

# Brillouin 散乱法による圧電性ワイドバンドギャップ半導体の面内方向電気特性評価

Measurement of in-plane electric properties in a wide band-gap semiconductor by Brillouin scattering method

柳谷隆彦<sup>1†</sup>, 佐野広幸<sup>2</sup>, 松川真美<sup>2</sup> (<sup>1</sup>名工大 院;<sup>2</sup>同志社大 工)

Takahiko Yanagitani<sup>1†</sup>, Hiroyuki Sano<sup>2</sup> and Mami Matsukawa<sup>2</sup> (<sup>1</sup>Nagoya Inst. Tech.;<sup>2</sup>Facult. Eng., Doshisha Univ.)

Non-contact electric property measurements are required in semiconductor samples to avoid mechanical and chemical damages at sample surface. We propose the measurement in the in-plane direction of the sample, using electromechanical coupling. Wide band-gap semiconductors such as GaN, AlN, ZnO, etc. have piezoelectric effect. Therefore, electric properties of these materials can be measured via an electromechanical coupling. To estimate the properties in the crystal with less than 1  $\Omega\cdot\text{m}$ , (which is general in intrinsic wide band-gap semiconductors), acoustic measurement above the GHz range is essential. Brillouin scattering method allows us to measure GHz bulk acoustic wave velocities in the in-plane direction without mechanical contact. We studied distribution of electric properties in a ZnO single crystal using the method.

## 1. はじめに

半導体材料の抵抗率測定にはよく四探針法が使われるが、測定試料の汚染を招くことから、非接触測定法が望まれている。GaN, ZnOなどのワイドギャップ半導体のように試料に圧電性がある場合、電気機械結合を利用して抵抗率を測定できる可能性がある<sup>1)</sup>。本研究では Brillouin 散乱法を用いて、基板面内方向抵抗率を非接触測定する方法について検討を行った。

## 2. 実験原理

圧電体に応力が加わるとひずみが生じ、内部に圧電分極が発生する。これによる内部電界は逆圧電効果により元のひずみと逆方向にひずみが発生させる。このことは弾性定数が大きくなることを意味する。導電性圧電体では、内部電界がキャリアにより遮断されてしまうため、抵抗率に依存して弾性定数の変化量が変わる(音響電気効果)。これを逆に考えると、音速から結晶の電氣的性質を測定できることになる。以前に小川は減衰測定から圧電体の抵抗率を評価できることを示唆している<sup>1)</sup>。

一方、この抵抗率による音速変化(緩和)は、特定の周波数領域で起こる。Fig. 1に ZnO において計算した縦波音速の周波数および抵抗率依存性を示す。図の白色部分と黒色部分の境目で音速が変化し、この領域でのみ抵抗率を検出することができる。たとえば実用的な 1  $\Omega\cdot\text{m}$  以下の半導体を評価するには GHz 帯以上の音速測定が必要となる。しかしながら、これまでの音響電気効果に関する研究は主に MHz 帯において行われてきた<sup>1-3)</sup>。

これまで我々は、顕微 Brillouin 散乱法を用いて ZnO 膜や単結晶の GHz 帯音速測定を行っている<sup>4)</sup>。この方法では 10  $\mu\text{m}$  以下の微小領域の音速を非接

触で測定できる。本研究では Brillouin 散乱法を用いて ZnO 単結晶板の面内方向バルク音速を測定した。

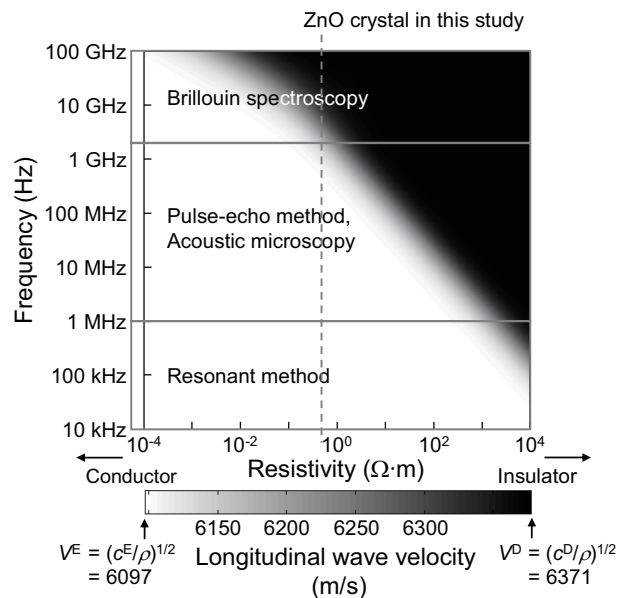


Fig. 1 Theoretically estimated longitudinal wave velocities propagating toward c-axis in a ZnO crystal as functions of resistivity and frequency. Hutson's equation was used<sup>5)</sup>. The carrier diffusion is estimated in the case that carrier mobility is constant in 100  $\text{cm}^2/\text{V sec}$ <sup>6)</sup> and temperature is 300 K.

## 3. 実験方法

音速が抵抗率により変化する様子を確認するために、R10A 散乱配置<sup>4)</sup>を用いて、室温で約 0.7  $\Omega\cdot\text{m}$  の a 面 ZnO 単結晶基板 (10×10×0.5  $\text{mm}^3$ , MTI Corporation) の面内方向に伝搬する縦波音速を測定した。結晶の抵抗率は -50~170°C の範囲で加熱冷却させることで変化させた。この測定とは別に各温度の厚さ方向抵抗率を測定した。抵抗測定では接触抵抗のないオーミック電極として液体 Ga 合金を用いた。

#### 4. 実験結果

Fig. 2 に-50~180°Cにおける約5 GHzと18.5 GHzの縦波音速を示す. 各温度における抵抗率を横軸として音速値をプロットした. またキャリアの拡散の影響を考慮して計算した音速も併記した. 温度変化とともに音速は大きく変化し, 180°Cの高温, -50°Cの低温において飽和していることが確認できた. 結晶の抵抗率変化を音速測定から検出できていることがわかる. 計算曲線と比べても傾向が良く一致している. さらに拡散の影響が大きい高周波側(18.5 GHz)では, 拡散の影響により緩和がなだらかになる様子が実験データにおいても現れているように思われる.

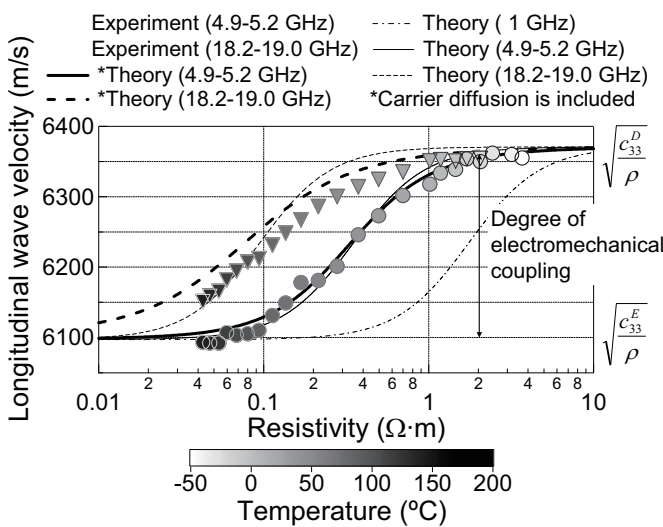


Fig. 2 Longitudinal wave velocities at 4.9-5.2 GHz and 18.2-19.0 GHz as a function of resistivity (temperature). In the theoretical curves, the carrier diffusion is estimated from extrapolated carrier mobility data measured in ZnO crystal<sup>6)</sup>. A change of the elastic due to heating is excluded using temperature coefficient of  $1.23 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ . The temperature dependence of resistivity ( $x$ -axis) of the sample was determined by standard sandwiched liquid Ga alloy electrode configuration with 2 mm-diameter. Note that this value is resistivity in the out-of-plane direction ( $1/\sigma_{33}$ ), but the resistivity coupling to present velocity measurement (RI $\Theta$ A) corresponds to that of the in-plane direction ( $1/\sigma_{11}$ ). In addition, the resistivity in  $x$ -axis was just an average value in the area of 2 mm-diameter circular electrode. In contrast, the actual diameter of the focused laser beam in Brillouin scattering method was approximately  $50 \mu\text{m}$ .

次に同 ZnO 基板内の抵抗率分布測定について検討を行った. Fig. 3 に基板内の9点において180°Cおよび10°Cで測定したc軸方向伝搬の縦波と横波音速を示す. この方向の横波は純弾性的であり, 横波音速は測定点によってほぼ一定であることが確認できる. これに対して縦波は圧電定数  $e_{33}$  と電気

機械結合があり, 10°Cで測定した縦波音速はc軸方向において大きく変化した. 一方, 180°Cで測定した縦波は高温側の飽和領域にあたるため, この分布は圧電性と弾性のばらつきを表している. 180°Cで測定した縦波はほぼ一定となり, 純弾性的な横波のばらつきも小さいことから, 圧電性および弾性のばらつきは結晶内でほとんどないと考えられる. これらのことから10°Cで検出された縦波の変化は抵抗率分布を反映したものと考えられる. 基板内の②⑤⑧点においてGa電極で測定した10°Cの抵抗率はそれぞれ0.03, 0.06, 1.2  $\Omega\cdot\text{m}$ であり, この結果とも傾向が一致している. また音速変化から, 面内において, c軸方向の抵抗率変化は大きくa軸方向の変化は小さいと考えられ, 興味深い結果である.

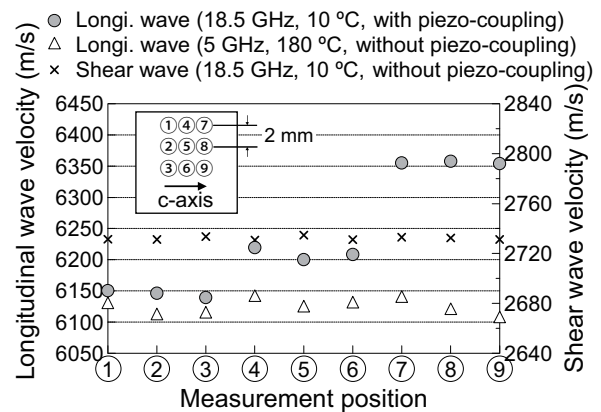


Fig. 3 Distribution of the longitudinal wave velocity in the ZnO single crystal.

#### 5. おわりに

電気機械結合を利用した抵抗率測定では, 被測定試料の抵抗率に合わせて周波数もしくは温度を調整しなければいけないという問題点がある. つまり Fig. 1 の白色と黒色部分の境目に調整しなければならない. 一定周波数, 一定温度で測定できる抵抗率範囲はせいぜい1桁程度である. Brillouin 散乱法は幅広い温度範囲で音速測定を行うことができ, また, レーザ入射角により測定周波数を調整できる特長がある. そのためワイドレンジの抵抗率測定が可能である. 面内方向の抵抗率分布を微小領域で非接触評価できる方法は他に類を見ず, ワイドギャップ半導体膜等の評価への応用が期待できる.

#### 引用文献

1. T. Ogawa: JPSJ 17 (1962) 400.
2. Yu V Gulyaev: Physics Uspekhi 48 (2005) 847.
3. J. Kushibiki, et. al.: APEX 2 (2009) 026501.
4. K. Shintani, et. al.: Proc. IEEE Ultrason. Symp., 3 (2004) 1864.
5. A. R. Hutson and Donald L. White JAP 33 (1962) 40.
6. X Yang and N. C. Giles: JAP 105 (2009) 063709.