

# レーザー SQUID 顕微鏡

大 坊 真 洋

## Laser SQUID Microscope

Masahiro DAIBO

The spatial resolution of a SQUID magnetometer was determined by the larger of either the diameter of the SQUID or the SQUID-to-sample distance. High spatial resolution is incompatible with high sensitivity if a passive measurement technique is used. Thus, we combined a focused laser beam with amplitude modulation and the SQUID to solve this incompatibility. Using the laser SQUID microscope, we have been able to bring spatial resolution to a value comparable to the laser spot size, that is, close to the theoretical limit. The apparatus achieves micrometer-scale and sub-pT photo-magnetic images, and also provides photocurrents vector mapping without any electrical contacts.

**Key words:** SQUID, laser, microscope, semiconductor, photocurrent, imaging

SQUID (Superconducting QUantum Interference Device) は、超伝導量子干渉素子であり、固体デバイスとしては最も感度が高い磁気センサーである。磁気計測の用途では、SQUID 近傍に負帰還用のコイルを設け、SQUID 両端の電圧が変化しないように磁束を一定に保つ flux locked loop 回路を接続して使うのが一般的である。負帰還コイルの電流を計測することによって、広ダイナミックレンジと線形動作が実現されている。高温超伝導体による SQUID では、およそ数十 fT 以上の磁場を計測することができる。

一般に SQUID の空間分解能は、受感部のサイズまたは SQUID と対象物の距離の、いずれか大きいほうと同程度となる。一方、感度は、断熱や真空保持の圧力に耐えるために SQUID と対象物の距離を離しても、また空間分解能を高めるために受感部のサイズを小さくしても、いずれの場合も低下する。

そこで、筆者らは SQUID の高感度を保持しつつ空間分解能を高めるために、レーザーと SQUID を組み合わせたレーザー SQUID 顕微鏡の研究に着手した。他の走査型顕微鏡の原理と同様に、到達可能な最小空間分解能はレーザースポットサイズ程度まで向上する。レーザー SQUID 顕

微鏡の発表は、PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) の Shurig らが先行したが、NEC の二川らと筆者ら<sup>1,2)</sup>からも発表がなされた。ここでは、GaN 青色発光ダイオードチップに紫外線を照射した際に、チップ内でのどのように光電流が流れているかを可視化した結果について紹介する。

### 1. 光電変換と磁場

半導体に、そのバンドギャップエネルギーよりも大きなエネルギーをもった波長の光を照射すると、電子と正孔が発生する。電子と正孔の拡散長以内に、p-n 接合や不純物濃度差があると、電子と正孔は空乏領域での内部電界により空間的に分離される。光照射によって生成されたキャリアの蓄積によって、やがて p-n 接合が順バイアスされ、少数キャリアとして注入され再結合することにより、半導体内部で電流が閉じる。このような内部で閉じた電流は外部に取り出すことができないが、磁場を検出することによって計測できるようになる。

ここで注意しなければならないことは、均一に放射状に流れる電流から発生する磁場は、対称性により互いにキャンセルされる。半導体に不均一性がある場合には、バランスが崩れて磁場が検出される。半導体の量子効率は高いの

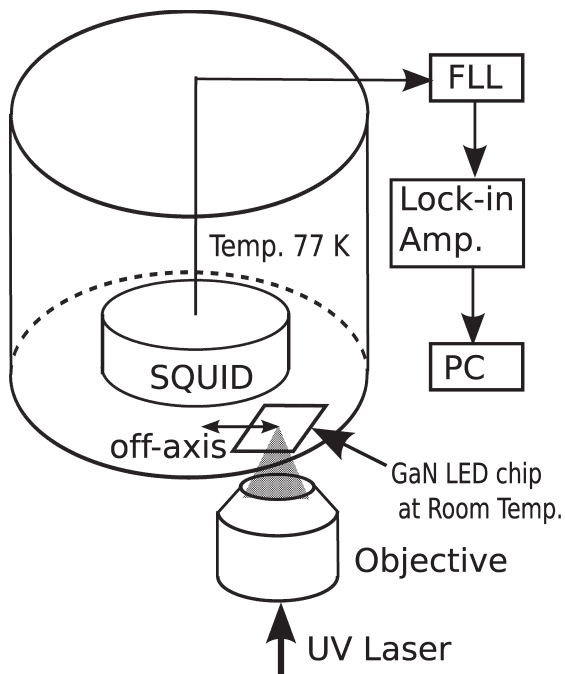


図1 実験装置のセットアップ.

で全電流は小さくないが、この対称性のため検出される磁場は非常に小さくなるので、SQUIDが必要となる。また、半導体外部に低インピーダンスの電流経路がある場合には、キャンセルは起こりにくくなるが、磁場の大きさは電流経路（面積と方向）に強く影響される。

p型のワイドバンドギャップ半導体の場合、そのフェルミレベルが深いため、仕事関数が大きな貴金属を用いても単に接触させた程度では良好なオーミック接触を得ることは難しい。そこで、非接触で電気的な情報を得る装置ができれば有意義である。

## 2. 実験装置

図1に測定装置の概念図を示す。波長 325 nm の直線偏光 He-Cd レーザーを励起光源として使用した。レーザー光は、光チョッパーにより 3.07 kHz の変調をかけ、倍率 10 倍、NA 0.4 の石英対物レンズで、ビーム直径 15  $\mu\text{m}$  程度に集光した。レーザーのパワーは、対物レンズの出口で計測して 7 mW である。

SQUID は、高温超伝導 SQUID マグネットメーターを使用し、図2 (a) のように、その中心軸をレーザー焦点から水平方向にシフトして配置した。SQUID と試料までの距離は 10 mm である。磁場感度がある方向は、試料表面に垂直な方向である (図2 (b))。

試料は、直径 2 インチのサファイアウェハー上の GaN-LED チップ (340  $\mu\text{m} \times 350 \mu\text{m}$ ) である。XY ステージで試料を移動させ、レーザー照射位置を 15  $\mu\text{m}$  刻みで二

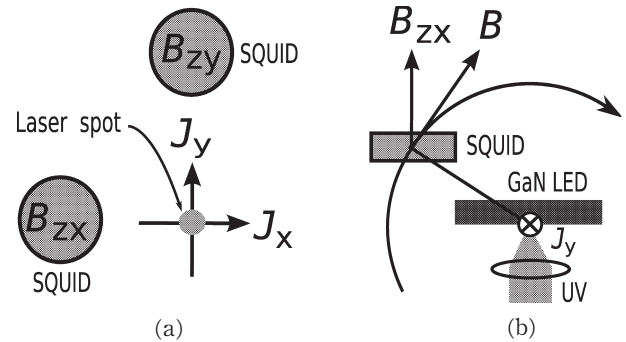


図2 オフアキス配置. (a)  $x$ - $y$  平面, (b)  $x$ - $z$  平面.

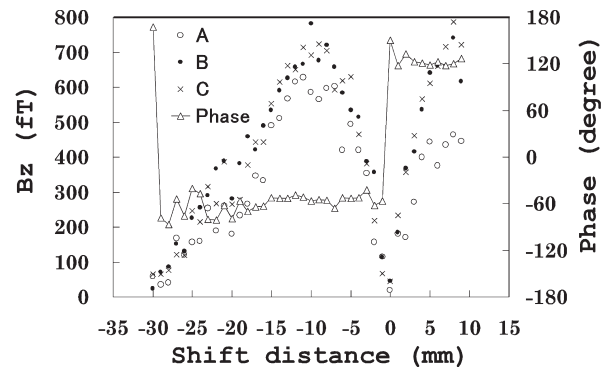


図3 オフアキスのシフト距離と磁場の関係. A, B, C は異なる試料による比較.

次元スキャンした。静磁場でのシールド率が約 100 程度の磁気シールドの中に SQUID を設置した。励起信号を与えて、その磁気応答を位相検波するアクティブ型の計測方法を採用しているので、生体磁気計測で使用するような厳重な磁気シールドは不要である。

図2に示したように、 $X$  軸および  $Y$  軸方向に SQUID をシフトして配置することによって、レーザースポットを起点とする電流ベクトルの計測を可能とした。 $x$  方向にシフトして配置した SQUID によって  $J_y$  が、 $y$  方向シフトによって  $J_x$  の成分が測定される。電流の極性は、ロックイン検波後の位相により決定した。磁場から電流への変換は、レーザーのスポット直径と等しい長さの電流ベクトルを仮定して、ビオ・サバルの法則により算出した。

## 3. 実験結果

図3にレーザースポットの真上を基準点として、SQUID を横方向にシフトした移動距離と、検出された磁束密度の関係を示す。直線状の電流から発生する磁場を仮定すると、理論的には、移動距離が試料-SQUID 間の距離 (10 mm) と等しくなるときに検出磁場が最大になるが、実験結果はこれに一致している。

図4 (a) は、磁場から  $X$  および  $Y$  方向の電流成分を求

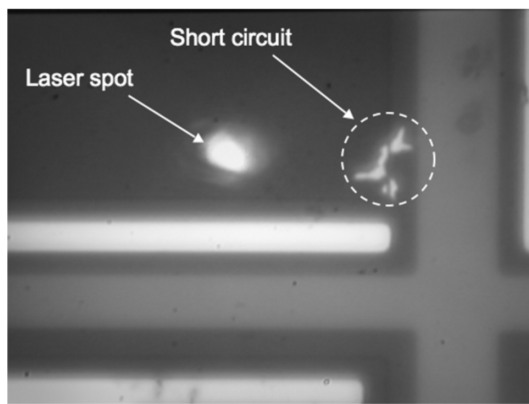
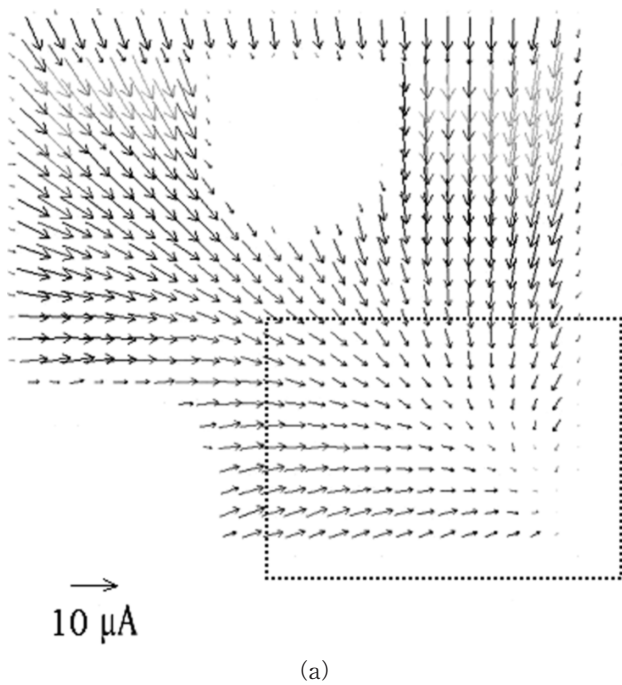


図4 (a) 電流ベクトル分布, (b) 光学画像.

め、そのベクトル合成により得られた電流ベクトルの分布を示す。点線で囲まれた部分の光学画像を図4 (b) に示す。このチップには電極のエッチング時に残渣があり、その残渣によって p-n 接合がショートしている不良品である。ショートしている場所に電流が集中する様子がわかる。なお、正常なチップの場合は、チップ中央部に磁場最小個所があり、両電極に近づくにつれて磁場が大きくなる分布であった。

ここで再認識しなければならないことは、このデータは

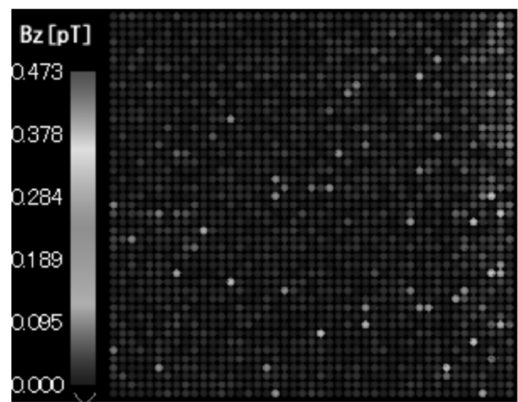


図5 ウェハースケールでのチップ選別.

スキャンニングによって計測されたものであり、各点の電流ベクトルが同時に計測されたわけではないということである。そのため、電流分布は閉ループにならず、いわば擬似的な電流分布である。しかしながら、プロービングによる接触計測ではチップ全体の平均化されたスカラー量しか測定できないのに対して、レーザー SQUID 法では、非接触でチップ内の電流ベクトルの二次元分布を評価できる点ですぐれている。

図5は、2025個の各チップの定点（チップ中央の1点）計測による、ウェハースケールでの検査結果である。ショートしているチップ（白丸）と正常品では、磁場の大きさが異なるので、選別の用途にも適用可能である。

軸ずらしの紫外線レーザー SQUID 顕微鏡を開発し、GaN-LED の光電流分布を可視化した。ショート個所に電流が集中する様子を画像化できた。非接触でチップ内の電流分布を計測することができ、接触検査が難しいワイドバンドギャップ半導体の検査に応用可能である。SQUID の高速化、安定動作、長期信頼性が実用化への課題である。

## 文 献

- 1) M. Daibo, T. Kotaka and A. Shikoda: "Photo-induced magnetic field imaging of p-n junction using a laser SQUID microscope," *Physica C*, **357-360** (2001) 1483-1487.
- 2) M. Daibo, D. Kamiwano, T. Kurosawa, M. Yoshizawa and N. Tayama: "Ultraviolet laser SQUID microscope for GaN blue light emitting diode testing," *J. Phys.: Conf. Ser.*, **43** (2006) 1262-1265.

(2007年2月9日受理)