

次世代半導体デバイス材料の革新的な評価手法が登場!!

～ テラヘルツ分光法による酸化ガリウムの超高周波特性の計測 ～

1. 発表者

中嶋 誠 (大阪大学レーザー科学研究所 准教授)

Agulto, Verdad C. (大阪大学大学院工学研究科 博士後期課程)

Mag-usara, Valynn Katrine (大阪大学レーザー科学研究所 特任研究員)

岩本 敏志 (日邦プレジジョン株式会社)

熊谷 義直 (東京農工大学大学院工学研究院 教授)

村上 尚 (東京農工大学大学院工学研究院 准教授)

後藤 健 (東京農工大学大学院工学研究院 助教)

2. 発表のポイント

- ◆ 次世代パワーデバイスとして活用が期待される超ワイドギャップ半導体である酸化ガリウム ($\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$) のテラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) による計測を世界で初めて実施
- ◆ 超高周波領域であるテラヘルツ周波数帯における $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の基礎的な特性である屈折率や誘電率を確定することに成功した。デバイスを開発する際に必要な電気特性であるキャリア密度や移動度、散乱時間の値を得ることに成功した。
- ◆ THz-TDS による非接触・非破壊による半導体特性評価は非常に有効であり、従来の接触型の評価法 (ホール測定や CV 測定等) と比べても十分に実用的であることが確認された。

3. 発表概要

大阪大学レーザー科学研究所の中嶋誠准教授、工学研究科大学院生の Agulto, Verdad C. (アグルト, ヴァーダッド C.) さん (博士後期課程)、大阪大学レーザー科学研究所の Mag-usara, Valynn K. (マグウサラ, ヴァリン K.) 特任研究員、日邦プレジジョン株式会社の岩本敏志博士、東京農工大学大学院工学研究院の熊谷義直教授、村上尚准教授、後藤健助教らの研究グループは、従来の電極生成や接触による材料の汚染が避けられない測定手法に代わる非接触・非破壊の革新的な評価手法であるテラヘルツ時間領域分光法を用いて、次世代のパワーデバイス・超高周波動作デバイス材料として着目されている半導体酸化ガリウム： $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ のテラヘルツ領域の屈折率やキャリア密度等の電気特性評価に成功しました。

β 型酸化ガリウム ($\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$) (注 1) は、シリコン (Si) をはじめ、炭化シリコン (SiC) や窒化ガリウム (GaN) と言った現在の商業利用されている半導体に比べて、変換効率の優れた材料特性を持ち、パワーエレクトロニクス産業に革命をもたらすことが期待されています。また、これまでワイドギャップ半導体として知られてきた SiC や GaN よりさらに広いバンドギャップを持ち、超ワイドギャップ (ultra-wide bandgap (UWBG))

(注 2) 半導体とも言われており、パワーデバイス用途に期待されるだけでなく、高周波デバイス用途でも大きな期待を集めています。次世代の高周波通信周波数帯 (Beyond 5G, 6G) として、テラヘルツ領域やミリ波領域で動作する電子デバイスの活用が期待される中、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の物性評価が待たれている状態でした。中

嶋准教授らは、 β - Ga_2O_3 の評価にテラヘルツ時間領域分光 (THz-TDS) (注 3) と呼ばれる非接触・非破壊の技術を使用し、バルク単結晶試料およびエピタキシャル膜の β - Ga_2O_3 のテラヘルツ領域での屈折率や誘電率という基本的な特性の評価を初めて実施することに成功しました(図 1 参照)。同時に、キャリア濃度、散乱時間・移動度、静的誘電率 (注 4) という電子デバイスに重要な特性値を計測することにも成功しました。このテラヘルツ時間領域分光法は、非接触・非破壊で屈折率等の情報を得るだけでなく、キャリア密度や散乱時間、移動度という電子デバイス動作のための重要なパラメータの評価が可能であることを実証し、 β - Ga_2O_3 半導体ウェーハの評価や β - Ga_2O_3 ベースのデバイス評価に非常に有効で実用的であることを示しました。

本研究成果は、日本時間 2021 年 1 月 26 日 (火曜日) 午前 1 時に *Applied Physics Letters* 誌 (アプライド・フィジクス・レターズ) のオンライン版で公開される予定です。

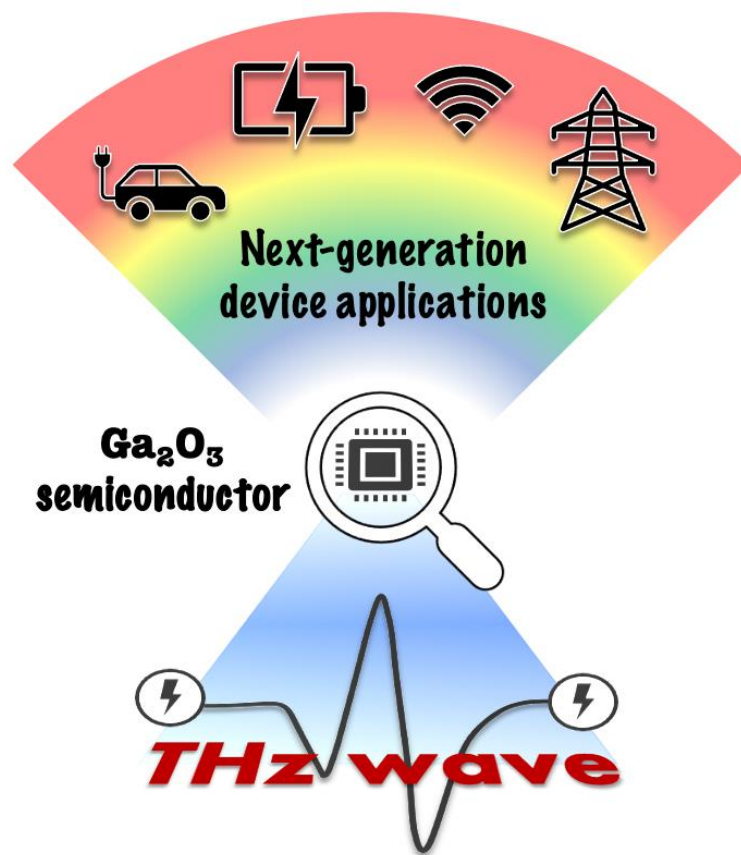


図 1： テラヘルツ時間領域分光法による酸化ガリウムの「革新的な評価手法」のコンセプト。

従来の接触・汚染の避けられない電気的な半導体の評価手法に代わる革新的な手法が必要とされています。テラヘルツ波の半導体の特性評価への導入は次世代半導体デバイス開発を促進します。

4. 発表内容

テラヘルツ波(THz 波) (注 5) (およそ 100 GHz ~ 10 THz) は、電波のマイクロ波と光の赤外領域の間に位置している電磁波です。100 GHz あたりの周波数は Beyond 5G・6G とも言われる次世代の通信帯域

であり超高周波領域に相当し、今後この周波数帯で動作する高周波半導体デバイスの開発が急務です。THz 波が、半導体を透過することによる電磁波の波形の変化を直接観測することにより、その半導体の特性（屈折率や電氣的な特性など）について様々な情報を得ることができ、この手法をテラヘルツ時間領域分光法(THz-TDS)といいます。大阪大学レーザー科学研究所の中嶋誠准教授らは、THz-TDS（日邦ブレシジョン株式会社製「TeraProspector」（注 6）を利用）により、半絶縁性 β -Ga₂O₃(001)単結晶ウエーハ上に積層したホモエピタキシャル膜のテラヘルツ領域での応答すなわち超高周波領域の電磁応答に関する研究を進めてきました。 β -Ga₂O₃ は異方性結晶であり、その特性は結晶軸によって異なることから、測定は結晶軸（a 軸および b 軸）に平行な 2 つの異なる方向（2 つの光学軸）に沿って行い、その透過測定の結果から、THz 領域における異なる軸の複素屈折率（注 7）という基本的な物質特性を確定することに成功しました。

複素屈折率は物質がどれだけ電氣的なエネルギーを蓄えることができるかを表す基本的な物質特性である誘電率と関係しています。THz-TDS を使うことにより、 β -Ga₂O₃ のパワーデバイス応用に有益な β -Ga₂O₃ の THz 領域の誘電率を確定しました。この THz 領域の誘電率は半絶縁性 β -Ga₂O₃ の単結晶を基板として積層したホモエピタキシャル膜の評価にも必要な情報になります。デバイスの製作において、半導体薄膜の電気特性はドーピング（不純物を意図的に加えること）によって調整します。したがって、ドーブした膜の電気特性の評価は不可欠です。従来の電気特性を評価する技術としては、金属電極の作製が必要となるホール測定（注 8）やしばしば有毒な水銀プローブを使用する CV（容量-電圧）測定（注 9）が挙げられます。しかしながら、これらの技術は測定試料へのダメージや比較的時間のかかる測定であることから、急速なデバイス開発に対して実用的ではなくなりつつあります。したがって、THz-TDS という新規の速くて安心な半導体を評価する革新的な手法は、電極やプローブが不要な非接触で試料の質等を落とさない非破壊な測定法であることから、従来手法に代わる魅力的な手法です。

中嶋准教授らは、THz-TDS 測定から実験的に得られた複素屈折率にドルーデ・ローレンツモデル（注 10）を適用することにより、 β -Ga₂O₃ 薄膜の電気特性を高い精度で測定することに成功しました。図 2 は、THz-TDS により測定された半絶縁性 β -Ga₂O₃ 単結晶(左図)と、シリコンドーブされた n 型 β -Ga₂O₃ エピタキシャル薄膜(右図)のテラヘルツ領域における複素屈折率スペクトルです。半絶縁性 β -Ga₂O₃ 単結晶試料では、右肩上がりの屈折率スペクトルを示しており、これは赤外領域におけるフォノン吸収の影響が現れていることを示しています。n 型 β -Ga₂O₃ エピタキシャル膜では、半絶縁性試料とことなり左肩あがりのスペクトルを示しています。この低周波数側での屈折率の増大は、 β -Ga₂O₃ 中のキャリア密度量に依存した吸収が現れています。これらのスペクトルを評価することにより、キャリア密度やキャリアの散乱時間、移動度の情報を得ることができます。このように THz-TDS 法により、超高周波領域であるテラヘルツ帯の複素屈折率スペクトルを得ることに成功しました。得られた特性の結果をテーブル 1 にまとめています。0.2 THz での屈折率は 3.165 (//a 軸)、3.231(b 軸)であることが明らかになりました。さらに、ドルーデ・ローレンツモデルによる解析より、静的誘電率は、10.02 (// a 軸)、10.43 (// b 軸)であることを確定することができた、n 型 β -Ga₂O₃ エピタキシャル膜のキャリア密度 $4.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、移動度 $100 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 、抵抗率 $0.13 \text{ } \Omega\text{cm}$ を得ることができました。得られた薄膜のキャリア密度および抵抗率は従来手法であるホール測定の結果と同等の結果となりました。これらの結果は THz-TDS が β -Ga₂O₃ の電気特性を評価する手法として従来手法に置き換え可能な信頼できる実用的な技術であることを示しています。

商業的な観点から、THz-TDS はデバイス品質を損なうことなくその電気特性を測定することができるより実用的な方法になります。また、THz-TDS は単結晶だけでなくエピタキシャル層や薄膜に適用可能であり、半導体評価に対して様々な可能性があります。このような THz-TDS は将来のパワーデバイス・高周波動作デバイスの急速な開発に向けた β - Ga_2O_3 の評価において、重要な役割を果たすことが期待されます。

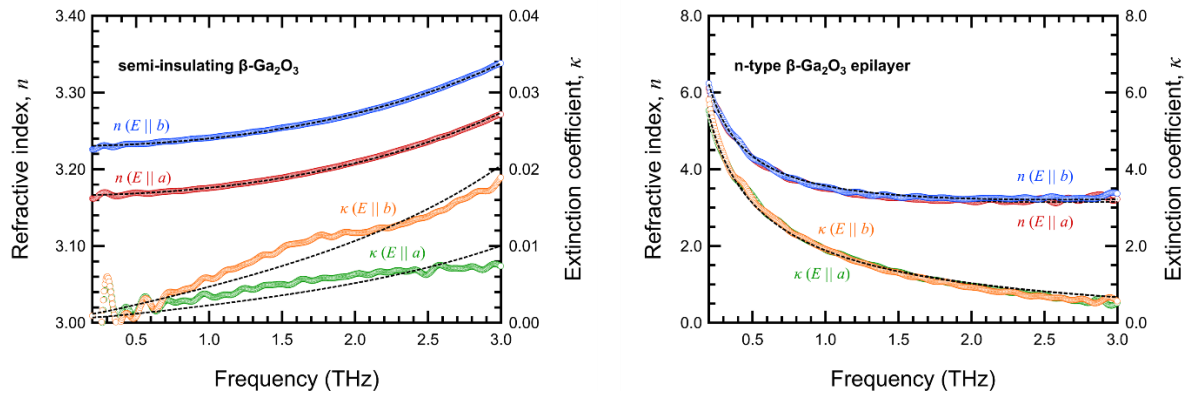


図 2： β - Ga_2O_3 の各結晶軸に沿ったテラヘルツ領域の複素屈折率の周波数依存性

a 軸に沿った複素屈折率 ($E//a$) と b 軸に沿った複素誘電率 ($E//b$) の周波数依存性を半絶縁性 β - Ga_2O_3 基板 (左図) とドープした n 型 β - Ga_2O_3 のエピタキシャル膜 (右図) で示しました。半絶縁性基板の周波数の増加に伴う屈折率と消光係数における緩やかな増加はより高い周波数に存在するフォノン吸収によるものです。エピ膜で見られる周波数の低下に伴う屈折率および消光係数の急速な立ち上がりは自由電子の効果によるものです。ドルーデ・ローレンツモデルによる解析結果を黒色の破線で示しています。 β - Ga_2O_3 は異方性結晶であることから、その複素屈折率はその異なる結晶軸の方向で違います。屈折率は b 軸に沿ったものが a 軸に沿ったものよりも高くなっています。エピ層については、低周波数領域における屈折率は自由電子の影響によって決まることから、2 つの軸の異方性による差は相対的に小さいことが確認できました。 β - Ga_2O_3 の基本的な物質特性である複素屈折率を確定することに成功し、その変化より電気的特性(キャリア密度、散乱時間、抵抗率)を抽出可能です(次のテーブル 1 参照)。

表 1 : テラヘルツ時間領域分光法(THz-TDS)による 半絶縁性 β -Ga₂O₃ および n 型 β -Ga₂O₃ エピタキシャル膜の物性値とホール測定による電気特性

静的誘電率と複素屈折率は b 軸に沿ったものの方が a 軸に沿ったものよりも高くなることが確認できました。非接触方式の THz-TDS で測定した電気特性は、従来手法である接触方式の Van der Pauw 法を用いたホール測定と一致することが確認されました。

	THz-TDS		ホール測定
	(E a)	(E b)	(Van der Pauw)
酸化ガリウム			
静的誘電率	10.02 ± 0.03	10.43 ± 0.03	
屈折率 (0.2 THz)	3.165 ± 0.005	3.231 ± 0.005	
n 型酸化ガリウム・エピ膜			
キャリア密度 (cm ⁻³)	(4.7 ± 0.3) × 10 ¹⁷	(4.5 ± 0.3) × 10 ¹⁷	4.6 × 10 ¹⁷
移動度 (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	100 ± 8	105 ± 7	117
抵抗率 (Ωcm)	0.132 ± 0.001	0.133 ± 0.001	0.12

5. 発表雑誌

雑誌名 : *Applied Physics Letters* (アプライド・フィジックス・レターズ)

論文タイトル : Anisotropic complex refractive index of β -Ga₂O₃ bulk and epilayer evaluated by terahertz time-domain spectroscopy

論文タイトル訳 : テラヘルツ時間領域分光法による β -Ga₂O₃ の非等方的複素屈折率の計測

著者 : Verdad C. Agulto, Kazuhiro Toya, Thanh Nhat Khoa Phan, Valynn Katrine Mag-usara, Jiajun Li, Melvin John F. Empizo, Toshiyuki Iwamoto, Ken Goto, Hisashi Murakami, Yoshinao Kumagai, Nobuhiko Sarukura, Masashi Yoshimura, and Makoto Nakajima

著者 (漢字表記) : Verdad C. Agulto (大阪大学)、遠矢雄浩 (同)、Thanh Nhat Khoa Phan (同)、Valynn Katrine Mag-usara (同)、李佳俊 (同)、Melvin John F. Empizo (同)、岩本敏志 (日邦プレジジョン株式会社)、後藤健 (東京農工大学)、村上尚 (同)、熊谷義直 (同)、猿倉信彦 (大阪大学)、吉村政志 (同)、中嶋誠 (同)

DOI number: 10.1063/5.0031531

6. 注意事項

日本時間 2021 年 1 月 26 日 (火) 午前 1 時 (米国東部標準時 2021 年 1 月 25 日 (月) 午前 11 時) 以前の公開は禁じられています。

7. 問い合わせ先

(研究に関すること)

大阪大学レーザー科学研究所 光量子ビーム科学研究部門

准教授 中嶋 誠 (なかじま まこと)

TEL : 06-6879-4225 携帯電話 : 090-7017-2867 (中嶋)

FAX : 06-6879-4698 E-mail : nakajima-m@ile.osaka-u.ac.jp

日邦プレシジョン株式会社

岩本 敏志 (いのもと としゆき)

TEL : 0551-22-8998 Mobile: 070-4276-3004 (岩本)

FAX : 0551-22-8935 E-mail : toshiyuki.iwamoto@pnp.co.jp

東京農工大学大学院工学研究院応用化学部門

教授 熊谷 義直 (くまがい よしなお)

TEL : 042-388-7469

FAX : 042-388-7424

(報道に関すること)

大阪大学レーザー科学研究所 庶務係

TEL : 06-6879-8711 E-mail : rezaken-syomu@office.osaka-u.ac.jp

日邦プレシジョン株式会社

岩本 敏志

TEL : 0551-22-8998 Mobile: 070-4276-3004

FAX : 0551-22-8935 E-mail : toshiyuki.iwamoto@pnp.co.jp

東京農工大学 企画課広報係

TEL : 042-367-5930 E-mail : koho2@cc.tuat.ac.jp

8. 用語解説

(注 1) 酸化ガリウム (Ga_2O_3)

Ga_2O_3 は、超ワイドギャップ半導体として知られています。それには様々な結晶構造がありますが、最も安定しているものが $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ です。 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 半導体は高出力・高電圧機器用途で大いなる可能性があることから、現在、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の研究は非常に活発に行われています。

(注 2) 超ワイドギャップ (ultra-wide bandgap (UWBG))半導体

半導体はしばしばその使用や応用の決め手となる重要な特性であるバンドギャップの大きさによって分類分けされます。良く使用されるシリコン (Si) 半導体は 1.12 eV であり、主に集積回路に使用されます。ワイドギャップ半導体は窒化ガリウム (GaN) では 3.4 eV、炭化シリコン (SiC) では 3.26 eV と言ったように大きなバンドギャップを持っています。広いバンドギャップの半導体はより高い電圧でより高い温度で使用する機器に使われます。超ワイドギャップ半導体はバンドギャップが 4.8 eV の $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ のように GaN のバンドギャップよりも大きいバンドギャップを持つものを言います。そのような半導体は高出力で高電力の分野への応用が期待されています。

(注 3) テラヘルツ時間領域分光 (THz-TDS)

THz-TDS は THz 波を用いて物性を調べる技術です。紫外線や X 線と違い、THz 光はエネルギー

ーが低いため観測対象を壊しません。THz-TDS は半導体やその他の物質の遠赤外領域における誘電率や電気特性を測定するのに幅広く使われます。

(注 4) 静的誘電率

静的誘電率は周波数が 0 Hz における誘電率です。

(注 5) テラヘルツ波 (THz 波)

THz 波は周波数が 10^{12} Hz 付近、特に波長が 3 mm から 30 μm (0.1~10 THz) の領域の電磁波です。THz 波は材料解析のような科学的な応用の他に医療分野における画像化やセキュリティ分野における検査や遠距離通信技術などの技術にも使われます。電波よりも高い周波数の THz 波は高周波数動作機器や高速、超高帯域通信を可能にします。このように THz は beyond 5G/6G の通信技術の鍵になると考えられています。

(注 6) TeraProspector

TeraProspector は日邦プレジジョン(株)にて開発された汎用のテラヘルツ時間領域分光装置です。テラヘルツ領域の複素屈折率/誘電率スペクトルを精度良く測定可能です。Ga₂O₃ の他、Si をはじめ、SiC や GaN 等の半導体に利用可能。

<https://terahertzwave.com/>

(注 7) 複素屈折率

複素屈折率は物質の光の伝搬を記述する物性量です。実部は伝搬の速さを表す屈折率で、虚部は物質内を伝搬する光の減衰の強さを表す消光係数です。光はエネルギーの一部が結晶の原子によって吸収される(フォノン吸収)時や物質内の自由電子による吸収によって減衰します。複素屈折率は複素誘電率によって表すこともできます。

(注 8) ホール測定

ホール測定は従来の半導体の電気特性を測定するための評価技術です。Van der Pauw 法を用いるホール測定では、電極を用いて、電流を流した時の電圧を測定します。

(注 9) CV (容量-電圧) 測定

CV 測定は半導体やデバイスの電気特性を評価するために使われる他の従来技術です。この測定では、電極を使って電圧を掛け、その電圧を変えながら電気容量を測定します。

(注 10) ドルーデ・ローレンツモデル

ドルーデ・ローレンツモデルはフォノンや自由電子の影響を考慮して、複素屈折率や誘電率の光の周波数依存性を定量化したものです。このモデルは一般的に半導体材料の評価に使われます。