光電磁界プロービング技術の最近の展開

永妻 忠夫*

Recent Trends in Optical Probing of Electro-Magnetic Field

Tadao NAGATSUMA*

*日本電信電話株式会社NTT マイクロシステムインテグレーション研究所（〒243-0198 神奈川県厚木市森の里宮3-1）

*NTT Microsystem Integration Laboratories, NTT Corporation (3-1 Morinosato Wakamiya, Atsugi-shi, Kanagawa 243-0198)

1. はじめに

インターネットやモバイルコミュニケーションの発展を支えている情報通信機器においては、処理速度の高速化と小型化が急ピッチで進んでいる。例えば携帯電話には、従来の電話やインターネット通信機能だけでなく、カメラ、テレビ、RFID (Radio Frequency IDentification)、無線LAN、個人認証、GPS (Global Positioning System) といった多種多彩な機能が小さなボディに押し込まれている。無線インターフェースの要であるアンテナもマルチバンド化と同時に小型内蔵化され、扱っている周波数はギガヘルツ (GHz: 10^9 Hz) のオーダに及ぶ。また、コンピュータなど情報処理装置におけるプリント回路基板上のチップ間接続やバックプレーン実装におけるカード間接続を行っている（有線）電気配線の信号速度も高速化が進み、チャンネルあたりギガビット／秒 (Gbit/s) オーダに達している。こうしたギガヘルツ・ギガビット級の信号を、高密度に実装された回路板やモジュール上で巧みにハンドリングするためには、設計技術のみならず評価（測定）技術の進化が不可欠である。

設計シミュレーションでは、測定・検証対象となる回路上の「任意の」ノードに観測ポイントを設け、電圧波形などの信号を回路動作に対して全く影響を与えることなく観測することができる。一方、現実の計測では、観測ポイントに何かを接続して信号を取り出し、それを計測器につないで観測することになるが、これを一般にプロービング（プローブとは探針という意味）と呼んでいる。実際のプロービングがシミュレーションと最も異なる点は、物理的な大きさをもつプローブが観測ポイントに置かれ、そのプローブが信号の分岐を作ることである。この分岐の方法によっては、回路自体の動作に大きな影響（擾乱）を及ぼすことになる。また、信号が高速・高周波になるにつれて、プローブの応答速度、プローブから計測器までのケーブルの帯域、さらには計測器の帯域が追いつかず、正しい（真の）信号が測定できないという問題が生じる。

本稿で解説する光電磁界プロービング技術は、以上のような帯域と擾乱の問題に対し、これまでの純電氣的な測定技術の壁を打破できるものとして期待されている^{1),2)}。光技術を用いた高周波電気信号計測の歴史は古く、ピコ秒・フェムト秒パルスレーザ技術の黎明期にあたる1980年代の初頭に遡る³⁾。超高速ダイオードやトランジスタといった基本デバイスの特性（スイッチング速度、周波数応答）評価や、集積回路(IC)内部の波形測定（故障診断）など、おもに研究開発段階でのツールとして利用されてきた。現在でも、テラヘルツ (THz: 10^{12} Hz) 級の半導体デバイスの評価や電波計測において活躍している。一方、化合物半導体デバイスのみならずシリコン系デバイスの高速化の進展に伴い、近年、冒頭に述べたようなギガヘルツ・ギガビット級の回路板やモジュールを搭載した情報通信機器が登場していることから、それらの評価にも光電磁界プロービング技術が有用であると考えられる。

本稿では、光を用いた電界（電圧）計測ならびに磁界（電流）計測について、測定原理、実装基板計測などへの適用例、今後の課題を述べる。

2. 従来技術の現状と問題点

図1は、プリント回路板や実装基板上の電気信号（電圧信号）を測定するための最も汎用的なプロービング手法である。通常ギガヘルツ帯の高周波回路板では、伝送線の特性的インピーダンスは50Ωであり、こうした低インピーダンスの回路に外部からプローブをコンタクトさせることによって擾乱を与えることがないように、観測点から見たプローブの入力インピーダンスを高くすることが重要である。例えば、誤動作した回路の信号波形を調べようとして回路内の観測点にプローブを当ててみると、逆に正常に動作したというようなことを聞くが、これでは何のための計測なのかかわからない。

プローブは、測定したい信号線と電位の基準とされるグラウンド線の2点にコンタクトさせて用いるのが一般的で

図1. プローブによるプリント回路板測定の様子

ある。すなわち、図1に示すように、信号線とグラウンドの位置によって長さがフレキシブルに調整できるグラウンドリードを用いたり、信号ピンとグラウンドピンが狭いピッチで並んだプローブが利用されている。基板上の伝送線からピックアップされた電流は、同軸ケーブルを用いて、時間波形計測のためのオシロスコープや周波数測定のためのスペクトラムアナライザに導かれる。オシロスコープやスペクトラムアナライザとしては、最高で50~80 GHz帯域のものが入手できる。したがって、現在多くの場合で帯域を決めているのは、同軸ケーブルの損失（特に30 GHz以上のミリ波帯で問題）とプローブである。取り回しの良さから柔軟性を重視した高周波ケーブルが選定されることが多いが、小さい曲率で曲げると特性インピーダンスが変化したり損失が生じるため、測定の再現性に影響を及ぼすことがある。しかしながら、以下に述べるようにプローブ自体の問題のほうがはるかに大きい。

高入力インピーダンスプローブとしては、図2に示すように、分圧抵抗を用いたパッシブ・プローブ（同図(a)）と、入力部にFET（電界効果型トランジスタ）デバイスからなるバッファ素子を用いたアクティブ・プローブ（同図(b)）の2種類がある。プローブを観測ポイントにコンタクトさせると、同図(c)の簡易等価回路に示すように、観測ポイントに対してプローブの入力容量 C_p と入力抵抗 R_{in} （直流値）が負荷となる。パッシブ・プローブの入力抵抗は通常1 M Ω と大きいので50 Ω の伝送線には影響を及ぼさないと思われるが、入力容量が10~20 pFと大きいので、高周波になるとこの C_p の影響で入力インピーダンスが低下するとともに、被測定回路から見たリアクタンス負荷の影響で信号波形に歪みが生じる。したがってパッシブ・プローブは、100 MHzオーダの帯域の信号測定に用いる（1 M Ω 入力抵抗のオシロスコープと併用）のが一般的である。最近では、入力抵抗 R_{in} を500 Ω に、入力容量 C_p を

図2. 高入力インピーダンスプローブ

(a)パッシブ・プローブ、(b)アクティブ・プローブ、(c)簡易的な等価回路

0.25 pFにまで下げた低容量パッシブ・プローブ（公称帯域7.5 GHz）が市販されている。しかしながら、回路によっては50 Ω よりも高いインピーダンスをもったものも存在することから、500 Ω の入力抵抗は擾乱という観点では実用上十分高いものとは言えない。

一方、アクティブ・プローブでは、入力抵抗 R_{in} を20 k Ω ~100 k Ω 程度に保ったまま、入力容量 C_p を0.5 pFまで下げることができる。最高帯域として6 GHzのアクティブ・プローブが市販されている。FETデバイスには出力飽和があるため、ダイナミックレンジは最大で ± 3 V程度である。また電源供給が必要で、耐電圧がパッシブ・プローブよりも低いので取り扱いには注意を要するが、信頼性・再現性の高い高周波信号波形の測定には最も広く用いられている。

図3. 光プロービングの概念とEOプローブ

もう1つ従来のプローブにおける共通の問題として、グラウンドリードの問題がある。図2(c)の等価回路ではインダクタンス L_p に相当し、プローブの入力容量との共振の結果、実際の測定波形ではリングングとなって現れる。ギガヘルツ帯の測定ではグラウンドリードの長さは固定し、さらにリードの長さを10mm以内にすることが望ましい。

3. 光電界プロービング

上述のように従来のプロービング技術では、高入力抵抗と低入力容量を両立させることが難しい、高周波でグラウンドの扱いに注意を要するといった問題に加え、さらにアクティブ・プローブでは入力耐圧の問題があった。これらの問題は、図3に示す光プロービング技術を用いると一挙に解決できる。また、同軸ケーブルよりも可燃性に富んで曲げに強く、電気的なクロストークや輻射雑音の影響を受けない光ファイバケーブルを用いることができる。

図3は、電気光学(Electro-Optic: EO)[†]結晶を電界センサとして用いた、電圧測定プローブ（以降、EOプローブと呼ぶ）の例である。EOプローブの先端には金属ピンを設けられ、それを介して信号線の電圧に比例した電界がEO結晶内に誘起される。グラウンド線へのコンタクトは不要である。EO結晶には、電界によって複屈折率が変化する性質（ポッケルス効果）があり、その結晶にレーザー光を照射すると、反射して戻ってきたレーザー光は偏光状態が変化する。EO結晶の複屈折率は電界の強さに応じて瞬時に変化するが、その応答速度は、0.01~0.1 psのオーダーと極めて

図4. EO効果を利用した電気信号のサンプリング計測の原理

高速である。

EOプローブの原理は、図4に示すように、電圧あるいは電界による光強度変調である。光変調器では既知の電気信号で光信号を制御するのに対し、EOプローブでは光信号の変化から未知の電気信号を測る。電界によって屈折率が変化したEO結晶中に光を通過させると、結晶に入る前と出た後で偏光状態が変わる。この偏光状態の変化は、EO結晶を通過した光をさらに偏光板に通すことで、光の強さ（光量）の変化に変換することができる。光信号としてはパルスレーザー光と連続(CW)レーザー光を用いる2通りの方法がある。パルス光を用いることで、時間的に変化する電気信号波形をほぼパルス幅の分解能で「サンプリング」計測することが可能である。最近では、0.1 ps程度のパルス幅のレーザー光源が容易に入手できることから、サブピコ秒の時間分解能（帯域換算で >1 THz）を得るのは難しいことではない。

パルス光の代わりに連続(CW)光を用い、高速フォトダイオードで電気信号に変換したのち、電気的なサンプリングオシロスコープやスペクトラムアナライザでそれぞれ波形や周波数を計測することも可能である^{4)~6)}。この場合、帯域がフォトダイオードおよびそれ以降の電気的な計測技術の性能で決まる。また、測定帯域を広げると光のショット雑音が増えるため感度が劣化することから、実用的には数GHz程度の測定に適している。ただし、単一周波数の正弦波信号のみを対象にした場合には、帯域制限によってS/Nをかせぐことができる。

EO結晶としては、 LiTaO_3 、 LiNbO_3 、KTP、CdTe、ZnTe、BSO($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$)、BTO($\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$)などの酸化物結晶、半導体が代表的である。より高感度な材料として有機材料への期待も高く、高分子ポリマー⁷⁾やDAST^{8),9)}が検討されている。

図5は実際のEOプローブヘッド光学部の内部構造の一例である。レーザー光は光ファイバで導入され、また電圧に

図5. EOプローブの例

(a) プローブヘッド光学系の構成例, (b) EO サンプリングオシロスコープ (パルスレーザ光を使用したスタンドアロン型の電圧波形計測器), (c) リアルタイムEOプローブ (CW レーザ光を使用, 電気オシロスコープあるいはスペクトラムアナライザを後段に接続して用いる)

応じて強度が変化した光は、ふたたび光ファイバによってフォトダイオードに送られ電気信号に変換される。図のように、すべて光学部品（石英または誘電体材料）で構成され、金属部品は先端のピン（長さは3~5mm程度）のみである。筆者²⁾らがこれまでに開発したEOプローブでは、入力抵抗 $>100\text{ M}\Omega$ 、入力容量 $<0.2\text{ pF}$ で、パルスレーザ光（パルス幅25 ps）を用いたシステムで帯域10 GHz、CW レーザ光を用いたもので帯域1 GHzが得られている。広い測定帯域と高い電圧感度の双方を得ることが可能なサンプリング計測では、電圧感度としてミリボルトオーダが得られるが、被測定信号は繰り返し信号であることが条件である。

図6に、1点コンタクトであるというEOプローブの特長を生かした計測例¹⁰⁾を示す。被測定回路ではロジック回路（インバータ）のスイッチングノイズが電源側に漏れており、EOプローブによって電源VccとグラウンドGNDの波形を個別に測定したものが同図(b)である。従来の2点コンタクトを必要とするプローブでは、VccとGND間の信号波形（いわゆるノーマルモードノイズ）のみ測定可能であり、従来プローブによる結果が同図(c)である。EOプローブによって測定した波形からVcc-GNDの演算した結果と、従来プローブによる測定波形はよく一致している。このことから、EOプローブが従来のプローブでは不可能であった回路板のコモンモードノイズ（アースを基準とした信号）の計測に適用できることがわかる。

EOプローブは、金属ピンがない状態での電界計測も可能である。これは伝送線からの漏れ電界を計測するもので、感度は低下するもののプローブが被測定回路に与える擾乱はほとんどなくなる。絶対的な電圧レベルを計測すること

は困難になるが、故障箇所の同定や、測定とシミュレーションとの波形比較を行う上で有用である。

また、実装の高密度化に伴い、より狭い領域の信号計測に対応できるEOプローブヘッドの開発が進められている^{2),5),11)}。光ファイバの先端に直接あるいは集光用のレンズを介してEO結晶を配置したものや、さらにそのファイバ型プローブの結晶の先にタングステン・マイクロピンを固定した小型プローブが提案されている。

4. 光磁界プロービング

電流プローブは、これまで述べた「信号を横取りする」電圧プローブと異なり、伝送線の回りに生じた磁界をトランスあるいはループコイルでピックアップするもので、信号源が高いインピーダンスであっても測定可能である。しかしながら、トランスピックアップ型のプローブをプリント回路板や実装ボードの測定に適用するには、観測ポイントに専用の電流リードを取り付ける必要がある。

このような背景から、基板加工を施さずに任意ポイントの電流測定が可能な光磁界（電流）プロービング技術が注目されている^{12)~14)}。光磁界プロービングでは、3節で述べたEO効果の代わりに磁気光学(Magneto-Optic: MO)効果⁺を利用する^{15),16)}。MO効果とは、結晶(MO結晶)に印加された磁界によって結晶内を伝搬する光の偏波面が回転する現象（ファラデー効果、磁気光学カー効果）である。したがって、例えば図5に示した光学系でEO結晶とMO結晶とを交換すれば、そのままMOプローブとして利用できる。代表的なMO結晶としては、YIG (yttrium iron garnet), BiRIG, GaP, TGG (terbium gallium garnet), $\text{KTb}_3\text{F}_{10}$,

図6. EOプロービングによる回路板上のコモンモードノイズの測定例
(a)被測定回路, (b)EOプローブ, (c)従来プローブ

ZnTe, CdMnTeなどが挙げられる。

図7に、MOプローブを用いた磁界（電流）測定システムの構成例を示す。また同図(b)は、ライン&スペース10 μm の伝送線が作る磁界を、ファイバ先端に取り付けた厚さ11 μm のMO結晶を用いて計測した例であり、微小ループコイルでは得られない非常に高い空間分解能が得られていることがわかる¹⁴⁾。これまでに報告されているMOプローブの電流測定感度は0.1~1mA程度である。

なお、微小ループコイルの場合、ループコイル自身の感度に大きな周波数依存性があるため、信号波形計測よりも、スペクトラムアナライザを用いた周波数領域での計測に適している。また、そのループの一部の隙間にEO結晶を挟み込み、ループに流れる誘導電流が作る電界を光学的に測定する方法でより広帯域な測定が可能であることが報告されている¹⁷⁾。

5. まとめと今後の課題

光電磁界プロービング技術は、広帯域性、低擾乱性においてこれまでの電氣的なプロービング技術を大きく勝っている。他に、グラウンドコンタクトが不要である、プローブを電氣的に完全分離できるため測定系への雑音やサージの侵入を回避することができる、高電圧に対しても絶縁破壊やプローブのダメージがほとんどないといった実用面での特長も有している。さらに、空間や光ファイバ中を伝搬する光信号は無誘導であることから、プローブを多チャネ

ル化した場合にチャネル間のクロストークが発生しないため、2次元計測（電磁界の空間マッピング）に有効である。しかしながら、このようなユニークな特徴を生かすためにも、今後、測定感度の向上をはじめ以下のような技術開発が必要と考えられる。

まず感度に関しては、測定時間に依存するが、積算平均化処理（通常10秒から数十秒要する）を行えば、ミリボルトオーダの電圧、サブミリアンペアオーダの電流計測が現状可能である。しかしこの値は、平均化処理が不要な電氣的なオシロスコープに比べると1桁から2桁劣っており、例えばアイパターン計測を行うには現状よりも少なくとも1桁の感度向上が必要である。このために、EO/MOプローブの感度を上げることが必要となるが、センサ結晶材料におけるブレイクスルーが最も期待されている。

また、EO/MO結晶材料のみならずプローブ自体の構成や構造にも多くの技術改良が必要である。中でも光ファイバを積極的に用いたプローブは1つの重要な方向であろう。光ファイバによる遠隔操作は、使い勝手がよくなり光プロービングの利用範囲を広げることにつながる。しかし、単にEO/MO結晶と光ファイバを接続しただけの形態では、光ファイバの曲げや温度変化に伴う不安定性が問題になっており、これを回避するための方策が必要である。1つの有力な手段として、プローブ先端に偏光検出機能（偏光変化を強度変化に変換する機能）を集積することが考えられる。従来のような個別光部品の集積ではなく、光導波路な

図7. MOプロービングによる磁界計測
(a)測定システムの構成例, (b)光ファイバ型プローブによる磁界分布の計測

どの平面光回路技術の利用が望まれる。これは感度・安定性の向上に加えて、小型化、低コスト化にも大きく貢献するものと思われる。

光電磁界プロービング技術は、LSIや電子機器内部だけでなく、機器から放射される漏洩電磁波（放射性ノイズ）の計測にも注目されている¹⁸⁾。本技術が、実装技術全般におけるシグナルインテグリティを高めるためのツールとして今後も発展し続けることを期待する。

(2006.7.6-受理)

文 献

- 1) T. Nagatsuma, M. Shinagawa, N. Sahri, A. Sasaki, Y. Royter and A. Hirata: "1.55- μm Photonic Systems for Microwave and Millimeter-Wave Measurement", IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., Vol. **49**, pp. 1831-1839, 2001
- 2) 永妻忠夫, 品川 満: "フォトリック技術を用いた高周波エレクトロニクス計測", NTT R & D, Vol. **51**, pp. 475-485, 2002
- 3) J. A. Valdmanis, G. Mourou and C. W. Gabel: "Subpicosecond Electro-Optic Sampling", IEEE J. Quantum Electron., Vol. **QE-19**, pp. 664-667, 1983
- 4) H. Takahashi, S. Aoshima and Y. Tsuchiya: "Sampling and Real-Time Methods in Electro-Optic Probing System", IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. **44**, pp. 965-971, 1995
- 5) S. Wakana, T. Ohara, M. Abe, E. Yamazaki, M. Kishi and M. Tsuchiya: "Fiber-Edge Electrooptic/Magneto-optic Probe for Spectral-Domain Analysis of Electromagnetic Field", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. **48**, pp. 2611-2616, 2000
- 6) M. Shinagawa, T. Nagatsuma, K. Ohno and Y. Jin: "A Real-Time Electro-Optic Handy Probe Using a CW Laser", IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. **50**, pp. 1076-1080, 2001
- 7) M. Yaita and T. Nagatsuma: "Optical Sampling of Electrical Signals in Poled Polymeric Media", IEICE Trans. Electron., Vol. **E76-C**, pp. 222-228, 1993
- 8) 安達広昭, 吉村政志, 森 勇介, 佐々木孝友: "DAST結晶を用いた高感度光電界センサの開発", レーザ研究, Vol. **33**, pp. 389-394, 2005
- 9) 都甲浩芳, 横田宏明, 泉 篤志, 黒澤 敏, 深作 昇, 内田裕久, 小松貴幸, 菅田孝之, 清水直文, 永妻忠夫: "DAST結晶を用いた電気光学プローブによる極超低周波電界測定", 2006年電子情報通信学会総合大会, **C-14-5**, p. 272, 2006
- 10) 柳澤幸樹, 伴城暢一, 菊池 潤, サンジェイ・グプタ: "EOプローブを用いたEMI測定事例 (AQ7700 EOサンプリングオシロスコープ)", ANDO技報, April, pp. 20-25, 2000
- 11) 岩波瑞樹, 中田正文, 津田弘樹, 増田則夫, 大橋啓之, 明渡 純: "エアロゾルデポジション法により作製された超小型光ファイバ端電気光学プローブ", 2006年電子情報通信

- 学会総合大会, **C-14-4**, p. 271, 2006
- 12) 池亀 弘: “磁気光学プローブによる磁気ヘッドの高周波電流波形の計測”, IDEMA Japan News, 53, <http://www.idema.gr.jp/news/53/new53.htm>, 2003.
- 13) E. Yamazaki, S. Wakana, H. Park, M. Kishi and M. Tsuchiya: “High-Frequency Magneto-Optic Probe Based on BiRIG Rotation Magnetization”, IEICE Trans. Electron., Vol. **E86-C**, pp. 1338–1344, 2003
- 14) M. Iwanami, S. Hoshino, M. Kishi and M. Tsuchiya: “Magnetic Near-Field Distribution Measurements over Finite Meander Circuit Patterns by Fiber-Optic Magneto-Optic Probe”, Proc. 2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Vol. **1**, pp. 347–352, 2003
- 15) J. A. Riordan and X.-C. Zhang: “Sampling of Free-Space Magnetic Pulses”, Optical Quantum Electronics, Vol. **32**, pp. 489–502, 2000
- 16) A. Y. Elezzabi and M. R. Freeman: “Ultrafast Magneto-Optic Sampling of Picosecond Current Pulses”, Appl. Phys. Lett., Vol. **68**, pp. 3546–3548, 1996
- 17) E. Suzuki, S. Arakawa, H. Ota, K. Arai and R. Sato: “Optical Magnetic Field Probe Working up to 15 GHz Using CdTe Electrooptic Crystals”, IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, Vol. **47**, pp. 344–351, 2005

- 18) 高橋正慎, 太田博康, 荒井賢一: “光走査型プローブを用いた電磁界分布の測定”, 情報通信研究機構季報, Vol. **52**, pp. 127–133, 2006

† 用語解説

電気光学効果: 物質中を光が通過するとき, 光の振動面の向き(偏光)によってその進む速度が異なる現象を複屈折と言う。これは物質の結晶軸方位によって屈折率が異なるためであり, 屈折率の差(違い)を複屈折率と呼んでいる。電気光学効果とは, 物質に電場をかけたときこの複屈折率に変化する現象であり, 物質を通過した光は偏光状態の変化を受ける。このとき電場の強さに比例して複屈折率に変化する効果をポッケルス効果, 2乗に比例する効果をカー効果と呼ぶ。通常, 電界や電圧信号の計測に利用されるのは前者である。

磁気光学効果: 電場ではなく, 磁場をかけた物質の透過光や反射光の偏光状態が変化する現象を磁気光学効果と言う。その中で, 透過光の偏光状態が変化し偏光面が回転する現象をファラデー効果, 反射光の偏光状態が変化する現象は磁気光学カー効果と呼ばれる。前者は光アイソレータという反射光が光源に戻るのを防ぐための素子, 後者は光磁気ディスクの読み出しに応用されている。