

集積回路評価用レーザーテラヘルツ放射顕微鏡の開発

山下 将嗣*¹・紀和 利彦*²・斗内 政吉*³・大谷 知行*¹・川瀬 晃道*¹

Development of a Laser Terahertz Emission Microscope for Inspecting Electrical Failures in Integrated Circuits

Masatsugu YAMASHITA*¹, Toshihiko KIWA*², Masayoshi TONOUCHI*³, Chiko OTANI*¹
and Kodo KAWASE*¹

Inspection and failure analysis of large-scale integrated circuits (LSI) have become a critical issue, as there is an increasing demand for quality and reliability in LSIs. Recently, we have proposed a laser THz emission microscope (LTEM) for inspecting electrical failures in LSIs, which detects the THz emission from LSIs by scanning them with femtosecond laser pulses. Using LTEM, we have successfully observed the THz emission image of an operational amplifier while they operated. The difference of the LTEM image between a normal chip and a damaged one is clearly observed, which can be used to localize the failure spot.

Key words: THz emission, LSI inspection, failure analysis, scanning laser microscope

フェムト秒レーザー技術の発展とともに、従来発生・検出自体が困難とされたテラヘルツ (THz) 帯の電磁波が実験室レベルで利用可能となり、応用に向けた研究が盛んに行われている。この未開拓領域の電磁波は、新たなセンシング・イメージング用光源として期待されており、種々の非破壊検査システムや生体センシングへの応用が提案されている¹⁾。筆者らは、2003年に、フェムト秒レーザー走査により半導体大規模集積回路 (LSI: large scale integrated circuits) から THz 波の放射の検出に成功し、この現象を用いて非破壊・非接触で半導体 LSI の故障箇所絞り込みを可能とするレーザー THz 放射顕微鏡 (LTEM: laser THz emission microscope) の提案を行った^{2,3)}。最先端の半導体 LSI は、微細化・複雑化が進むとともにその信頼性低下が懸念されており、LSI 開発において故障解析の重要性が高まっている^{4,5)}。LTEM によって故障箇所を絞り込んだ後、原子レベルの欠陥分析により、その根本原因の究明を行うことによって、LSI 研究開発効率の大幅な改善や量産ラインにおけるチップ製造歩留まりの向上が期待されている。

本稿では、LTEM システムの概要を紹介するとともに、バイアス電圧を印加したマイクロプロセッサおよびオペアンプの LTEM 像を測定した結果について紹介する。また、オペアンプを用いて LTEM 像の比較による断線箇所の絞り込みや信号伝播経路の可視化を行った結果について報告する。

1. レーザーテラヘルツ放射顕微鏡

ここでは、LTEM による LSI 故障箇所絞り込みの原理について述べる。図 1 のように、半導体基板上に金属電極が形成された光伝導素子に電圧を印加し、電極ギャップにフェムト秒レーザーを照射すると、瞬間的な光電流パルスが生成され、マクスウェル方程式から導出される式(1)に従って

$$\mathbf{E}_{\text{THz}}(t) \propto \frac{\partial \mathbf{i}(t)}{\partial t} = \frac{\partial n(t)}{\partial t} e \mathbf{v}(t) + n(t) e \frac{\partial \mathbf{v}(t)}{\partial t} \quad (1)$$

電磁波が放射される。ここで、 \mathbf{E}_{THz} は電磁波の電界、 \mathbf{i} は光電流密度、 n は光キャリアー、 \mathbf{v} はキャリアーのドリフト速度であり、放射されるサブピコ秒オーダー電磁波パルスは THz 領域に及ぶ広帯域な周波数成分を有する。式

*¹ 理化学研究所 (〒351-0198 和光市広沢 2-1) E-mail: m-yama@riken.jp

*² 岡山大学工学部電気電子工学科 (〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1)

*³ 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター (〒565-0871 吹田市山田丘 2-6)

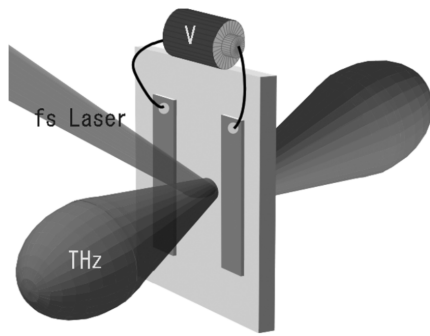


図1 光伝導素子からの THz 波放射.

(1) の右辺は、光キャリア密度およびドリフト速度の時間微分に比例した項を有しており、光伝導素子に照射されたレーザー強度および、印加された電界ベクトルに比例する。LTEM システムの概略図を図 2(a) に示す。モード同期チタンサファイアレーザー (パルス幅 120 fs, 中心波長 780 nm, 繰り返し周波数 76 MHz) より出力されたフェムト秒レーザーパルスは、ビームスプリッターによって励起光と検出光に分けられる。励起光はガラス基板に作製された透明導電性 ITO (酸化インジウム：錫) 薄膜を通過した後、対物レンズによって x-y ステージに設置された評価 LSI に集光される。システムの空間分解能は励起光 (波長 780 nm) のスポットサイズで制限されるため、回折限界までビームを絞り込めば、サブミクロンオーダーの空間分解能は実現可能である。LSI から放射された THz 波は、レーザー集光に用いた対物レンズによって集められ、ITO 薄膜で反射された後、軸外し放物面鏡によって光伝導素子に集光される。光伝導素子は検出光の照射された瞬間だけ光キャリアが励起され、集光した THz 波の電場によって光電流が流れる。THz 波の電場強度に比例した検出器からの電流信号は、ロックイン増幅器により同期検波・増幅される。光伝導検出器に照射する検出光経路には折り返しミラーを配置したステージを配置しており、ステージを移動させることによって時間遅延を検出光に与え、THz 波の時間波形を検出することが可能である。

図 2(b) に光伝導素子から放射された THz 波の時間波形を示す。LTEM 像は検出光の時間遅延位置を THz 波の時間波形振幅ピークに固定し (図 2(b) 中矢印)、自動ステージにマウントした LSI チップを二次元的に移動させながら、THz 波振幅信号を検出することにより取得する。

2. バイアス電圧下におけるオペアンプの LTEM 観察

LTEM により動作状態のオペアンプの測定を行った結果について述べる。オペアンプ回路内に故意に断線させたオペアンプを用意し、正常なオペアンプから得られる THz 放射像との比較を行った。切断された配線の光学顕

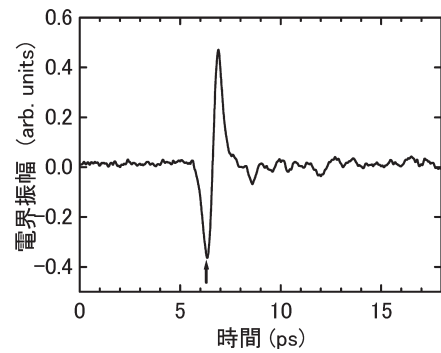
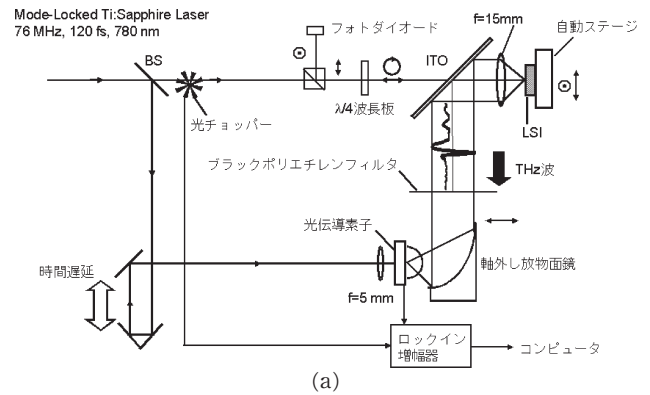


図 2 (a) レーザー THz 放射顕微鏡システム, (b) 光伝導素子から放射された THz 波の時間波形.

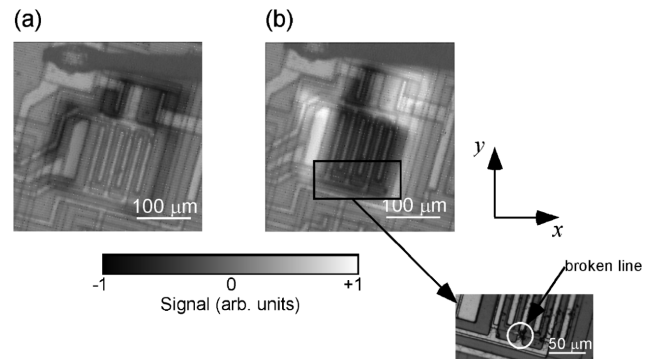


図 3 オペアンプ回路の LTEM 像の一部. (a) 正常回路, (b) 回路の一部を断線させた回路.

微鏡写真を、図 3 の挿入図に示す。図 3(a) および (b) は、それぞれ正常回路および欠陥回路の THz 放射像である。2つの THz 放射像は大きく異なっており、特に断線を含む回路ブロックにおいて違いは顕著である。この結果は、オペアンプの配線を切断したことで、断線箇所周辺の電界分布および光電流の分布が変化したことを表している。LTEM 像の変化は回路内の断線箇所を含むブロック内で現れており、LTEM 観察により断線箇所の絞り込みが可能であることが示唆された。

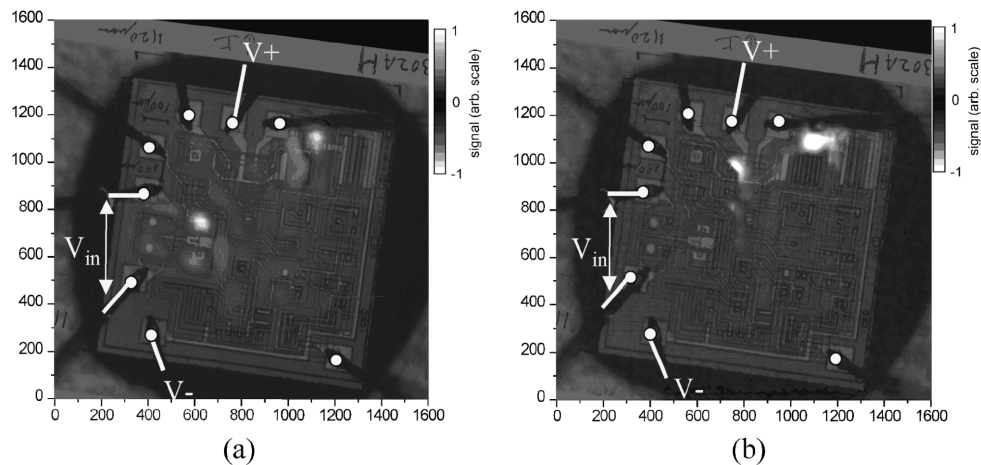


図4 オペアンプ回路内のLTEM観察像。(a) 励起レーザー強度の変調周波数に同期したTHz波信号の測定結果および、(b) 回路への入力電気信号周波数に同期したTHz波信号の測定結果。

3. LTEMによるオペアンプ内の信号伝達経路の評価

LTEMでは通常、LSIに照射するフェムト秒レーザーを変調して、変調周波数に同期したTHz電磁波を検出することにより、LSIの直流近傍の電界分布が得られる⁴⁾。これに対して、LSI動作時に入力する電気信号に同期したTHz電磁波を検出することによって、入力信号の回路内での分布や位相情報が得られる。図4に、オペアンプ回路内の電界分布を測定した結果を示す。図4(a)は励起光の変調と同じ周波数のTHz波信号をロックイン増幅器で同期検出した結果であり、図4(b)は、回路への入力電気信号と等しい周波数のTHz波信号を同期検出した結果である。図4(a)がオペアンプ回路内の定常的な電界分布を表しているのに対して、図4(b)は、入力した電気信号が回路内を伝播した経路にあたる領域に存在する電界分布を表している。入力した信号に対して黒の部分が同位相、白の領域が逆位相であることを示しており、入力側(V_{in})から出力($V+$)に信号が伝播するに従って信号の電界強度が増幅されている様子が見える。以上の結果と、LTEMによる観察結果から、バイアス電圧を印加したLSIの不良箇所絞り込みや動作状態におけるLSI内の電気信号伝播経路の評価法としての有用性が確認された。

本稿では、LTEMの概要と、そのLSI故障箇所絞り込み技術としての応用可能性について述べた。LTEMを用いてLSIのテラヘルツ波放射像を取得することにより、非破壊・非接触でLSIの故障箇所を特定・絞り込める可能性がある。今後は、製造工程における故障解析での利用を目指して無バイアス電圧下におけるLSI測定を行うとともに、最先端LSIへ対応するため空間分解能の向上や裏面観察型システムの開発を行う予定である。

文 献

- 1) D. Mittleman (ed.): *Sensing with Terahertz Radiation* (Springer, Berlin, 2003).
- 2) T. Kiwa, M. Tonouchi, M. Yamashita and K. Kawase: "Laser terahertz-emission microscope for inspecting electrical failures in integrated circuits," *Opt. Lett.*, **28** (2003) 2058-2060.
- 3) M. Yamashita, K. Kawase, C. Otani, T. Kiwa and T. Tonouchi: "Imaging of large-scale integrated circuits using a laser terahertz emission microscopy," *Opt. Express*, **13** (2005) 115-120.
- 4) K. Nikawa and S. Inoue: "LSI failure analysis using focused laser beam heating," *Microelectron. Reliab.*, **37** (1997) 1841-1847.
- 5) K. Nikawa: "Laser-SQUID microscope for LSI chip defect analysis," *Vortex Electronics and SQUIDS*, eds. T. Kobayashi, H. Hirakawa and M. Tonouchi (Springer, Berlin, 2003) pp. 224-232.

(2005年4月11日受理)