導波路には曲げや欠陥によってエネルギーが散乱しやすいという課題がある。この課題に対し、近年注目されているのがトポロジカル導波路である。異なるトポロジー性を持つ領域を設計し接合すると、その境界には特有のエッジ状態が生成される。このエッジ状態は曲げや欠陥に対して頑強なエネルギー伝搬特性を示すため、導波路としての機能を期待されている。

我々は、巨視的な系で弾性波に対するトポロジカル導波路を作製し、肉眼で認識可能な周波数でのトポロジカル境界モードを実証する研究を行っている。導波路内の波動の伝搬特性を可視化することは、物理現象への理解を深める教育的役割や、マクロな系による制御性の高さから外場を加えやすく実験装置としての機能性があるといった多岐にわたる利用価値がある。

弾性波についてのトポロジカル導波路の作製は、一般にバンド構造の設計の容易さから、基板上に周期的に散乱体を配置したフォノンニック結晶構造を利用する。我々はさらなるアプローチとして、基板の厚みを薄くして曲げ波に対する系全体の剛性を大幅に低減させ、棒状の散乱体を長くした。その結果、数 Hz 程度の周波数でトポロジカル境界モードが観測可能と分かった。

当研究室では六角格子ウェーブマシンによるバレーホール系導波路の作製を行った[1]。バレーホール系は、三回回転対称性と空間反転対称性の破れによって生じるバレー自由度が波動の伝搬方向を支配する系であり、ハニカム構造を用いることで容易に作製できる。この実験を踏まえて、今回我々はスピンホール系導波路の実験を行った。スピンホール系は電子系におけるスピン軌道相互作用に基づくスピンホール効果のアナロジーであり、擬スピン自由度が波動の伝搬方向を支配する系である。胡はフォトニックな系で六回回転対称性を保持しながら、ハニカム構造の六員環同士の間隔を変化させることによるスピンホール系導波路の設計手法を示した[2]。荊宿らの論文によると、スピンホール系の導波路は各単位胞の格子点に対し、ハニカム構造を三角格子構造にすることで再現可能である[3]。これらの研究を参考に我々は三角格子二次元ウェーブマシンを作製した(Fig. 1)。六員環構造では設計後に格子間隔が変更できないのに対し、三角格子構造には導波路の形状を変更可能という利点がある。このスピンホール系導波路について、シミュレーションとウェーブマシンによる実験で比較を行うことで、トポロジカル境界モードの評価を行った。

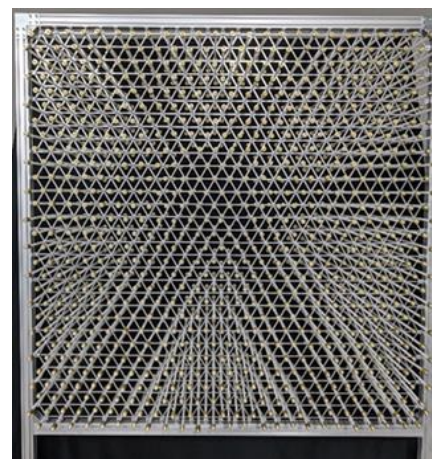


Fig. 1. Triangular lattice wave machine with 739 lattice points, each separated by a lattice constant of 50 mm, forming a structure measuring 1300 mm in both width and height.

[1] H. Takeda *et al.*, Appl. Phys. Express **17**, 017004 (2024)

[2] 胡曉, 応用物理, 第 85 卷, 第 6 号, pp. 474-479 (2016)

[3] 荊宿俊風, 胡曉, 金属, Vol. 92, No. 9, pp.887-894 (2022)

GaAs/AlGaAs 超格子および GaN/AlGaN 超格子に形成した金属半導体ストライプ構造からの加熱輻射の観測

Observation of thermal radiation from metal semiconductor stripe structures formed on GaAs/AlGaAs and GaN/AlGaN superlattices

千葉大院工¹, 東京大院², 名城大院³, ○吉川大樹¹, 大島拓巳¹, 長井奈緒美², 斎藤巧夢³, 平川一彦², 岩谷素顕³, 石谷善博¹

Chiba Univ.¹, Univ. of Tokyo.², Meijo Univ.² ○Daiki Yoshikawa¹, Takumi Osima¹, Naomi Nagai², Takumu Saito³, Kazuhiko Hirakawa², Motoaki Iwaya³, Yoshihiro Ishitani¹,
E-mail: ishitani@faculty.chiba-u.jp

これまで、我々は GaAs や GaN などの半導体の表面に形成した金属-半導体ライン&スペース(グレーティング)構造(図 1)から縦光学(LO)フォノンエネルギーに共鳴する赤外光放射を観測してきた[1-4]。現在我々は、電子のサブバンド間遷移(ISBT)による LO フォノンの生成に着目し、電子のエネルギーを LO フォノンに変換して発光に利用することを目的として構造検討を行っている。本発表では、超格子に形成したストライプ構造の加熱による輻射を観測し、超格子の LO フォノンモードがどのように発光に寄与するか調査したので、その詳細について報告する。

試料は、n-GaAs 基板上的 n-GaAs($1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 5 nm)/n-Al_{0.15}Ga_{0.85}As($1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 50 nm)/[u-Al_{0.15}Ga_{0.85}As(4.5 nm)/n-GaAs($3.2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$, 6.4 nm)/u-Al_{0.15}Ga_{0.85}As(1.0 nm)/u-GaAs(6.4 nm)] \times 50/n-Al_{0.15}Ga_{0.85}As($1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 4.5 nm)の超格子および、サファイア基板上的 u-Al_{0.15}Ga_{0.85}N(8.5 nm)/[u-GaN(6.2 nm)/u-Al_{0.15}Ga_{0.85}N(1.7 nm)] \times 43/HT-GaN(2000 nm)の超格子であった。また、AlGaAs/GaAs 超格子および AlGaN/GaN 超格子の試料表面にフォトリソグラフィ法によって Au グレーティング構造を形成した。Au の厚さは 50 nm, 周期は 10 μm で放射窓幅 (Au ライン間隔) は前者が 2.0 μm , 後者が 1.0 μm であった。

図 2 に AlGaAs/GaAs 超格子上的 Au ストライプからの加熱輻射スペクトル(630K)を示す。285 cm^{-1} , 310 cm^{-1} および 360 cm^{-1} に 3 つのピークが観測された。これらのピークは GaAs および, AlGaAs の GaAs-like, AlAs-like の 3 つの LO フォノンモードによる発光の可能性が考えられるが、周波数の決定機構ではこれら 3 つの LO フォノンモードの相互作用の影響を考慮する必要があると考えられる。次に、図 3 に GaN/AlGaN 超格子上的 Au ストライプからの加熱輻射スペクトル(630K)を示す。700 cm^{-1} のピークおよび、750 cm^{-1} のピークはそれぞれ u-GaN および u-Al_{0.15}Ga_{0.85}N による発光であると考えられる。900 cm^{-1} 以上のエネルギー域における構造はサファイア基板およびポラリトン吸収による影響が考えられる。窒化物由来の 2 つの発光ピークは AlGaN 系では単一の LO フォノンモードとなることを反映していると考えられる。

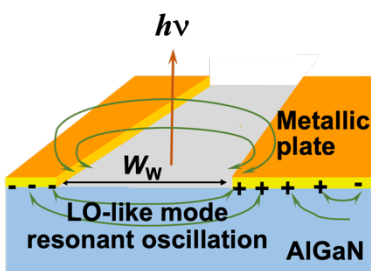


図 1 Metal-semiconductor micro stripe structure.

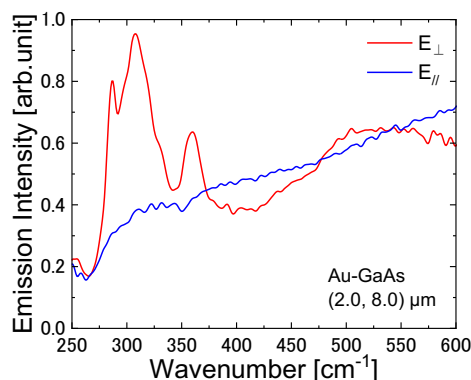


図 2 Thermal radiation spectrum from Au stripes on GaAs/AlGaAs superlattice.

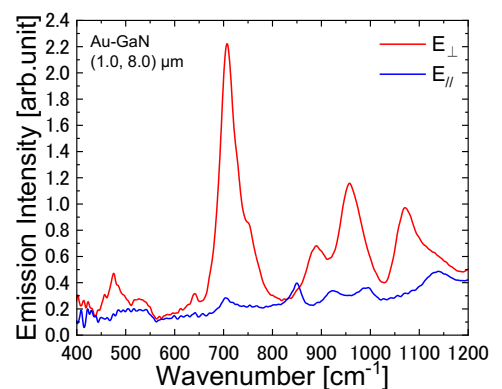


図 3 Thermal radiation spectrum from Au stripes on GaN/AlGaN superlattice.

参考文献

- [1] Y. Ishitani *et al.* Appl. Phys. Lett. **113**, 192105 (2018)
- [2] Hnin Lai Lai Aye, Y. Ishitani *et al.* Infrared Phys. Technol. **134**, 104924 (2023)
- [3] B. Lin, Y. Ishitani *et al.* J. Phys. D: Appl. Phys. **57**, 035102 (2023)
- [4] B. Lin, Y. Ishitani *et al.*, Appl. Phys. Lett. (2024)

金属-半導体マイクロ正方格子構造の加熱による 縦光学フォノン共鳴輻射

Study on Longitudinal Optical Phonon Resonance Radiation from Heating of Metal-Semiconductor Micro Square Lattice Structures

千葉大工 ○大島拓巳, 貴志優彦, 吉川大樹, 石谷善博

Chiba Univ, Takumi Oshima, Masahiko Kishi, Daiki Yoshikawa, Yoshihiro Ishitani

Email: Ishitani@faculty.chiba-u.jp

これまで我々は、半導体結晶表面に形成した金属のライン&スペース（グレーティング）構造の加熱によりテラヘルツ～中赤外発光が得られることを報告した[1]。この発光は、金属に挟まれた半導体領域におけるコヒーレントな LO フォノンに由来する界面分極電荷による電気双極子に由来すると考えられる。また、これまでの2次元構造に関する報告では、金属-半導体マイクロドット構造では四重極生成による発光強度が低減すること、円環構造で偏光依存が解消されることを示した。本研究では、円環構造よりも単純な正方格子構造における発光の観測を行った。

アンドープ GaAs 基板の上にレジストを塗布し、フォトリソグラフィ法により1次元および2次元グレーティング構造を形成した。放射窓部の幅は $2\mu\text{m}$ で、金属幅は $8\mu\text{m}$ であった。図1に正方格子構造についての SEM 像を示す。サンプルの発光測定では、試料を 630 K に加熱し、放射は偏光子を入れずに FTIR 分光高度計および TGS 検知器により計測された。図2に測定された発光スペクトルを示す。LO フォノン周波数において発光ピークが確認される。この正方格子構造は上下左右対称であることから偏光依存性がなくなったことを示唆していると考えられる。正方格子構造のスペクトル強度と、同じ半導体幅、金属幅の(半導体,金属)=(2,8)ライン&スペース構造のスペクトル強度を比較すると、正方格子のスペクトル強度は約1.6倍となっている。これはライン&スペース構造との半導体面積比から予想される値と一致している。

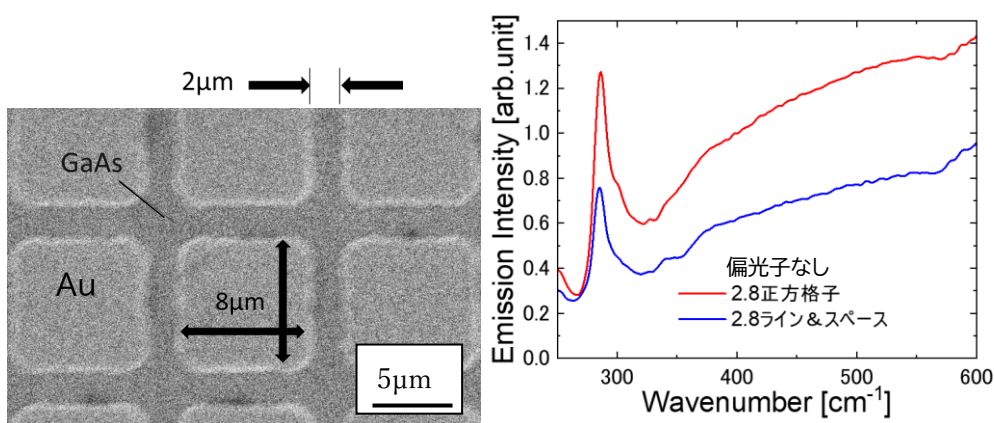


Fig1: 正方格子構造デバイスの SEM

Fig.2: 630K における発光スペクトル比較

[1] Y. Ishitani *et al.* Appl. Phys. Lett. **113**, 192105 (2018)