

X線非弾性散乱法による Bulk SiGe 単結晶フォノン分散曲線の測定

Phonon Dispersion Measurements for Bulk SiGe Crystal by Inelastic X-ray Scattering

○横川 凌^{1,2}、竹内 悠希¹、荒井 康智³、米永 一郎⁴、内山 裕士⁵、小椋 厚志^{1,6}

(1.明治大理工、2.学振特別研究員 DC、3. JAXA、4. 東北大学、

5. JASRI、6. 再生可能エネルギー研究インスティテュート)

○R. Yokogawa^{1,2}, H. Takeuchi¹, Y. Arai³, I. Yonenaga⁴, H. Uchiyama⁵, and A. Ogura^{1,6}

(1. Meiji Univ., 2. JSPS Research Fellow DC, 3. JAXA, 4. Tohoku Univ., 5. JASRI, 6. MREL)

E-mail: r_yokogawa@meiji.ac.jp

【背景と目的】 低熱伝導率を有するSiGe混晶材料は、電子デバイスの特性向上はもとより熱電素子などへの幅広い応用が期待され、その材料特性を司る指標の一つにフォノン分散が挙げられる。半導体中の熱伝導はフォノン散乱が強く関わるため、その詳細な理解が必須であるものの、SiGeはBulk SiやGe結晶と異なり、混晶材料であり、その散乱機構は複雑で、分散測定例が乏しい。我々はこれまでにmeV分解能でフォノンスペクトルが観測可能なX線非弾性散乱(IXS: Inelastic X-ray scattering)法を用いて高Ge濃度SiGe単結晶に関する光学・音響フォノン分散曲線の測定に成功した。そこで本報告では、本研究の最初の目的であるフォノン分散のGe濃度依存性解明の為、IXS法による様々なGe濃度のBulk SiGe単結晶のフォノン分散曲線およびフォノン物性を検討したのでその結果について報告する。

【実験】 試料はCz法[2]で作製されたGe濃度72%のBulk SiGe、およびTraveling Liquidus Zone (TLZ)法[3]で作製されたGe濃度32、45%のBulk SiGeで、事前に電子線後方散乱パターン法で全てのBulk SiGeが単結晶である事を確認した。IXS測定は、SPRING-8のBL35XUに設置された装置を用いた。X線のエネルギー17.7935 keV、分光器のエネルギー分解能3 meV、およびビームサイズは約50 μm の条件で実施し、 Γ 点からX点までのブリルアンゾーンを測定した。

【結果・考察】 IXS法で得たフォノンスペクトルから算出した Bulk $\text{Si}_{0.55}\text{Ge}_{0.45}$ のフォノン分散曲線を Fig. 1 に示す。Fig. 1 に示すように Γ -X 点間で光学・音響モード全てのフォノン分散曲線を得ることに成功した。また光学モードは低エネルギー側から順に Ge-Ge、Si-Ge、Si-Si モードの3種類存在し、全ての光学モードが音響モードと比較してエネルギーの運動量依存性が小さい傾向にあることが明らかになった。Fig. 2 に TA フォノン分散曲線の Ge 濃度依存性を示す。先行研究で報告されている Pure Si[4]およびGe[5]のTAフォノン分散曲線と比較すると、Ge濃度が増加するに伴い Pure Si から Ge のフォノン分散曲線に近づく。LA フォノン分散関係でも同様の振る舞いが確認された。また、Ge濃度72% Bulk SiGe と Pure Ge のフォノン分散曲線が概ね一致したため、高Ge濃度SiGeの音響フォノン速度はPure Geと同等であると予想される。一方で、低・中Ge濃度SiGeはPure Geよりも運動量に対して音響フォノンエネルギーの変化が大きい傾向で

あることから、音響フォノン速度が大きいことが推測される。以上、これらの結果を踏まえ、SiGeの劇的な熱伝導率の低下はフォノン速度(群速度)ではなく、混晶化によるフォノン寿命の低減に由来すると考えられる。

【謝辞】 本研究は JASRI (課題番号: 2016A1496、2017B1630、2019A1678、2019B1750)の承認、および JSPS 科研費(17J08240)の補助を受けたものである。また本研究にあたり、実験・解析に関し多大なるご助言をいただいたキオクシア(株)臼田 宏治氏に感謝申し上げます。

[1]横川 他, 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会 講演予稿集, 19p-E214-7 (2019).

[2] I. Yonenaga, J. Cryst. Growth 275, 91 (2005).

[3] K. Kinoshita *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 54, 04DH03 (2015).

[4] A. Valentin, *et al.*, Phys.: Condens. Matter 20, 145213 (2008).

[5] M. Mohr, *et al.*, Phys. Rev. B 73, 035217 (2006).

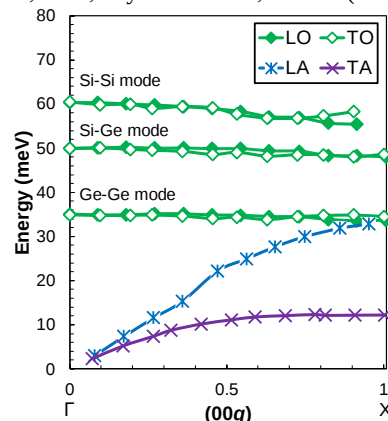


Fig. 1 Phonon dispersion curve of Bulk $\text{Si}_{0.55}\text{Ge}_{0.45}$.

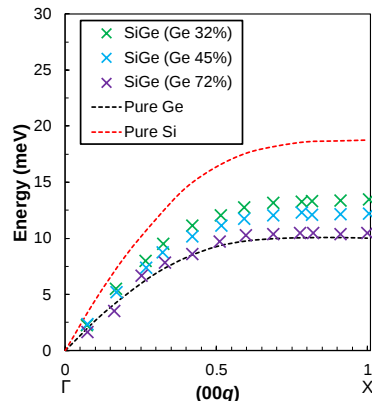


Fig. 2 Ge fraction dependence of TA mode phonon dispersion curve for Bulk SiGe.