

半導体R&D支援分析技術としてのテラヘルツ放射顕微鏡 ～半導体産業復興への貢献を目指して～



技術解説

斗内政吉*

Laser Terahertz Emission Microscope for Semiconductor Research
and Development

Key Words : Terahertz Emission, Semiconductor R&D, Microscope, Spectroscopy

はじめに

半導体産業の復興が我が国の発展に不可欠であることが、漸く、認識され始めている。半導体はあらゆる産業の基盤であり、それなくしては社会が成立しないことは明白であるが、海外製造に頼る部分が多く、自国で研究開発・製造が国家安全保障上も重要であることが、2020年コロナ禍の中で浮き彫りとなった。大阪大学は、山口次郎先生、難波進先生、濱川圭弘先生をはじめ多くの研究者により、半導体技術開発の我が国におけるメッカとして重要な役割を果たしてきた。本稿では、筆者が長年開発してきたテラヘルツ放射顕微鏡 (Laser Terahertz Emission Microscope: LTEM) ¹⁾ が次世代の半導体技術開発に有用であることを、事例を挙げて紹介し、今後の半導体産業復興に少しでも寄与できることを期待し、解説したい。

テラヘルツ放射顕微鏡

(Laser Terahertz Emission Microscope: LTEM)

テラヘルツ波は、広くは100GHzから30THzの周波数帯をカバーする電磁波として認識され、様々な応用が期待されている²⁾。特にビヨンド5Gにおける無線通信、バイオメディカル分析、非破壊検査、および新規材料物性評価などの分野が注目されている^{3,4)}。ここでは、筆者が材料・デバイス評価への

適用を目指して開発してきたLTEMの原理について、まず解説する。

LTEMは、フェムト秒レーザー半導体に照射することで、光電荷(電子-正孔対)を励起し、その瞬時の移動により発生するテラヘルツ波を分析・イメージングする技術である。これは顕微鏡と言っても、物質の形状を見るのではなく、局所的な電荷の動きを可視化する顕微鏡である。特徴として、フェムト秒レーザーと同期させることで、高速な電荷ダイナミクスを観測できる点、ならびに分解能はテラヘルツ波の波長ではなく、光のビーム径で決まるので、ナノスケールまでイメージング可能な点にある。また、対象も半導体のみならず、強誘電体・超伝導体など光で電荷が変調できるものはすべて含まれる。

テラヘルツ波 E_{THz} (電界成分)は、励起電荷の移動により発生する光電流 J により、 $E_{THz} \propto \partial J / \partial t$ の関係を持っている。 E_{THz} は光吸収される部分の電荷移動を反映するので、テラヘルツ波は点光源として空間に放射される。その電磁波を、プローブ用フェムト秒光パルスと同期された光伝導アンテナ(PCA)などで、光電流として検出する。この時、

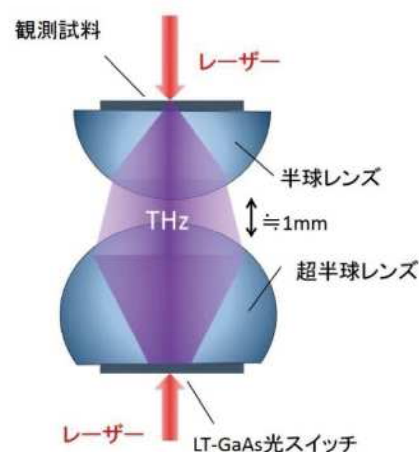


図1 LTEMヘッド。



* Masayoshi TONOUCHI

1959年7月生まれ
大阪大学大学院 基礎工学研究科 博士
後期課程修了(1988年)
現在、大阪大学 レーザー科学研究所
教授 博士(工博)
専門/テラヘルツ波工学
TEL: 06-6879-7981
FAX: 06-6879-7984
E-mail: tonouchi@ile.osaka-u.ac.jp

PCAの電荷寿命は500fs以下で、プローブ光が入射した時だけ観測するため、その時間スケールでの電荷の動きを検出できる。光照射、試料、テラヘルツ (THz) 波、検出器の関係の一例を図1に示す。ここでは、THz波を検出器 (LT-GaAs 光スイッチ) に集光するために、高抵抗のシリコンで作製したレンズを用いている。

本稿では、対象を半導体とするので、 Δt 時間に発生する光電流 ΔJ は電荷が少なく、速度ゼロ (熱平衡) からの変化なので、

$$E_{THz} \propto \frac{\partial J}{\partial t} \propto \frac{\Delta n \Delta v}{\Delta t} \propto \mu E_B I_p \quad (1)$$

と書ける⁵⁾。ここで、 Δn および Δv は、 Δt での光電荷の増加と到達速度で、その場における移動度 μ 、電界 E_B 、光子密度 I_p の積に比例する。ただし、 Δt を興味ある時間に限定し、一定であると近似した。

以下、この単純な原理に基づき、LTEMの様々な半導体 R&D における応用の可能性を示す。

ワイドバンドギャップ半導体の物性評価

代表的なワイドギャップ半導体に、SiC、GaN、Ga₂O₃ などがある。パワーデバイスや高周波デバイスへの適用が期待されている。一方、その結晶性は不十分であり、高品質化が最も大きな課題である。LTEMでは、バンド間遷移により励起された電荷の移動が、テラヘルツ波放射の主な機構を担っているため、半導体のバンドギャップを直接的に観測することができる。例えば β -Ga₂O₃ は、光励起によるフォトルミネッセンスでは、バンド間遷移で発光し

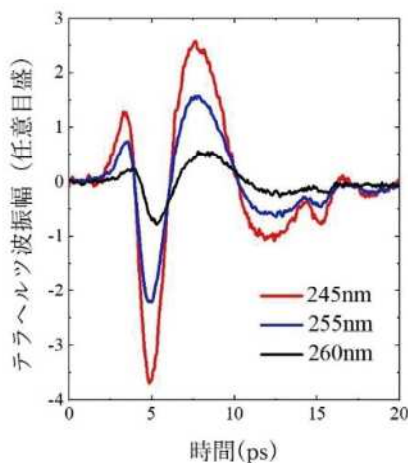


図2 鉄ドーブ β -Ga₂O₃ からテラヘルツ波放射波形。

ないため、直接観測には利用できないし、光吸収を用いても、不純物準位での吸収によりバンド端が明確に得られない。

図2に鉄ドーブ β -Ga₂O₃ からテラヘルツ放射波形を示す。半絶縁性の特徴を示し、その振幅の符号から、表面近傍で伝導帯が下に曲がったポテンシャルを持っていることが示された。また、振幅が波長に大きく依存している。図3にテラヘルツ波放射強度の励起波長依存性を示す。この結果より、バンド間遷移の波長は、おおよそ 257nm (4.82eV) であることが見積もられる⁶⁾。

半導体表面からの放射では、(1) 式において、 E_B は、表面におけるビルトイン電界で近似してもよく、

$$E_{THz} \propto \mu \sqrt{\frac{Ni V_D}{\epsilon_r}} I_p \quad (2)$$

の関係がある。ここで、 Ni は不純物濃度、 V_D は拡散電位、 ϵ_r は比誘電率である。この式より欠陥の多い領域ではテラヘルツ波が強くなる。

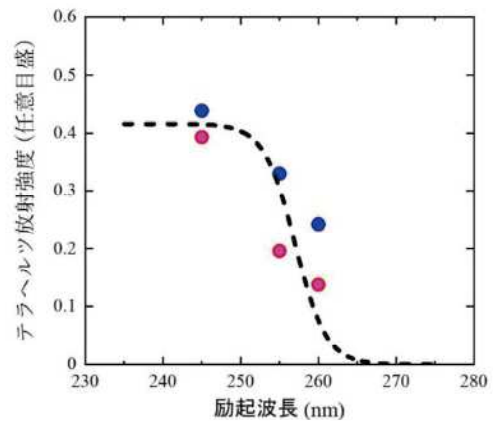


図3 UID (●) と鉄ドーブ基板 (●) からのテラヘルツ放射強度の励起波長依存性。

β -Ga₂O₃ 基板の例は、(010) 配向の意図的のドーブされていない n 型半導体 (電荷密度: $1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) を用いて、 $\lambda_p = 245 \text{ nm}$ で励起した時のテラヘルツ放射強度を、その時に波長 365 nm で放射されるフォトルミネッセンス強度 I_{PL} で規格化したもの E_{THz}/I_{PL} を図4に示す。この結果は、 E_{THz} と I_{PL} が比例関係にあることを示している。実際には、 μ 、 Ni 、 ϵ_r などは複雑に関係しており、その他の手法を用いて、それらを明らかにする必要があるが、おおむね欠陥分布を推定することができる。

以上のような例は、GaN、SiCにも適用可能で、様々なワイドバンドギャップ半導体評価に有効であることが示されている^{7,8)}。

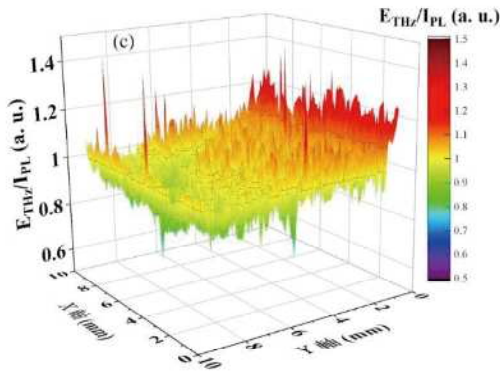


図4 テラヘルツ放射最大振幅をフォトルミネッセンス強度(365nm)で割ったもの。イメージングエリアは、10mmx10mm。

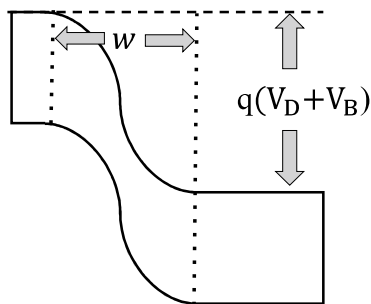


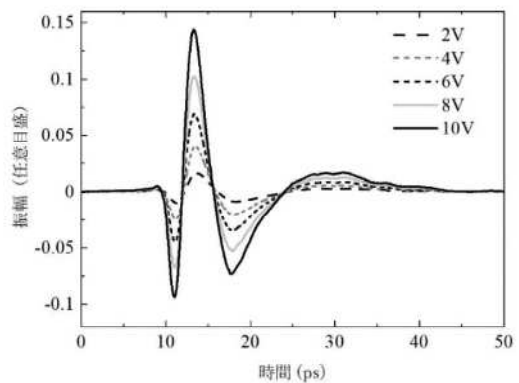
図5 pn接合型太陽電池。

太陽電池評価⁹⁻¹¹⁾

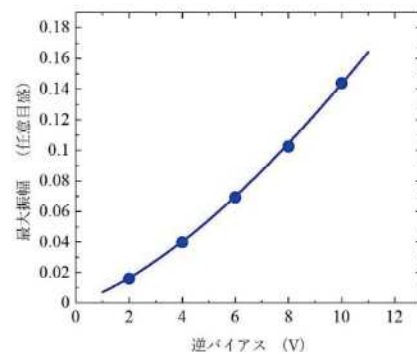
太陽電池評価には様々な手法が用いられているが、まだ、新しいキャリアダイナミクス計測や深さ方向非破壊検査などの分析も切望されている。ここでも、LTEMは特殊な情報を提供することができる。太陽電池にフェムト秒レーザーを照射すると、光キャリアが励起されるが、その電荷はpn接合にある空乏層電界により加速され、その光電流がテラヘルツ波として放射される。即ち、pn接合近傍の電荷ダイナミクスがテラヘルツ放射波形に反映される。図5に単純なpn接合で構成される太陽電池のバンド図を示す。ここで、 w は空乏層幅、 V_D は拡散電位、 V_B は印加電圧である。太陽電池は、逆バイアスで動作させるため、空乏層幅は、その電圧により大きく変化する。

図6に放射される電磁波波形とテラヘルツ振幅の逆バイアス依存性を示す。テラヘルツ振幅がバイアスに比例して増大しており、空乏層での光電流の発生によりテラヘルツが放射されていることがわかる。周波数成分は、化合物半導体に比べると低周波成分が主で、その最大成分は100GHz程度である。これは、式(2)からわかるように、テラヘルツ放射電界が移動度に比例していることに起因する。図6(b)に最大振幅の逆バイアス依存性を示す。電圧の増加に伴い、おおよそ線形的に像出している。線形からずれば、大きな逆バイアスで、空乏層幅が増大し、寄与する電荷数が増えるためである。具体的なモデルでは、不純物が接合部近傍で線形の傾斜分布を持っていると仮定し、(これは、主にアニールにより接合が形成されるため、階段型不純物分布の形成が難しいためである。)不純物密度の傾き係数を a として、空乏層電界の分布は、

$$E_B(x) = -e \frac{a}{\epsilon_S} \left[\frac{(w/2)^2 - x^2}{2} \right] \quad (3)$$



(a)



(b)

図6 シリコンpn接合からのテラヘルツ波放射波形(a)と最大振幅(b)の逆バイアス依存性。

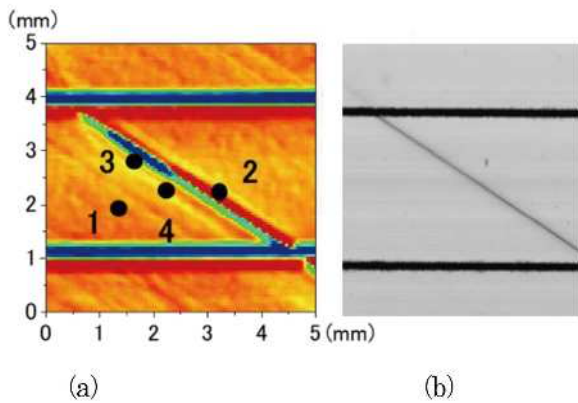


図7 (a) LTEM 像と (b) LBIC 像。

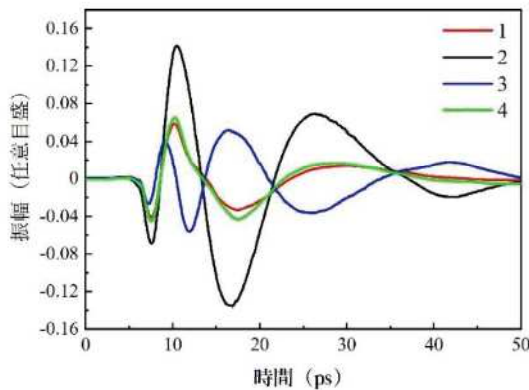


図8 図7 (a) の各点から放射されるテラヘルツ波形。

で表される。光子は空乏層で一様に吸収されるとすると、この式を $-w/2$ から $w/2$ まで積分して、

$$w = \sqrt{\frac{2\epsilon_S}{e} \frac{N_A N_D}{(N_A + N_D)} (V_D + V_B)} \quad (4)$$

を代入すると、

$$E_{THz} \propto \sqrt{\epsilon_S \mu} \left[\frac{N_A N_D}{(N_A + N_D)} (V_D + V_B) \right]^{3/2} I_p \quad (5)$$

となる。図6 (b) の実線は、 $V_D = 0.4$ eV としたときのフィッティング結果である。おおむね、 $3/2$ 乗則に従っていることがわかる。

次に、市販の多結晶Si太陽電池のLTEM像の例を、図7にLTEM像とLBIC (レーザー誘起電流測定法) 像 (LED波長808 nm, 印加電圧0.1V) の比較を示す。LTEM像の観測は、逆バイアス電圧10V、レーザーパワー50mWで観測した。LBIC像が電極間をまたぐクラックが入っていることがわかる。このと

きLTEM像は、特徴的な情報を提供する。図8に図7のLTEM像の①-④個所から放射されるテラヘルツ電磁波の時間領域波形を示す。①、③、④は強度が異なるが類似の波形を示しているが、②からは位相の反転した波形が観測される。このことは、クラックなどの粒界近傍ではポテンシャルが変化し、電流が逆向きに流れていることを示している。電流の方向は基準テラヘルツ波 (光スイッチなども用いて、電流の方向を特定できる。) により、電流のダイナミックな流れる方向が観測でき、形状やフォトルミネッセンスなどからでは得られない情報を取得することができる。また、式(5)からわかるように、局所的な移動度や不純物分布の相対的観測など、産業応用の有用な情報も提供される。

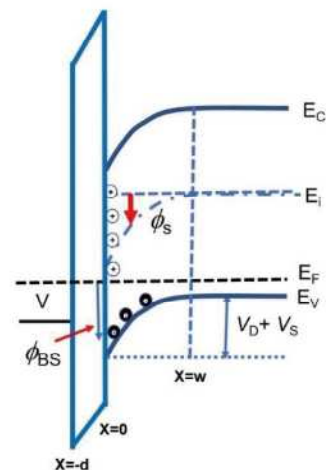


図9 MIS構造。

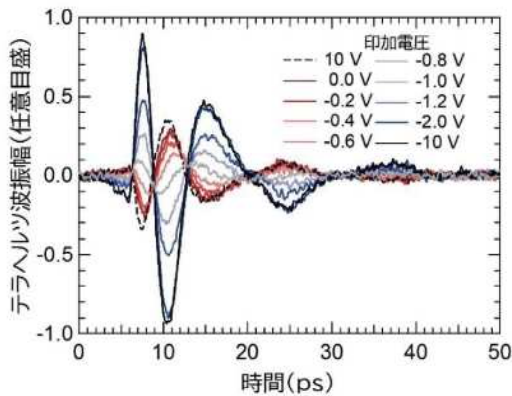
金属-絶縁体-半導体 (MIS) 構造への適用¹²⁻¹⁴⁾

半導体デバイスにおいて最も重要な構造に、金属/絶縁体/半導体 (MIS) 構造がある。デバイス特性は、絶縁体層の膜厚・誘電率・欠陥、半導体の表面準位・不純物均一性など様々な要因で変化し、その分析には、PL、ケルビンプローブ顕微鏡、AFM、C-V計測など様々な手法が用いられている。その既存の分析技術に対して、このLTEMは、電荷のダイナミックな動きを時間領域で追跡し、その動きも2次元的に可視化できる点で異なっており、MIS構造分析の新たな手法として期待される。

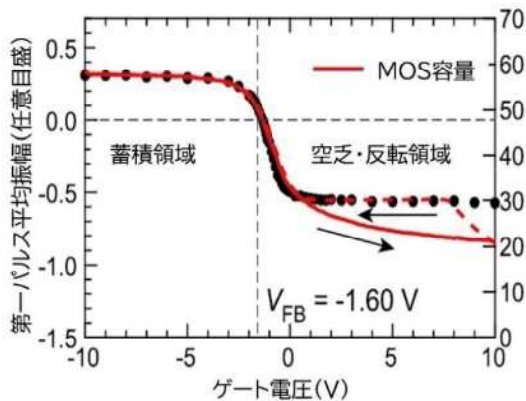
MIS構造 (図9) では、絶縁体層での光の吸収および電荷の移動は無視できるので、テラヘルツ放射

の原理は、半導体ウェファーとほぼ同様である。ただし、ゲート電圧は、絶縁層と半導体に分割され、その分配は容量による影響を受ける。詳細な計算は省略するが、ポアソンの方程式から、電界分布が求められ、テラヘルツ波の放射特性はそれにより説明される。

具体的な、放射特性の例を図10に示す。放射波形は前例とほぼ同じであるが、ゲート電圧を変えることで、振幅と位相が大きく変化する。ここで用いたのは、p型のSi-MOSで、+10Vは図9の反転状態を意味し、ゼロ電圧でもあまり変化はなく、負バイアスをかけるに伴って、振幅が変化する。第一ピークの平均値とゲート電圧の関係を図10(b)に示す。赤で示した実線は、C-V測定から求めた容量を示しており、テラヘルツ放射振幅がその容量を反映していることがわかる。ここでは、電極としてITOを用いたが、電極の代わりにコロナ放電による電子シ



(a)



(b)

図10 Si-MOS構造からのテラヘルツ放射波形(a)と第一ピーク平均振幅(b)のゲートバイアス依存性。

ャワーによる電荷制御も可能で、非破壊・非接触で様々なパラメータを計測することができる。例えば、絶縁層の誘電率分布をレーザーのビーム径でマッピングすることも可能で、半導体回路の作製現場でも利用できる。

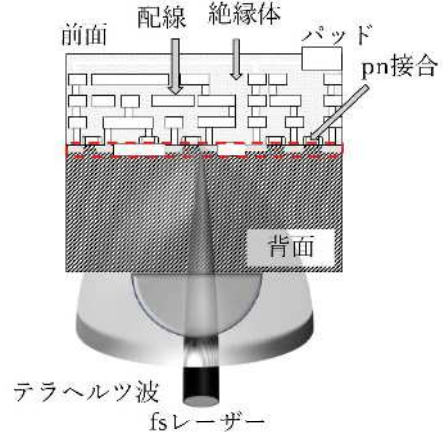


図11 作製された半導体集積回路へのSiウェファー背面からのレーザー照射と反射テラヘルツ波。

LSI 故障箇所絞込み技術^{15,16)}

これまでの応用は、物性評価に関するもので、放射機構はそれぞれ複雑である。ここでは、解釈の必要が少ない非破壊検査への応用例として、非接触LSI故障箇所絞込み技術へのLTEM応用を示す。複雑化するLSIにおいて、設計ミスや加工不良、ドーピング異常、アニール不良など様々な原因で動作不良が発生し、その完成したLSIの故障箇所の特定・解析は極めて困難である。最終的にはSEM、TEM、EPMAなどの故障解析法が用いられ、その不良箇所はナノ領域に存在し、一つのチップからその場所を見つけることは容易ではない。従って、故障箇所絞込み技術は重要な鍵を握る。現在、絞込み技術に一般的に用いられている手法には、エミッション顕微鏡、EBテスター、OBIRCH (Optical Beam Induced Resistance Change) などがある。それらはいずれも、電気信号の印加など、接触測定となる。一方、LTEMは非接触で観測できるため、魅力的である。しかし、LTEMの故障箇所絞込み技術への適用においても様々な問題が存在する。

LSIは表面が金属層で覆われているため、光入射およびテラヘルツ波観測は、全て裏面から実施する必要がある。図11に実験配置図を示す。レーザー

のビーム径をできるだけ小さくするために、ソリッドイメージングレンズをウェファーに張り付ける。フェムト秒レーザービームは、表面近傍にある pn 接合で就航される。テラヘルツ波は空乏層で発生し、背面から放射されたものを ITO などを用いてレーザー経路と分離し、検出器へ導く。フェムト秒レーザーの波長は Si のバンドギャップに等しい波長約 $1.06 \mu\text{m}$ を用いる。イメージングはこれまでと同様に時間軸を振幅の最大値で固定して行う。原理は単純で、pn 接合の空乏層で発生するテラヘルツ波が様々な要因で、正常な LSI に比べて変化することを利用する。例えば、テラヘルツ波は配線をアンテナとして増強されているが、その接合近傍の配線に断線があれば、強度が変化する。

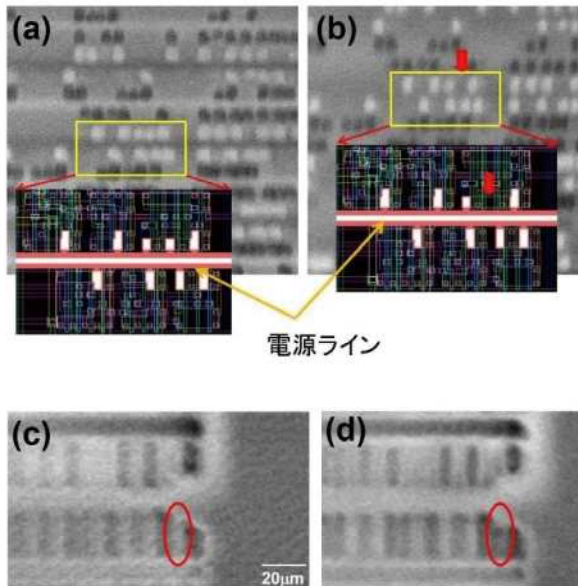


図 12 正常回路と断線回路の LTEM 像。(a) 正常、(b) 断線、(c) 正常、(d) 短絡。

故障箇所絞込み検査の一例を図 12 に示す。(a) と (b) は 180 nm プロセスで製造された ISCAS' 85 Logic LSI チップの内部に、FIB を用いて、電源配線断線不良を作り込んだもの、(c) と (d) は 350 nm プロセスの ISCAS' 85 Logic LSI チップに信号配線短絡不良を作り込んだ検出例である。断線は、CMOS トランジスタに電力を供給する電源配線部分にある。断線の有無により LTEM 像が明らかに異なっており、黄色い断線で囲んだ部分近傍 (矢印部分) に異常があることがわかる。短絡回路の比較では、短絡部の LTEM 像で正常回路では見られなかった

THz 電磁波の信号の強い領域が現れている (楕円で示す領域)。これらの観測された差異から、通常回路と比較して、不良箇所の絞り込みが可能であることを示している。LTEM には、更に、時間領域波形をモニターできる特徴がある。将来的には、断線・短絡などによる波形への影響をシュミレーションする、あるいは DTEM を適用することで、不良の種類の特定制や高速電荷ダイナミクスを評価できる可能性がある。

分解能は、LTEM 光学系の NA に大きく依存するが、テラヘルツ波が励起光子数に比例することから、ビームプロファイルにも大きく依存する。波長 $1 \mu\text{m}$ の波長を用いると、その値が回折限界に近いと想定されるが、実際には、ビームプロファイルはガウシアンビームに近いので、分解能は回折限界より良くなる。図 13 に LSI の LTEM 信号の変化を示す。この強度の 20–80% の変化から、分解能は、プローブレスで 360 nm に達していることがわかる。

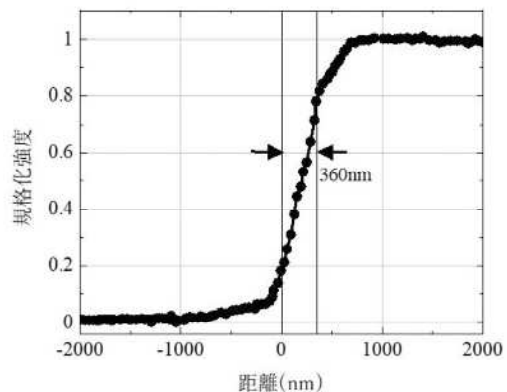


図 13 LSI の LTEM 像における断面プロファイル。

まとめ

以上、我々が独自に開発してきたテラヘルツ放射顕微鏡 (Laser Terahertz Emission Microscope: LTEM) の半導体 R&D 現場への適用の可能性について紹介した。紙面の都合上割愛したものには、結晶成長の改善に有用な GaN 半導体中の自発分極ドメインの可視化¹⁷⁾や三次元集積回路開発の鍵を握るシリコン貫通電極の局所的ダイナミック分析¹⁸⁾を可能にするなどもあり、ナノ材料基礎分析^{19,20)}への適用も考えると非常に幅広い応用が期待される。現在、我が国の半導体産業復興への重要性が説かれる中、既存分析技術分野への新しい付加価値を与え

るポテンシャルを持っており、海外に先立ち実用化できることを願っている。

謝辞

LTEM 開発は、研究室スタッフと多くの学生・卒業生ならびに文献 (6)–(20) で共著者となっていたただいたかの協力のもとに進めてきたもので、ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) 斗内 政吉、応用物理 **84**, 1101 (2015).
- 2) 斗内 政吉、応用物理 **75**, 160 (2006).
- 3) 斗内 政吉、日本レーザー医学会誌 **39**, 325 (2019).
- 4) D. S. Rana, M. Tonouchi, *Advanced Optical Materials* **8**, 1900892 (2020).
- 5) M. Tonouchi, *Journal of Applied Physics* **127**, 245703 (2020).
- 6) H Jiang, C. Gong, T. Nishimura, H. Murakami, I. Kawayama, H. Nakanishi, M. Tonouchi, *Photonics* **7**, 73 (2020).
- 7) Y. Sakai, I. Kawayama, H. Nakanishi, M. Tonouchi, *Scientific Reports* **5**, 13860 (2015).
- 8) K. Yamahara, A. Mannan, I. Kawayama, H. Nakanishi, M. Tonouchi, *Scientific Reports* **10**, 14633 (2020).
- 9) H. Nakanishi, S. Fujiwara, K. Takayama, I. Kawayama, H. Murakami and M. Tonouchi, *Applied Physics Express* **5**, 112301 (2012).
- 10) H. Nakanishi, A. Ito, K. Takayama, I. Kawayama, H. Murakami, M. Tonouchi, *AIP Advances* **5**, 117129 (2015).
- 11) K. A. Salek, H. Nakanishi, A. Ito, I. Kawayama, H. Murakami, M. Tonouchi, *Optical Engineering* **53**, 031204 (2014).
- 12) T. Mochizuki, et al, *Applied Physics Letters* **110**, 163502 (2017).
- 13) Y. Hotta, et al., *Applied Physics Letters* **113**, 012103 (2018).
- 14) T. Mochizuki, et al., *Journal of Applied Physics* **125**, 151615 (2019).
- 15) T. Kiwa, M. Tonouchi, M. Yamashita, K. Kawase, *Optics Letters* **28**, 2058 (2003).
- 16) 山下 将嗣, 大谷 知行, 松本 徹, 後藤 安則, 斗内 政吉, 中前 幸治, 二川 清、精密工学会誌 **82**, 225 (2016).
- 17) Y. Sakai, I. Kawayama, H. Nakanishi, M. Tonouchi, *APL Photonics* **2**, 041304 (2017).
- 18) K. J. P. Jacobs, H. Murakami, F. Murakami, K. Serita, E. Beyne, M. Tonouchi, *Nature Electronics* **4**, 202 (2021).
- 19) F. R. G. Bagsican, et al., *Scientific Reports* **7**, 1774 (2017).
- 20) F. R. G. Bagsican, et al., *Nano Lett.*, **20**, 3098 (2020).

