

■受領No.1330

## テラヘルツ放射を用いたパワー半導体デバイスの革新的評価技術開発

代表研究者

川山 巖 大阪大学レーザー科学研究所 准教授



## 1. 研究目的

自動車、電鉄システム、家電製品、電力系統等の電力変換損失を大幅に削減できるパワー半導体デバイス（以下パワーデバイス）の技術革新が強く望まれており、単に地球規模の省エネルギー社会の実現に重要であると言うだけでなく、多くの半導体産業で日本の国際競争力が低下する中で、日本が世界をリードし他国との差別化を図ることが可能な分野である。現行のシリコン（Si）デバイスから窒化ガリウム（GaN）や炭化珪素（SiC）に代表されるワイドギャップ半導体を用いたパワーデバイスへの置き換えにより、システムの電力損失は1/2~1/3に低減できると予測されている。

しかしながら、現状のパワーデバイスには欠陥・転位密度の抑制、界面分極の制御によるノーマリーオフ動作の実現、酸化膜等の保護膜の耐高電圧化など様々な解決すべき課題が有り、ワイドギャップ半導体材料の持つ本来の性能が十分に発揮できていない。これらの課題を解決するためには、結晶育成やデバイス作製プロセス技術を飛躍的に向上させる必要があり、そのための指針となる評価技術の開発が必須である。特に、上記課題を克服するためには、表面・界面近傍を選択的に測定可能で、欠陥・転位などの構造的な不具合のみならず分極構造、ポテンシャル分布、およびキャリアの動的挙動を評価可能である分析法が極め

て有用である。

そこで私は、独自に開発した分光・イメージング手法であるレーザーTHz放射顕微鏡/分光法（LTEM/LTES）をワイドギャップ半導体材料やデバイスに適用し、パワーデバイスの高性能化に資する革新的評価手法としての基盤技術を確立することを目的として研究を行った。

## 2. 研究内容

LTEM/LTESの原理は以下の通りである。光励起キャリアの生成、電荷分離、電荷輸送および再結合という一連の現象を伴った光電流の高速変調を、THz放射の波形としてサブピコ秒の分解能で計測する。放射される電磁波の電界は、基本的に電流の時間微分および分極の2回微分に比例するため、放射電磁波の波形は、光励起キャリアのダイナミクスを反映したものとなっている。つまり、古典電磁気学より超短パルスレーザーを物質に照射したときに放射されるTHz波の電界は、

$$E_{THz} \propto \partial J / \partial t + \partial^2 P / \partial t^2 \quad (1)$$

と近似することが出来る（J：電流, P：分極）。これより、THz放射の波形は光励起キャリアや分極の動的変化を反映していることが分かる。 $E_{THz}$ 、 $J$ 、 $P$ はベクトル量なので、THz放射波形の強度および位相から電流および分極の大きさと方向の検出が可能である。

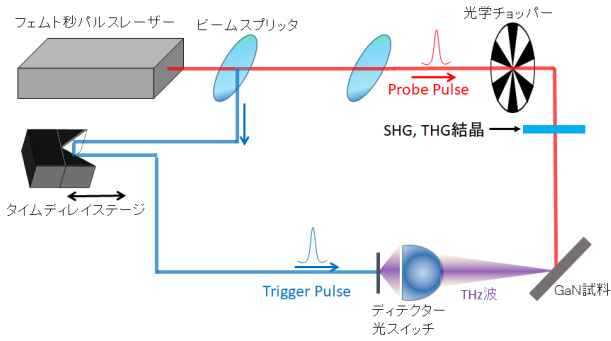


図 1 レーザーTHz 放射顕微鏡システムの模式図。

図1がLTEM/LTESシステムの模式図である。光源としてチタンサファイアレーザーを用いた。発振波長は690~1050nmと可変であり、100fs程度のパルス幅を持ち、繰り返し周期は80MHzである。この基本波を非線形光学結晶 (BBO、BIBO) により第二高調波および第三高調波を発生させ、これを励起光として用いた。励起光を対物レンズにより測定試料上に集光した。発生したTHz波は放物面鏡によりコリメートされ、検出器上に集光される。検出器にはダイポール型の光伝導アンテナを用い、トリガー光にはチタンサファイアレーザーの基本波を用いる。我々はすでにこのようなシステムを用いてc面Ga<sub>N</sub>基板 (c-GaN) およびm面Ga<sub>N</sub>基板 (m-GaN) からのテラヘルツ放射の計測に成功し、c-GaNからの放射強度は表面における不純物濃度影響を受け (Sci Rep. 5, 13860 (2015))、m-GaNからの放射の位相が自発分極の方向を反映していることを明らかにしている (APL Photonics 2, 041304 (2017))。本研究ではTHzベクトルイメージングの手法を取り入れ、任意のベクトル量をもつm面Ga<sub>N</sub>の表面の局所分極を可視化することを試みた。

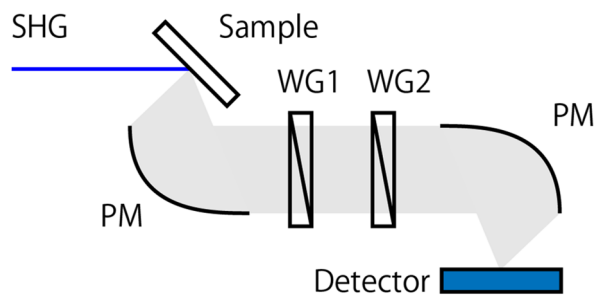


図 2 ベクトルイメージングシステムの模式図

図1のLTEMの基本構成から、Ga<sub>N</sub>試料とTHzディテクターの上に図2のような2つのワイヤグリッド偏光子 (WG) を組み込むことによりTHzベクトルイメージングを可能にした。Ga<sub>N</sub>表面から放射されたTHz波を二つのWGに通して、片方のWG (図2のWG1) のみを90° 回転させることにより、THz波の偏光のx成分とy成分の分布を取得する事が可能である。WGが45°と-45°のときの検出器でのTHz電界をそれぞれ $E_{45^\circ}$ 、 $E_{-45^\circ}$ とし、試料面内で入射面が含まれる方向をx、それに垂直な方向をyとすると、それぞれ、

$$E_x = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_{45^\circ} + E_{-45^\circ}), \quad E_y = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_{45^\circ} - E_{-45^\circ}) \quad (2)$$

の関係を用いて、m面内でのTHz電場方向を検出することができる。図3は、このような手法で測定した、m面Ga<sub>N</sub>の表面分極のベクトルイメージである。矢印の長さがTHz波ピーク強度、向きがTHz波の偏光方向である。点線で囲まれた3箇所からのTHz波の強度が大きく、同時に測定したフォトルミネッセンス (PL) 測定の結果から、不純物・欠陥濃度が大きい領域と一致していることを確認している。またTHz波の偏光方向は、[0001] (c軸) 方向にほぼ平行であり、中央の領域はその両側の領域と方向が上下逆になっていることが分かる。これらの結果から、m-GaNからのTHz放射のメカニズムとして以下のように考えられる。積層欠陥により六方晶構造が終端されたことにより、c軸に平行方向の自発分極による電界が光励起キャリアを駆動し、表面に平行な光電流が流れる。式(1)で

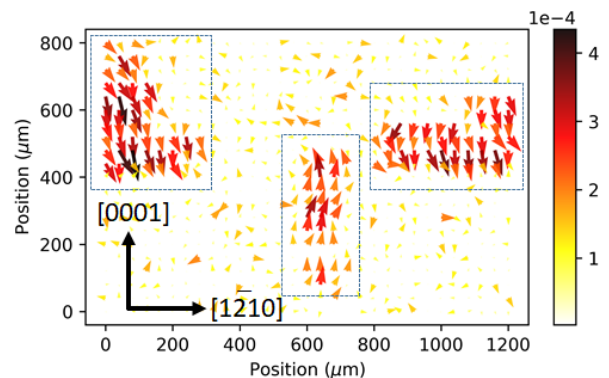


図 3 m 面 Ga<sub>N</sub> の表面分極のベクトルイメージ

示したように、この光電流により THz 波が発生する。つまり、図3は表面の不純物・欠陥分布と分極の分布の両方の影響を受けたものとなっている。また、中央の破線で囲まれた部分は、他の領域と 180° 反対方向に向いており、分極反転ドメインであることがわかる。さらに今回のデータからは、マクロには表面分極はc軸方向と平行であるが、ミクロにはかなりの分布があることも示唆している。

このように、本研究の目的であった、THz放射振幅のベクトルマッピングから、格子欠陥・転位、不純物、および分極構造との相関を明らかにすることをほぼ達成し、かつPL測定では取得することが困難な分極反転ドメインのイメージングに成功するなど、LTEMが有力なワイドギャップ半導体評価法であることを示すことができたと考える。今後はさらに、分極や欠陥の深さ方向依存性など、さらなる計測の高度化に取り組みたいと考えている。

### 3. 発表 (研究成果の発表)

- (1) 川山巖, “レーザーTHz放射顕微鏡による窒化物半導体特異構造の分極マッピング”、2019年春季 第66回 応用物理学会春季学術講演会シンポジウム“窒化物半導体特異構造の科学 - ナノ物性評価技術の進展と物性制御 - ”、(東京、2019)
- (2) Iwao Kawayama, “Terahertz emission spectroscopy and imaging for energy saving material/device development”, The 2nd International Conference on Advanced Materials and Processes for Environment, Energy and Health(iCAMP2018), (Montreal, 2018)
- (3) Jian Hao, Gong Chen, Tatsuhiko Nishimura, Hidetoshi Nakanishi, Hironaru Murakami, Masayoshi Tonouchi, Iwao Kawayama, “Characteristics of Laser-Induced Terahertz Emissions from Gallium Oxide Surfaces”, 25th International Workshop on Oxide

Electronics(iWOE25), (Switzerland, 2018)

- (4) Iwao Kawayama, “Probing interface potential of semiconductor heterostructures with laser terahertz emission spectroscopy”, The 9th International Symposium on Ultrafast Phenomena and Terahertz Waves(ISUPTW2018), (Changsha, China, 2018)
- (5) 川山 巖, “テラヘルツ放射分光・イメージングによる半導体材料・デバイス評価”, 電子情報通信学会テラヘルツ応用システム研究会、(仙台、2018)