

テラヘルツ光を用いた 非破壊・非接触半導体薄膜電気特性評価技術の開発

立命館大学 理工学部

荒木 努

1. はじめに

21世紀現在人類の生活と半導体の関係は深く、スマートフォン、コンピュータ、自動車、医療機器、家電製品、通信など様々な領域で半導体デバイスが必要不可欠な役割を果たしている。そして、この半導体デバイスの性能向上が生活の豊かさに直結する。半導体デバイスは、半導体単結晶基板上に複雑なプロセスと長い製造時間をかけて作製される。半導体デバイスは既に社会インフラの基礎になっており、高性能なデバイスを大量生産し、かつ低価格で社会に提供することが必要である。半導体デバイス製造工程において、その性能向上を実現するためには、より迅速かつ精密で、材料のロスを最小限に抑えた半導体評価手法が不可欠となっている。特に電力デバイスなどに用いられる材料などは、電気特性評価手法が重要となる。

半導体材料においてデバイス設計や製造に必要なとされる電気特性としては、シート抵抗（シート電導率）、抵抗率（電導率）、キャリア濃度、移動度である。現在、一般的な半導体の電気特性評価手法は、表1に示すように、四探針法やC-V測定、ホール効果測定などがある¹⁾。四探針法は、プローブと呼ばれる針を半導体に接触させて測定しており、C-V測定やホール効果測定は半導体に最適な電極を選択し蒸着することで測定している。しかし、いずれの電気特性評価手法においても電極形成や熱処理、測定針による加圧などによって新たな汚染の導入や欠陥を発生させ、特性を変えてしまう恐れがある。他にも被測定物を特定の形状に加工する必要があるなどいくつかの問題点がある。そこで電極形成や熱処理が不要であり、材料の特性を変えてしまう可能性がない非破壊、非接触での電気特性検査手法が必要とされている。

表1 一般的な半導体の電気特性評価手法と測定可能なパラメータ

	シート抵抗	抵抗率	シートキャリア密度	キャリア密度	移動度
四探針法	○	○[※]	×	×	×
C-V法	×	×	×	○	×
ホール効果測定	○	○[※]	○	○[※]	○

※膜厚が入力値として必要。

表2に非接触・非破壊の電気特性評価法と測定可能なパラメータの一覧を示す。渦電流法や非接触C-V測定、非接触移動度測定はシート抵抗、抵抗率、シートキャリア密度、キャリア密度、移動度の電気特性値は測定することができるが、膜厚が既知でないと測定することができない。一方でテラヘルツ時間領域分光法 (Terahertz time-domain spectroscopy: THz-TDS) は、他の手法と比較すると電気特性値と膜厚を同時に測定できる手法であり、膜厚が既知で

なくとも、抵抗率やキャリア密度を測定できる手法である。また渦電流法や非接触 C-V 法、非接触移動度測定は、少なくとも φ 20 mm 以上の試料でないと測れない。一方で THz-TDS は 10 mm 角以上であれば測定することができるため 2 インチほどの大面積化が難しい材料などにも有効である。以上のことから THz-TDS は、電気特性値と膜厚を同時に測ることができ、測定サイズも 10 mm 角以上と小さい材料にも適用できるため、品質管理から研究開発の分野まで幅広く貢献することができる手法である。

表 2 代表的な非接触・非破壊の電気特性評価法と測定可能なパラメータ

	シート抵抗	抵抗率	シートキャリア密度	キャリア密度	移動度	膜厚
渦電流法	○	○[※]	×	×	×	×
非接触 C-V 法	×	×	×	○	×	×
非接触移動度測定	○	○[※]	○	○[※]	○	×
THz-TDS { 透過型 反射型 エリプソメトリ	○	○	○	○	○	○

※膜厚が入力値として必要。

2. テラヘルツ波を用いた半導体評価

テラヘルツ帯の電磁波は、材料に応じて固有の応答がみられ、ポリマーなどの工業材料の評価、薬の結晶多形や錠剤コーティングの厚みなどの医薬品の評価、爆薬などの危険物の評価などその応用範囲は多岐に渡り期待され応用されている。

半導体に関しては、自由キャリアが励起することから電気伝導に関するモデルであるドルーデモデルを実験値とフィッティングすることによりキャリア密度、キャリア移動度および抵抗率を導出可能である。テラヘルツ時間領域分光法 (Terahertz time-domain spectroscopy :THz-TDS) は、透過型と反射型、エリプソメトリの 3 種類が存在するが、透過型と反射型の装置構造を図 1 に示す透過型の THz-TDS の特徴としては、キャリア密度が $10^{14} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ の試料においては測定可能であるが²⁾、図 1 に示すように透過測定であるため高濃度ドーパのバルク半導体や THz 波が透過しない導電性基板上に堆積したエピタキシャル膜に対しては使用ができない。反射型の THz-TDS の特徴としては、前述したテラヘルツ波が透過しない試料に対しては有効であるとされているが、測定試料とリファレンス試料の位置にズレが発生してしまうため、サンプルとリファレンスの位相差に位置誤差の情報が含まれてしまうため、正しい値を求めることが困難であることが言われている。

図 2 にテラヘルツ時間領域分光エリプソメトリ法 (Terahertz time-domain spectroscopic ellipsometry :THz-TDSE) の装置構造図を示す。本手法は、偏光解析であるため、1 つの試料に対して s 波、p 波と 2 つの実験値を得ることができ、リファレンスの測定が必要ない。そのため、反射型 THz-TDS のような問題は発生しない。また光を反射させて測定することから高濃度ドーパのバルク半導体や THz 波が透過しない導電性基板上に堆積したエピタキシャル

膜に対しても有効であり、キャリア密度が $10^{15} \sim 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ まで測定可能であるとされている²⁾。このことから THz-TDSE は、THz-TDS 手法の中でも、リファレンス測定がなく、高濃度ドープ半導体のエピタキシャル膜に対して適した測定方法である。THz-TDSE はすでに、Si、GaAs、GaN、SiC、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の材料に適用されており²⁻⁶⁾、我々のグループにおいても、GaN、InN の評価に成功し^{7,8)}、厚さ $3 \mu\text{m}$ の n 型の GaN エピタキシャル膜のキャリア密度・移動度・膜厚の非接触・非破壊評価に成功している。

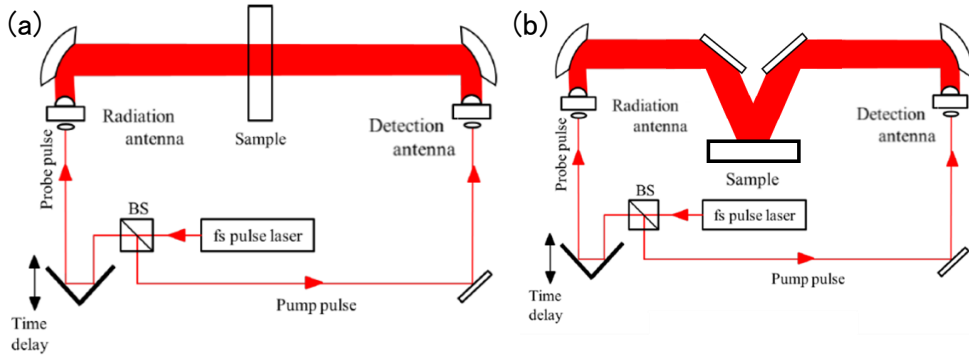


図 1 (a)透過型・(b)反射型テラヘルツ時間領域分光法

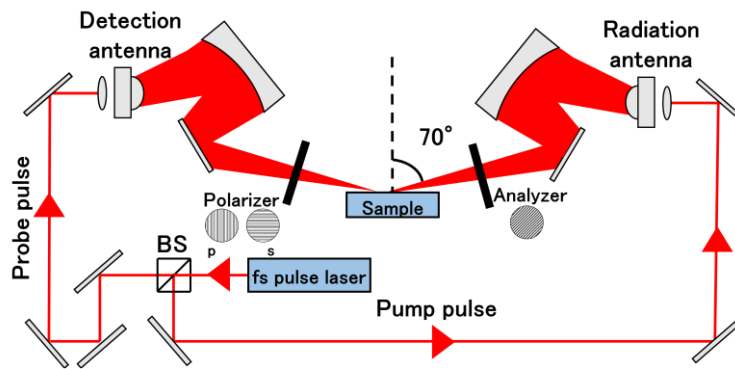


図 2 THz-TDSE の測定原理図

3. THz-TDSE による Mg イオン注入した GaN 単結晶の電気特性評価

窒化物半導体パワーデバイスの高性能化に向けて、Mg イオン注入による局所的 p 型ドーピング技術の開発が進められている⁹⁾。そこで本項目では、保護膜を剥離することなく、電極不要かつ非接触・非破壊での電気特性評価手法として、テラヘルツ時間領域分光エリプソメトリ (THz-TDSE) の利用を提案しており、多層構造の電気特性解析手法を構築している。

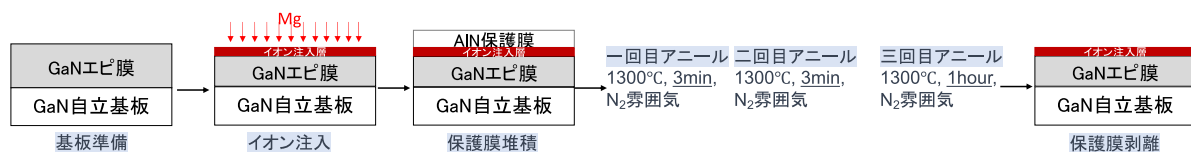


図 3 Mg イオン注入 GaN の処理手順

サンプルの処理手順を図 3 に示す。計 4 枚の Mg 濃度違いのサンプルを図 3 に示すように処理し、最終的にイオン注入層の電気特性を明らかにしたい。ここでは、各層の電気特性変化を調査するため全てのステップにおいて、テラヘルツ測定を行うこととした。

解析手法には、以下に示すドルーデモデルとフレネルの式を用いた。

a. ドルーデモデル

$$\varepsilon = \varepsilon_b - \frac{e^2 N}{\varepsilon_0 m^* (\omega^2 - i \frac{\omega}{\tau})} \quad (1)$$

b. フレネルの式

$$\begin{aligned} t_{p01} &= \frac{2N'_0 \cos\theta_0}{N'_1 \cos\theta_0 + N'_0 \cos\theta_1} & t_{s01} &= \frac{2N'_0 \cos\theta_0}{N'_0 \cos\theta_0 + N'_1 \cos\theta_1} \\ r_{p01} &= \frac{N'_1 \cos\theta_0 - N'_0 \cos\theta_1}{N'_1 \cos\theta_0 + N'_0 \cos\theta_1} & r_{s01} &= \frac{N'_0 \cos\theta_0 - N'_1 \cos\theta_1}{N'_0 \cos\theta_0 + N'_1 \cos\theta_1} \end{aligned} \quad (2)$$

a と b の数式により、THz-TDSE の解析に用いられるエリプソパラメータの強度比 $\tan\Psi$ と位相差 Δ が求められる。

$$\tan\Psi = \left| \frac{r_{p01}}{r_{s01}} \right| \quad \Delta = \arg\left(\frac{r_{p01}}{r_{s01}}\right) \quad (3)$$

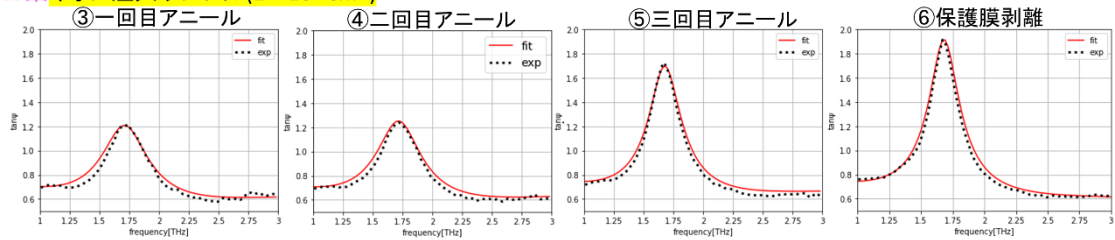
さらに、計算で出した $\tan\Psi$ と Δ の計算値とテラヘルツで測定して出した $\tan\Psi$ と Δ の測定値をフッティングして、半導体材料に重要な電気特性（キャリア濃度、移動度など）を得る。

解析に用いたサンプルは、キャリア密度 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の n 型 GaN 自立基板上に $12 \text{ }\mu\text{m}$ のアンドープ GaN をエピタキシャル成長したものをを用いた。この GaN エピ膜に表 3 に示した条件で Mg イオン注入を行い、ALD 法により厚さ 200 nm の AlN 保護膜を堆積してアニールを行った。エリプソリックパラメータ $\tan\Psi$ の測定結果を図 4 に、フッティングによって得られた電気的特性の結果を表 4 にまとめて示す。解析結果の導電率は、論文で得た導電率の数値 0.36 S/cm^{10} とオーダーが一致している。またアニール時間が長くなると、キャリア密度が増える傾向がわかる。一方、移動度が論文報告値 $22.5 \text{ cm}^2/\text{Vs}^{10}$ より低い原因としては、注入層の結晶が完全に回復されていないと考える。また、p 型 GaN の有効質量 1.1 を代入し解析を行い、妥当性のある値が得られたので、イオン注入層は p 型伝導性を示しており、活性化率は 20%~50% と推測している。

表 3 Mg イオン注入条件

Depth (nm)	Dose amount (cm^{-2})	Estimated carrier concentration (cm^{-3})	Annealing condition
100	1.3×10^{12}	1×10^{17}	1300°C , 3min, N_2 atmosphere

17乗 イオン注入サンプル($1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$)



18乗 イオン注入サンプル($1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$)

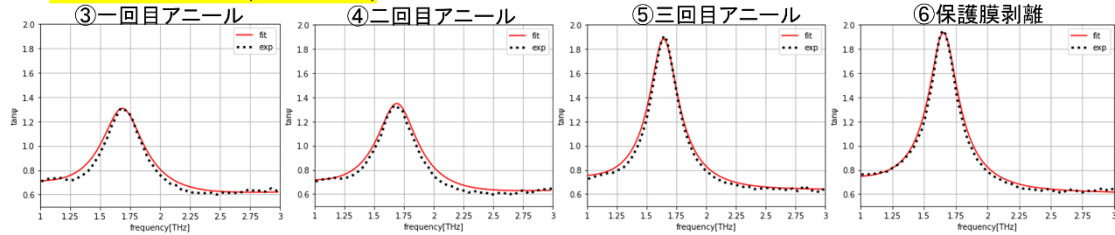


図4 Mg イオン注入サンプルの $\tan \psi$ 測定結果

表4 得られた電気的特性結果

		アニール条件	キャリア密度[cm^{-3}]	導電率[S/cm]	抵抗率[Ωcm]	移動度[cm^2/Vs]	
17乗 サンプル	③一回目	1300°C、 N ₂ 雰囲気	3min	2.55×10^{16}	0.013	75.78	3.23
	④二回目		3×2min	4.99×10^{16}	0.026	39.04	3.20
18乗 サンプル	③一回目		3min	2.01×10^{17}	0.054	18.59	1.67
	④二回目		3×2min	2.51×10^{17}	0.067	14.88	1.68

4. まとめ

本研究では、ワイドバンドギャップデバイス開発において重要な技術となっているイオン注入ドーピング技術にたいして、テラヘルツ (THz) 光を用いたエリプソメトリ評価を用いて、非破壊・非接触で GaN イオン注入層の電気特性を測定する技術を開発することを目的として取り組んだ。まず、THz-TDSE を用いて保護膜としての AlN 膜の熱に対する耐性を調べた。AlN 膜は 1300°C、1 hour、窒素雰囲気化でアニールを行っても十分な耐性を示し、保護膜として機能していることが確認できた。続いて、THz-TDSE を用いて GaN Mg イオン注入層の電気特性を解析した。17 乗および 18 乗 Mg イオン注入のサンプルにおいて、1300°C、3 min、窒素雰囲気化でアニールを行うことで、p 型電気伝導を示す結果になったと推測している。17 乗 Mg イオン注入のサンプルにおいて、注入層膜厚 100 nm の場合、アニール後の活性化率はおよそ 25%が得られた。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、公益財団法人 天野工業技術研究所 2023 年度研究助成金の多大なご支援を頂きました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 河東田隆 著, 「半導体評価技術」, 産業図書株式会社 (1989).
- 2) T. Iwamoto, V. C. Agulto, S. Liu, Y. Wang, V. K. Mag-usara, T. Fujii, K. Goto, Y. Kumagai, M. Nakajima, “Characterization of electrical properties of β -Ga₂O₃ epilayer and bulk GaAs using terahertz time-domain ellipsometry”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 62, SF1011 (2023).
- 3) T. Nagashima, M. Hangyo, “Measurement of complex optical constants of a highly doped Si wafer using terahertz ellipsometry“, *Appl. Phys. Lett.* 79, 3917 (2001).
- 4) N. Matsumoto, T. Hosokura, T. Nagashima, M. Hangyo, “Measurement of the dielectric constant of thin films by terahertz time-domain spectroscopic ellipsometry“, *Opt. Lett.* 574, 126286 (2021).
- 5) V. C. Agulto, T. Iwamoto, H. Kitahara, K. Toya, V. K. Mag-usara, M. Imanishi, Y. Mori, M. Yoshimura, M. Nakajima, “Terahertz time-domain ellipsometry with high precision for the evaluation of GaN crystals with carrier densities up to 10^{20} cm⁻³”, *Sci. Rep.* 11, 18129 (2021).
- 6) T. Nagashima, T. Iwamoto, Y. Satoh, “Characterization of electrical properties of SiC epilayer by THz ellipsometry” 2013 38th Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Mainz, Germany 2013, pp. 1–2. (2013).
- 7) K. Tachi, S. Asagami, T. Fujii, T. Araki, Y. Nanishi, T. Nagashima, T. Iwamoto, Y. Sato, N. Morita, R. Sugie, S. Kamiyama, “Measurement of the properties of GaN layers using terahertz time-domain spectroscopic ellipsometry“, *Phys. Status Solidi B* 254, 1600767 (2017).
- 8) K. Morino, S. Arakawa, T. Fujii, S. Mouri, T. Araki, Y. Nanishi, “Characterization of the electrical properties of an InN epilayer using terahertz time-domain spectroscopic ellipsometry“, *Jpn. J. Appl. Phys.* 58, SCCB22 (2019).
- 9) H. Sakurai, M. Omori, S. Yamada, Y. Furukawa, H. Suzuki, T. Narita, K. Kataoka, M. Horita, M. Bockowski, J. Suda, T. Kachi, “Highly effective activation of Mg-implanted p-type GaN by ultra-high-pressure annealing”, *Appl. Phys. Lett.* 115, 142104 (2019).
- 10) S. Lu, M. Deki, T. Kumabe, J. Wang, K. Ohnishi, H. Watanabe, S. Nitta, Y. Honda, H. Amano, “Lateral p-type GaN Schottky barrier diode with annealed Mg ohmic contact layer demonstrating ideal current–voltage characteristic“, *Appl. Phys. Lett.* 119, 242104 (2021).