

紫外線レーザー-SQUID 顕微鏡

○上和野 大輔, 黒澤 崇央, 大坊 真洋 (岩手大学)

UV-Laser SQUID Microscope

D. Kamiwano, T. Kurosawa, M. Daibo (Iwate University)

Abstract- We developed UV-laser SQUID microscope that consists of a high temperature superconductor SQUID magnetometer and a UV-laser. The SQUID detects photo-induced magnetic signals on semiconductors with amplitudes of several hundred femto-teslas. Micrometer-level spatial resolution can be realized by using a focused laser. We carried out visualizations of the photo-induced magnetic field distribution for GaN blue light-emitting diodes. The UV-laser SQUID microscope has the potential to become a new tool for evaluation of wide-bandgap semiconductor, because it does not require ohmic contact.

キーワード: SQUID, UV-Laser, Wide Bandgap Semiconductor, Ohmic Contact

1. はじめに

SQUID (Superconducting QUantum Interference Device) は非常に感度がよい磁気センサーであり、地磁気の10億分の1以下の微弱磁場を検出することが可能である。感度は液体窒素で素子を冷却するタイプの高温超伝導 (HTS) SQUID では $100\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下、また液体ヘリウムで冷却するタイプの低温超伝導 (LTS) SQUID では $10\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下である。特に HTS-SQUID が出現してからは産業界でも応用可能な段階になり、磁場はもちろんのこと、磁気勾配、電流などの計測用途に使用され、脳磁計、心磁計などの医療分野、亀裂検出、腐食検出などの非破壊検査分野、重力波検出などの基礎物理・精密計測分野と様々な場面で応用されている。

これまでに、SQUID 磁束計の弱点であった「低空間分解能」を改善するため、レーザーと SQUID を組み合わせた「レーザー-SQUID 顕微鏡」を開発した。これは試料にレーザー光を照射し、発生する磁場を SQUID で計測するというものである。レーザー光は対物レンズで集光するため、高空間分解能化が可能

である。また、励起物理量は光子であるためノイズフリーである。さらに、検査のためにプローブ針を立てる必要がなく、試料に対しての前処理も不要となるため、試料に汚染やダメージを与えることは一切ない。

これまでの主な研究内容としては、p-n 接合単結晶シリコンの少数キャリア拡散長計測¹⁾³⁾、多結晶シリコンの太陽電池セルの結晶粒界の画像化²⁾などが挙げられる。

現在、GaN(窒化ガリウム)、ZnO(酸化亜鉛)などのワイドバンドギャップ半導体はSi(シリコン)に変わるデバイスとして注目され、盛んに研究が行われている。そのワイドバンドギャップ半導体では、特にp型の場合、オーミック接触が困難であり、電極接触などによる接触式検査が難しい。

本報告では、紫外線レーザーと SQUID を組み合わせた「UV レーザー-SQUID 顕微鏡」を開発し、非破壊・非接触で GaN 青色 LED の光誘発磁場を計測した結果について述べる。

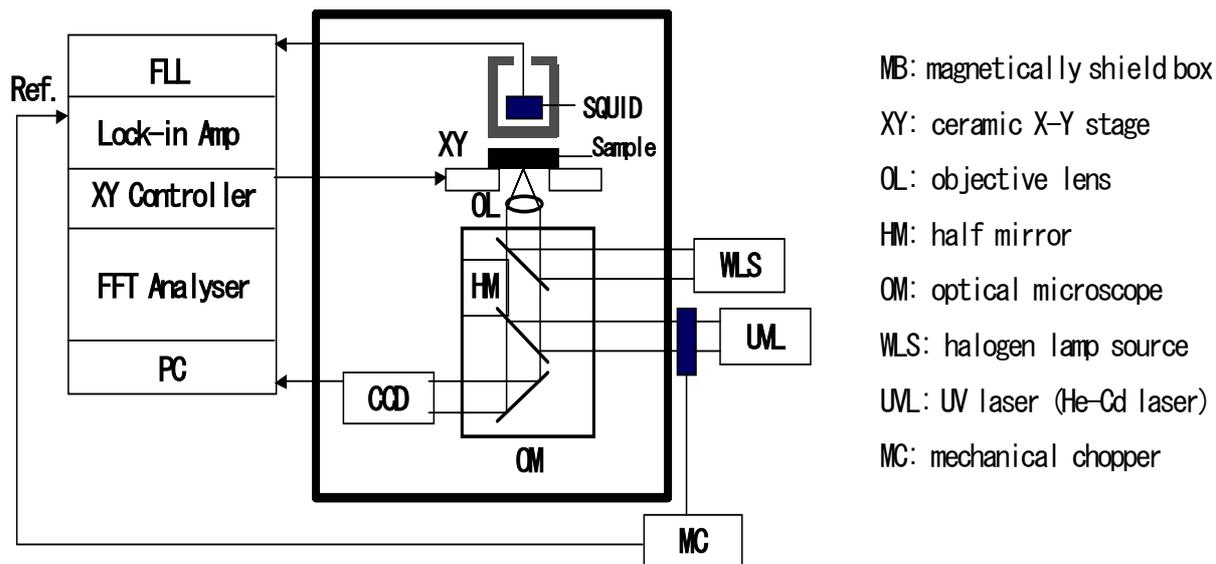


Fig. 1 Diagram of UV-laser SQUID microscope.

2. 測定方法

実験方法を Fig. 1 を用いて説明する。試料はサファイア基板上に GaN 青色 LED チップ (チップサイズ: $350 \times 340 \mu\text{m}^2$) が配列された 2 インチウエハーである。

最近の SQUID 顕微鏡では、高空間分解能化のためにサファイア窓と伝導冷却を利用した薄底のデュアーを使用している。このようなデュアーでは断熱が十分にできないため、動作時間を長くできない。それに対し、レーザー-SQUID 顕微鏡では、対物レンズで集光したレーザー光を試料に照射することで高空間分解能となるので、薄底デュアーは必要ない。今回使用した SQUID (Tristan Technology 社製) は高温超伝導 (YBCO) SQUID であり、デュアーの真空状態が良好な場合、最長で 5 日間連続動作可能である。SQUID とレーザースポット間の距離は約 12mm、素子サイズは約 8mm である。

紫外線レーザーには He-Cd レーザー ($\lambda=325\text{nm}$) を用い、光チョッパーで 3kHz に変調後、倍率が 10 倍、N. A. = 0.2 の石英対物レンズで集光した。光照射時に発生する磁場 (B_z 成分) を SQUID で電圧に変換し、FLL で線形化した。線形化された出力を低ノイ

ズ、狭帯域検出するため Lock-in アンプに取り込み、変調周波数で位相検波した。

また、測定の際にはノイズが問題となる。そのため、測定は磁気シールド内で行った。この磁気シールドは厚さ $t=2\text{mm}$ のアルミニウム 2 層と $t=1\text{mm}$ のパーマロイ 2 層から構成されている。また、ノイズ源となる計測機器はシールド外部に設置する。さらに、レーザー照射ポイントの移動は piezo 素子駆動の非磁性セラミクスステージ (京セラ製) を移動させることにより、磁気ノイズの発生を抑えている。

3. 結果

3.1 チップ内の磁場分布

Fig. 2 は LED チップの光学像である。上側の電極が陰極、下側の電極が陽極であり、左側に見える円形部はレーザースポット ($\approx 15 \mu\text{m}$) である。このチップを 2 次元スキャンし、得られた磁場の強度値から画像化 (以下、磁場分布) したものと、位相の値から画像化 (以下、位相分布) したものを Fig. 3、Fig. 4 に示す。

Fig. 3 は良品チップ内の分布である。磁場分布はチップ中心付近を境にして、両電極に近づくにつれ

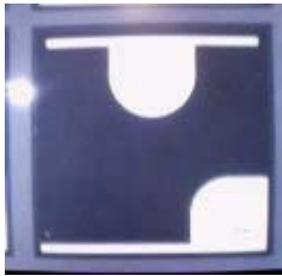


Fig.2 Microscopic photograph of a GaN LED chip.

て磁場が増加する分布（最大値 ≈ 180 fT）であった。また、位相分布はチップ中心を境に位相の符号が逆転した分布であった。

それに対し、Fig. 4 は不良品チップ内の分布である。(a)の磁場分布では、電極金属のエッチング残渣箇所（図中 X 印）を境にして、電極に近づくにつれて磁場が増加する分布（最大値 ≈ 280 fT）であった。位相分布は残渣の箇所を境にして位相の符号が反転する分布であった。(b)の磁場分布は、残渣があった陰極（図中 X 印）とは反対の陽極に近づくにつれて磁場が増加する分布（最大値 ≈ 540 fT）であった。位相分布は位相が同一符号に片寄っている分布であった。

以上のように、良品チップ内の磁場分布は1通りしかなかったのに対し、不良品チップでは残渣の箇所によりチップ内の磁場分布が変化している。

3.2 ウェハ内の磁場分布

次に、レーザースポットをチップの中心箇所に合わせて、2 インチウェハ内の 45x45 個のチップの磁場を測定した(Fig. 5)。

Fig. 5 では、1 画素がウェハ内に配列されているワンチップに相当し、45x45 個のチップが並んでいる。ウェハ中心部は Fig. 5 で左上であり、そこから外側に向かうほど磁場の大きなチップ、すなわち不良品チップが多く分布していた。

発光現象が生じる良品チップでは、電極に対象的に磁場が分布するため磁場が小さい。それに対し、

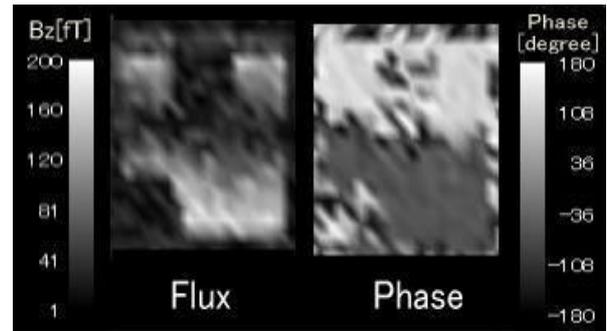


Fig.3 Magnetic field distributions of normal chip. (20 x 20 pixel, 17.5 μ m step)

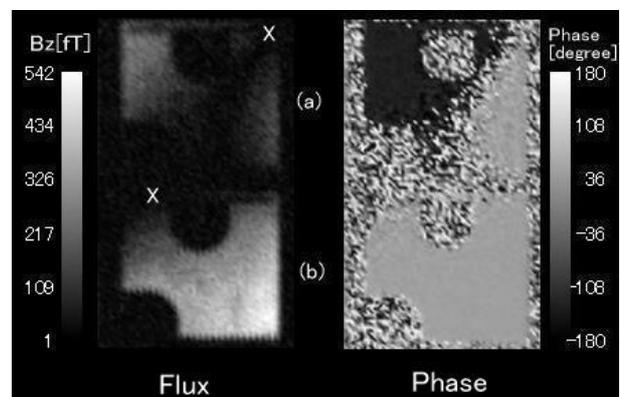


Fig.4 Magnetic field distributions of failed chips. (64 x 64 pixel, 6 μ m step)

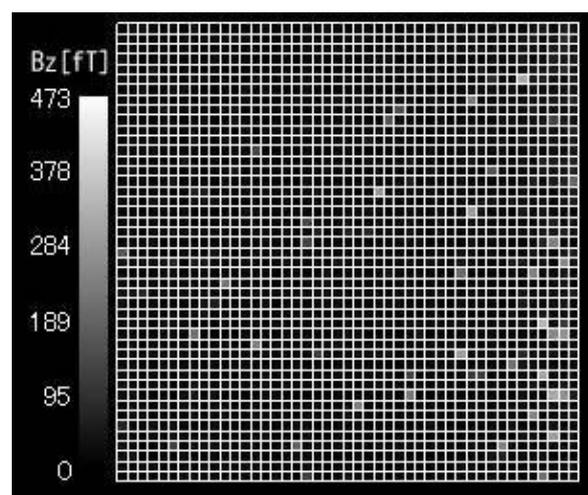


Fig.5 Magnetic field distributions in wafer scale.

発光現象が生じない不良品チップでは残渣箇所、すなわちショートしている箇所で磁場が小さい。磁場が小さく現れるのは、ショート箇所か電極間の中央部である。ショートが存在すると、チップ内の電流分布が変化し、チップ中央部の磁場が相対的に大きくなる。そのためチップ中央部の1点で評価しても、良品と不良品の区別が可能となる。良品チップと不良品チップでの磁場の絶対値は約 1.5~3.2 倍の違いがある。但し、チップ中央部にショートがあった場合には検出できない。

4. 考察

不良品チップを光学顕微鏡で観察してみると、p-n 接合の境界にまたがったエッチング残りによる電極残渣が多数確認された。先にも述べた通り、残渣が存在すると、そこでショート（短絡）する。これはプロービングによる I-V 特性の評価で確認している。

まず、不良品チップについて考える。ショートしていない箇所にレーザー光を照射した場合、発生したキャリアはショートしている箇所に向かって、拡散→ドリフト→誘電緩和→再注入→再結合の順序で光電流のループを作り、垂直成分の磁場が多く発生する。我々の SQUID 配置は垂直成分に対して感度が良いため、この場合の磁場は大きくなるのではないかと考えられる。また、ショートしている箇所にレーザーを照射した場合、生成されたキャリアは拡散などで広がったりはせず、すぐに再結合する。発生する磁場は水平成分が多いため、この場合の磁場は小さくなるのではないかと考えられる。

それに対し、良品チップでは残渣などの不良箇所はなく、光照射により発生したキャリアはチップ内に等方的に流れる。この時、チップの中央部に光照射すると光電流は発生するが磁場が互いにキャンセルされるため、中央部の磁場が小さくなるのではないかと考えられる。

5. まとめ

UV レーザー-SQUID 顕微鏡を開発した。その結果、発光現象の生じる良品チップでは磁場が小さく、発光現象の生じない不良品チップではチップ中央部の磁場が大きい事が明らかになった。また、良品・不良品チップにおける磁場分布を画像化し、両チップに磁場分布の傾向を確認した。これにより、電極エッチング残渣により光電流の経路が変化し、磁場分布が変化することが分かった。

本手法は非接触計測法であるので、試料に汚染やダメージを与えることは一切ない。また、ワイドバンドギャップ半導体の検査におけるオーミック接触の問題を解決することが期待できる。

今後の課題として、磁場と発光パワーの同時測定による相関関係の調査、ベクトル計測の導入を検討中である。

<参考文献>

- 1) 大坊真洋、菊池利雄:レーザー-SQUID 顕微鏡の開発と半導体検査への応用、計測自動制御学会産業論文集、Vol. 2, No. 3, 19/26, 2003
- 2) Masahiro Daibo, Arimitsu Shikoda and Masahito Yoshizawa, "Non-contact Evaluation of Semiconductors using a Laser SQUID Microscope", Physica C, Vol.372-376, pp.263-266, 2002.
- 3) Masahiro Daibo, Toshio Kikuchi, and Masahito Yoshizawa, "Minority Carrier Diffusion Length Measurements of Semiconductors using a Multi-Wavelength Laser SQUID Microscope", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 13, No. 2, pp. 223-226, 2003.