

# 解説

## 電気光学サンプリング

高橋 亮・神谷 武志

東京大学工学部電子工学教室 〒113 東京都文京区本郷 7-3-1

(1989年5月11日受理)

### Electro-Optic Sampling

Ryo TAKAHASHI and Takeshi KAMIYA

Department of Electronic Engineering, University of Tokyo,  
7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113

#### 1. はじめに

電子および光電子デバイスの高速度性は年々着実に進歩してきた。新構造のトランジスタはすでに 10 ps の壁を突破し、光伝導体スイッチの応答時間はサブピコ秒に達しているため、時間分解能 25 ps の電氣的サンプリングオシロスコープでは測定不可能になってきている。

そこで、ピコ秒およびサブピコ秒の時間分解能をもつ新しい測定法に対する要求が高まり、超短光パルスを利用した、Auston らの光伝導サンプリング<sup>1,2)</sup>や Valdmanis らの電気光学サンプリング<sup>3)</sup>などの研究が始まった。

ここでは、光サンプリング法のなかでも近年、とくに注目されている電気光学 (EO) サンプリング法について述べる。従来の電氣的 IC テスタのように被測定デバイスにプローブ針を立てる必要がなく (非接触)、またプローブパルスの波長は基板に対し透明な領域にあるため、回路定数を全く変えることなく、すなわち回路の動作状態を保ったまま (無擾乱)、高い空間分解能をもって、任意のノードで測定できるなど、高時間分解能、高感度以外にも、従来の電氣的方法では実現不可能な多くの利点が備わっている。

現在のところ、ピコ秒およびサブピコ秒の時間分解能を得るには、モード同期 YAG または色素レーザーに頼らざるをえないが、光源の半導体レーザー化に対する研究もようやく活発化してきた。

#### 2. 電気光学 (EO) サンプリング法の原理

##### 2.1 電界検出法

電気光学的效果は電界の印加に伴う分極変化により屈折率が変化し、光の偏波状態を変化させる効果であり、それに要する時間は数 fs であるため、この効果を利用した計測では超短光パルスの高速度性を有効に活用することができる。典型的なシステム構成例を図 1 (a) に示す<sup>3)</sup>。レーザーパルスをトリガー光とプローブ光に分岐し、トリガー光によりフォトダイオードやフォトコンダクタ等の O/E 変換デバイスを励起して電気信号を発生させ、その電気信号を電気光学結晶に導いてプローブパルスによりその電界を検出している。ここで、プローブ光は電気光学結晶を通過する際に、その上に作製されたストリップラインを伝播する電気信号により誘起された電界の空間積分量に比例した偏波面の回転を被る。そこで、光強度変調器において電気光学特性の直線部分を利用すると同じ位相バイアスを補償板により与えてやると、検光子通過後の光強度の変化量は電気信号に比例することになる。

電気信号の時間変化、すなわち「波形」を得るには、結晶中での相互作用のタイミングを遅延装置により変えながら、光強度の変化量を測定すればよい。しかし、一般に生じる光強度変化量はきわめて小さいため、いくつかの信号検波技術を駆使し、雑音に埋もれた信号を検出しなければならない。図 1 (b) に各段におけるタイミングチャートを示す。レーザーの雑音に含まれる低周波  $1/f$  雑音を避けるため、被測定信号 (この場合トリガーパル

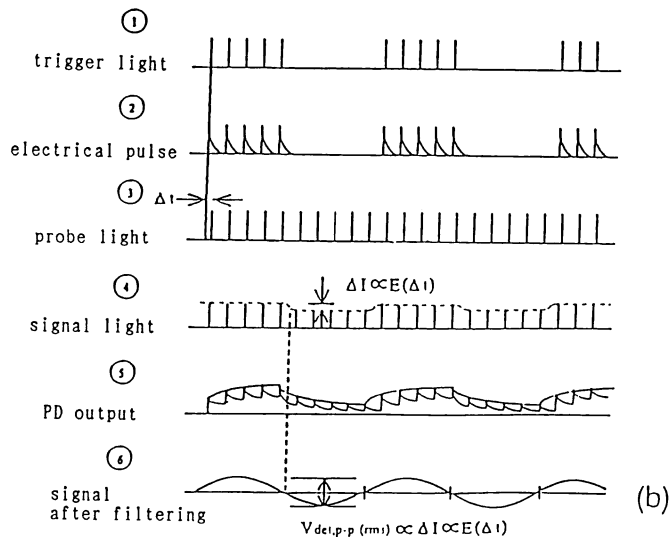
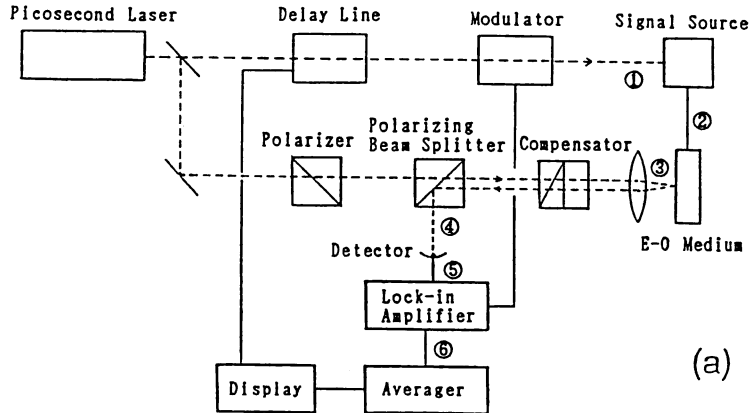


図 1 典型的な電気光学サンプリングシステム (a)<sup>5)</sup>, および タイミングチャート (b)

ス) に機械的チョッパや AO (EO) 変調器により強度変調をかけ、その変調周波数成分をロックイン検出することによって S/N 比が大幅に改善される。よって、ここで用いるフォトダイオードの応答速度は変調周波数程度でよい。また、場合によってはロックインアンプ後にシグナルアベレージャ等を用いると、積算平均化により S/N のいっそうの改善を図ることができる。

電気光学結晶中に高周波の信号電界を導き、プロービングを行なうヘッドの形状にもさまざまなものが提案されている (図 2)<sup>6-14)</sup>。初期における EO サンプリングシステムでは、(a) のように、被測定デバイスと LiTaO<sub>3</sub> 等の電気光学結晶基板上に形成されたストリップラインをハイブリッドに結合した構造が多く用いられた<sup>6)</sup>。また、GaAs 基板は立方晶であるが、それ自体が電気光学結晶であるため、基板上に配線されたストリッ

プライン近傍に誘起されるフリンジ電界を直接サンプリングすることができる。通常、GaAs IC 用基板は (1 0 0) 面が用いられるため、プローブパルスは (1 0 0) 軸に沿った電界のみを感じ取る (b) または (c) の透過または反射縦型構造がとられる。(c) の構造では基板中における相互作用時間が数 ps であるが、(b) のコプレーナストリップラインでは、相互作用時間をプローブパルス幅程度まで引き下げることが可能である。また、Si のように電気光学効果を有しない場合には、(d), (e), (f) に示すように、電気光学結晶をストリップラインに近接させて、フリンジ電界をピックアップする方法が用いられる。この場合、EO プローブに結合する電界はきわめて小さいため、(a) ~ (c) の形状に比べ、1 桁以上測定感度は劣化する。

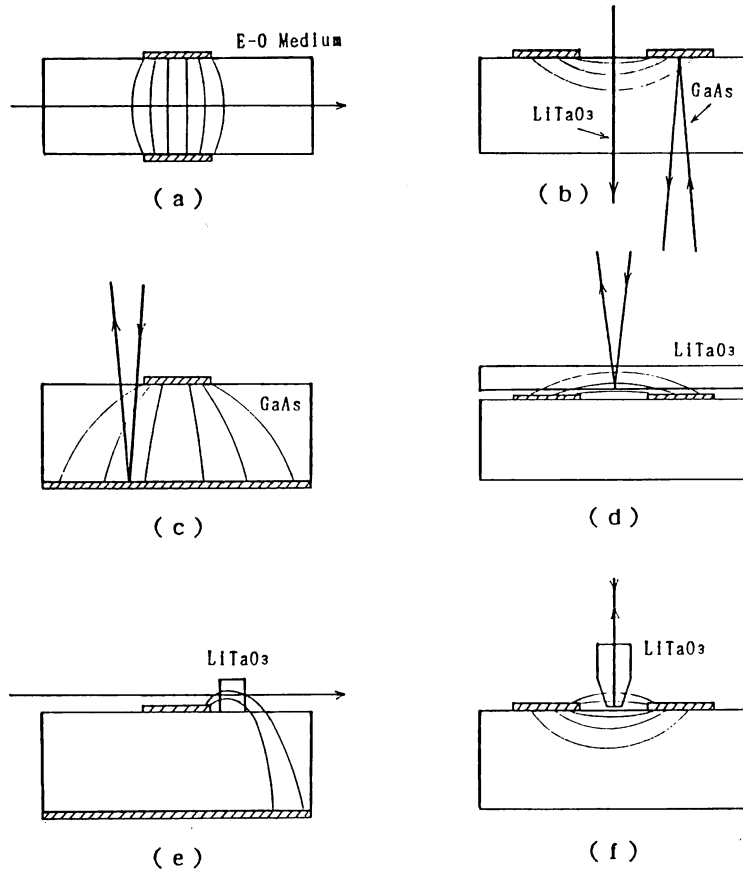


図 2 電気光学サンプリングヘッド  
 (a)<sup>3,6,7</sup>, (b)<sup>4,8,11</sup>, (c)<sup>4,5</sup>, (d)<sup>13,14</sup>, (e)<sup>3</sup>, (f)<sup>5,9</sup>

2.2 検出限界

電気光学結晶中における信号電界とプローブパルスの相互作用時間がシステムの時間分解能を決定し、その相互作用量と検出器の雑音特性が感度（最小検出可能電圧  $V_{min}$ ）を与える。

相互作用時間を支配するおもな要因としては、(1)パルス幅、(2)光パルスの結晶内（電界領域）通過時間 (optical transit time)、(3)電界の光ビーム径通過時間 (electrical transit time)、(4)光パルスのタイミングジッター等が考えられる<sup>4)</sup>。衝突パルスモード同期 (CPM) 色素レーザーなどのフェムト秒レーザーを光源に用いる場合、時間分解能は(2)の要因に支配される。一方、半導体レーザーを EO サンプリング用光源として用いる場合、これまで実用的なレーザーでは、パルス幅は 10~20 ps が限度であり、時間分解能向上のためには、短パルス化が大きな課題であった。色素レーザーや YAG レーザーの光パルスのタイミングジッターは 2~10 ps 程あるため、外部クロックとレーザーの繰返しを

同期させる場合にはジッター制御が重要な課題となる。半導体レーザーのタイミングジッターは、1 ps 程度であり<sup>16)</sup>、現在のところほとんど問題にならない。

一方、相互作用により生じたきわめて微弱な信号を、さまざまな雑音の中から高感度に検出するには、前述したようにビデオ検波方式が用いられる。この際、信号の変調周波数はレーザーの  $1/f$  雑音を避けて設定される必要があるが、それ以外の雑音として、フォトダイオードの光電流によって生じるショット雑音や負荷抵抗で発生する熱雑音などが存在する。これらは周波数依存性をもたない白色雑音であるため、ロックイン検波の帯域  $B$  を減らせば比例して雑音電力を削減できる。システムがショット雑音リミットである場合、信号の変調度を 1 とすると、最小検出可能電圧  $V_{min}$  (雑音電力と信号電力が等しいときの信号電圧) は、 $V_{min} = (4/\pi) V_r (qB/i_{avg})^{1/2}$  で与えられる<sup>4)</sup>。ここで、 $V_r$  は電気光学結晶の半波長電圧であり、電界分布、結晶軸方向、光の伝播方向に応じて決定される。 $q$  は電子電荷、 $i_{avg}$  はフォトダイオー

ドによる平均光電流である。例として、図 2 の (c) の場合、 $V_r = 4.4 \text{ kV}$  ( $\lambda = 1.06 \text{ }\mu\text{m}$ )、 $i_{\text{avg}} = 10 \text{ mA}$ 、 $B = 1 \text{ Hz}$  とすると、 $V_{\text{min}} = 22 \text{ }\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$  となる<sup>4)</sup>。

### 3. フェムト秒レーザー光源システム

超短光パルス発生は EO サンプリングシステムの最も重要な要素技術の一つである。この分野に関する近年の進歩は著しく、とくにリング共振器型受動モード同期 CW 色素レーザーのパルスをさらに圧縮して 6 fs パルスが報告されている<sup>17)</sup>。市販の CPM 色素レーザーシステムでも 100~500 fs のパルスが比較的再現性良く得られている。しかし、これらフェムト秒レーザーの中心波長は 586~636 nm の可視領域に限られるため、900 nm 以上に吸収端をもつ GaAs や InP デバイスの直接サンプリングに用いることは不可能になる。そのため、初期における EO サンプリングの研究では、電気光学結晶として LiNbO<sub>3</sub> や LiTaO<sub>3</sub> が用いられた<sup>3)</sup>。

Valdmanis らは 120 fs、繰返し 100 MHz の CPM 色素レーザーを光源に用い、Cr: GaAs のフォトコンダクタの立上り時間 690 fs を測定した<sup>7)</sup>。その際、厚み 100  $\mu\text{m}$  の LiTaO<sub>3</sub> に図 1 (a) のようにストリップラインをのせ、17° の角度で入射することにより、信号と光の速度整合がとられている。これにより、時間分解能はサブピコ秒に突入し、その後、コプレーナ線路を用いることによりさらに向上した。コプレーナ線路は電極の幅および間隔を数十  $\mu\text{m}$  とすると遮断周波数は 1 THz 近くまで向上する。プローブパルスの入射角依存性が現われないほど基盤中における電界深さは十分に小さく、プローブパルスの電界領域通過時間を減少させることができる。

Mourou は 50  $\mu\text{m}$  ギャップのコプレーナ線路を用い、同じく Cr: GaAs スイッチの立上りを測定し、460 fs を得ている<sup>9)</sup>。また、トップデータとしては、図 2 (f) に示すような LiTaO<sub>3</sub> のプローブチップをコプレーナ線路の上から近づけ、そこに誘起した電界をサンプリングする方法により、Cr: GaAs スイッチの 290 fs という驚くべき高速な立上り時間が測定されている<sup>9)</sup>。ここで用いられているレーザーも CPM 色素レーザー (100 fs、繰返し 100 MHz、平均パワー 30 mW) である。測定結果を図 3 に示す。この方法の利点は、被測定デバイスと電気光学結晶をハイブリッドに結合する必要がなく、2次元配線のデバイスであれば、GaAs でも Si でも任意の位置で測定が可能なことである。このとき、近接したプローブチップの存在がストリップ線路に擾乱と

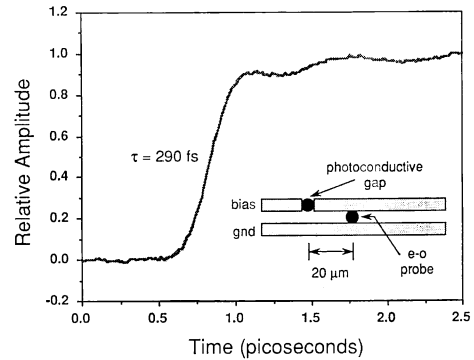


図 3 外部電気光学プローブチップによる GaAs 光伝導体の 290 fs 立上り時間測定結果<sup>9)</sup>

して作用する心配もあるが、その影響は通常無視できる程度であることが電界シミュレーションによって保証されている<sup>5)</sup>。

一方、GaAs それ自身が電気光学結晶であることを利用して、直接サンプリングを行なう場合には、光源としてモード同期 Nd: YAG レーザー (1.06  $\mu\text{m}$ 、繰返し 82 MHz) の 90 ps の光パルスをファイバと回折格子による光パルス圧縮により 1.5 ps として用いている。また、もう一つの問題点であった光パルスのタイミングジッターは PLL (phase-lock-loop) フィードバックシステムを採用することにより 4 ps から 300 fs に低減されている。これにより、時間分解能 2 ps 以下、感度  $70 \text{ }\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、空間分解能 3  $\mu\text{m}$  の GaAs-IC テスタを実現している<sup>5)</sup>。

### 4. 半導体レーザー光源システム

上記のように色素レーザーおよび YAG レーザーを光源に用いたシステムは高速性に関しては理想に近いが、これらのレーザーは、装置が大きく、高価なうえに出力の長時間安定度に難点があり、また繰返し周波数が固定されるなど、問題も多く、汎用なシステムとは言いにくい。半導体レーザーはこれらのレーザーと比べ、出力・パルス幅の面でかなり劣るが、小型、安価、高繰返し、低ジッターなど多くの長所をもっている。とくに、短い電気パルス駆動により、レーザー発振の過渡応答として生じる緩和振動の最初のパルスだけを取り出して短パルスを発生させる利得スイッチパルスを用いると、発生が簡便である上、繰返し周波数を自由に変えることができ、外部回路と同期がとれるので測定対象の適用範囲が広がる。

半導体レーザーのタイミングジッターの測定には、

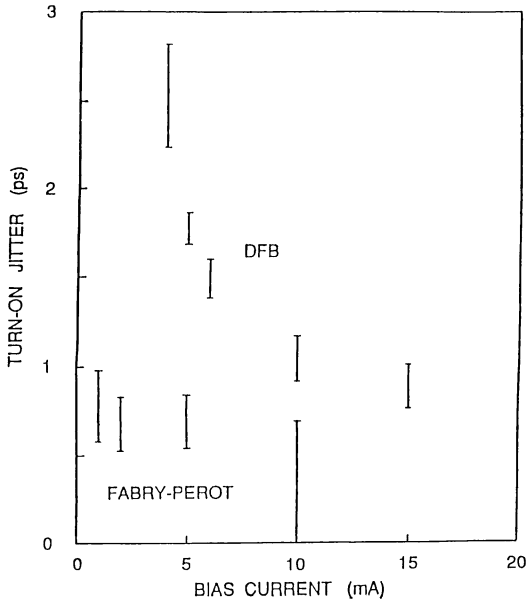


図4 半導体レーザー利得スイッチングパルスのタイミングジッター測定結果(高橋, 未発表)

光パルスを高速フォトダイオードで電気パルスに変換した後、パワースペクトラムアナライザで測定する方法<sup>4,16,18)</sup>や一定の点のサンプリングデータの標準偏差から求める方法<sup>19)</sup>などがある。Taylor は前者の方法により、InGaAsP半導体レーザーのモード同期および利得スイッチングパルスのタイミングジッターを測定し、その値は1ps以下でありレーザーを駆動するドライバーのジッターで決まると報告している。われわれは後者の方法により、DFBおよびFP(1.3 $\mu$ m, 閾値14~15mA)の利得スイッチングパルスについて測定を行なった。その結果を図4に示す。DFBレーザーのほうはDCバイアスの減少に伴い、ジッターの増加が観測されるが、通常の動作状態では両者とも1ps以下であった。よって、現状ではタイミングジッターや光のトランジットタイムなどが時間分解能に与える影響はほとんど無く、パルス幅によって制限される。

測定対象が非常に高速な電気パルスの場合には、前述したように、機械的遅延装置により、信号と光パルスのタイミングをずらしながら波形を測定する方法がとられる。この方法は、信号にかけた強度変調周波数での狭帯域検波が可能のため、高感度に測定できる。しかし、測定時間に数分~十数分かかる上、測定の時間幅が遅延装置の移動距離により制限されてしまう。

半導体レーザーはジッターや1/f雑音が少ないため、システムの多様化が可能になる。図5に差周波のビ

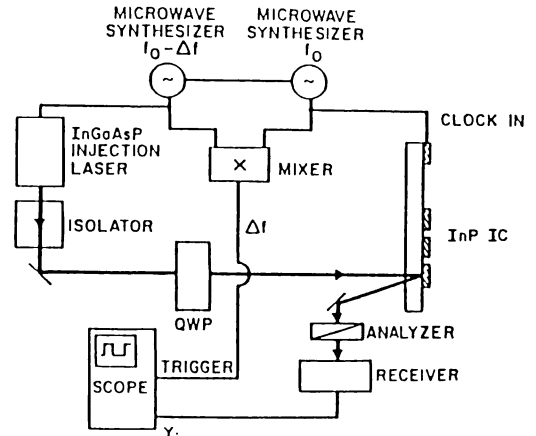


図5 ビート方式による測定システム<sup>11)</sup>

ート信号による測定システムを示す<sup>11)</sup>。テストデバイスのクロック周波数をレーザーの繰返し周波数より少し大きく設定すると、プローブパルスは電気信号に対し、位相を変えながらサンプリングする。その結果、電気信号はそのビート信号により繰り返し掃引され、オシロスコープにより実時間測定が可能になる。よって、機械的遅延装置を必要とせず、被測定信号に強度変調をかける必要がないためシステムは非常に簡便になる。図6はこの方法により測定されたInGaAs/InP MISFETインバータの測定結果である<sup>11)</sup>。半値全幅43psのコムジェネレータの電気パルスを入力(上)し、初段(中央)および次段インバータ(下)までの伝播がそれぞれ15psおよび30psと測定されている。そのほかにも、フリップフロップの内部動作の測定なども報告されており<sup>12)</sup>、半導体レーザー光源ICテスターの実用性はかなり高まりつつある。

ただし、この方法ではビート周波数をレーザーの1/f雑音を避けて設定する必要があるため、ビート信号のも

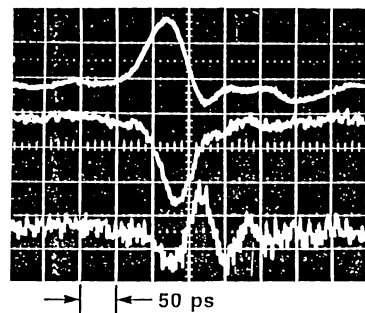


図6 インバータ動作測定結果<sup>11)</sup>

上:入力電気パルス, 中央:初段FETの出力波形, 下:次段FETの出力波形

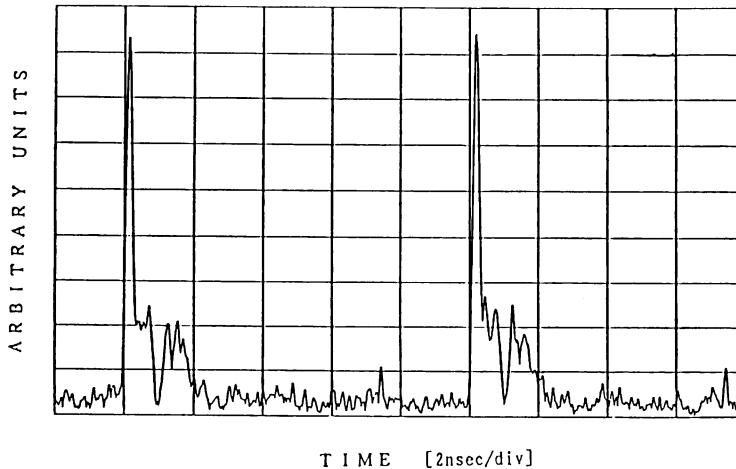


図 7 pin フォトダイオードの応答波形測定結果 (高橋, 未発表)

つ帯域はかなり広くなり, その検波帯域に比例して雑音パワーは増大するので感度はかなり劣化する.

そこで, ビデオ検波方式とビート方式の利点を兼ね備えた方法が考えられた<sup>13)</sup>. すなわち, ビート方式と同様に被測定信号とレーザーの繰返し周波数の間に差周波  $\Delta f$  を与え, かつ被測定信号に強度変調  $f_m$  をかける. 被測定信号に強度変調をかけることにより, 検波帯域は  $f_m$  だけ移動する. よって, レーザーの  $1/f$  雑音を選り抜いて  $f_m$  を選んでやると, 差周波数  $\Delta f$  は可能な限り小さくすることができる. このとき, 変調周波数  $f_m$  の側波帯に並ぶ  $\Delta f$  の高調波成分をすべて検出することにより, 信号波形は差周波数  $\Delta f$  で繰り返し掃引され,  $\Delta f$  の減少に伴い感度は向上する. われわれは半導体レーザーを用いてこの系を実現した.

図 7 はこの方法により測定した, 高速 pin フォトダイオードの応答波形である. 繰返し 100 MHz の二つの半導体レーザー (InGaAsP  $1.3 \mu\text{m}$ ) に 1 Hz の差周波を与え, 並列にパルス発振させる. 一方の光パルスは機械的チョッパーにより 2 kHz の変調を受け, 高速の pin フォトダイオードを励起し, その応答パルスは GaAs ストリップライン上に導かれ, 他方のレーザーパルスによってサンプリングされる. 検出にはスペクトラムアナライザを用い, 中心周波数 2 kHz, 分解能帯域幅 300 Hz に設定して測定した. ビート方式では全く判別できなかった内部構造が若干識別できるようになった.

## 5. まとめおよび今後の方向

電気光学サンプリング法は, 従来の電氣的サンプリング法に対して, 高速性において優れているだけでなく, 非接触, 無擾乱に任意のノードにおいて高い空間分解能

で測定できるという IC テスターとしては理想的な利点をもっている. とりわけ, モード同期 CPM 色素レーザーによる超短パルス発生技術の進歩は著しく, これを光源に用いたシステムでは 300 fs 以下の時間分解能を示すに至っている. また, インバータ, フリップフロップを始めとする集積回路<sup>5,13)</sup>や共鳴トンネルダイオードのスイッチ時間の測定<sup>14,15)</sup>などに応用されている. しかし, 実用性, 汎用性の高い電気光学サンプリング測定装置として社会に普及するには, これらのレーザーにはまだまだ問題点が多く, 光源の半導体レーザー化が要請される.

近年, 半導体レーザーの短パルス化の進歩も著しく<sup>20)</sup>, とくに分散シフト単一モードファイバによる光パルス圧縮<sup>21)</sup>では 10 ps 以下が容易に得られるようになってきた. また, 最近のパーソナルコンピュータに代表される一連の低価格で小型, 高性能の汎用コンピュータの登場によって, 信号回復手法<sup>22)</sup>が測定現場に投入され始めている. これは, 測定されたデータから, 物理的理由 (この場合, 光パルス幅) により必然的に決まる測定・検出の限界 (時間分解能) を越える信号を回復するための方法<sup>23)</sup>である. これらの要素技術が成熟したあかつきには遠からず, デスクトップ型の半導体レーザー光源電気光学サンプリング測定装置が普及するであろう.

## 文 献

- 1) P. R. Smith, D. H. Auston and W. M. Augustyniak: "Measurement of GaAs field-effect transistor electronic impulse response by picosecond optical electronics," *Appl. Phys. Lett.*, **39** (1981) 739.
- 2) 張 吉夫: "光サンプリング", レーザー研究, **15** (1987) 81-89.
- 3) C. H. Lee: "Picosecond Optoelectronic Devices," Chap.

- 8 (1984).
- 4) B. H. Kolner and D. M. Bloom: "Electrooptic sampling in GaAs integrated circuits," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-22** (1986) 79-93.
  - 5) K. J. Weingaten, M. J. W. Rodwell and D. M. Bloom: "Picosecond optical sampling of GaAs integrated circuits," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-24** (1988) 198-220.
  - 6) J. A. Valdmanis, G. A. Mourou and C. W. Gavel: "Picosecond electro-optic sampling system," *Appl. Phys. Lett.*, **41** (1982) 211-212.
  - 7) J. A. Valdmanis, G. A. Mourou and C. W. Gavel: "Subpicosecond electrical sampling," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-19** (1983) 664-667.
  - 8) G. A. Mourou and K. E. Meyer: "Subpicosecond electro-optic sampling using coplanar strip transmission lines," *Appl. Phys. Lett.*, **45** (1984) 492-494.
  - 9) J. A. Valdmanis: "1THz-bandwidth probe for high-speed devices and integrated circuits," *Electron. Lett.*, **23** (1987) 1308-1310.
  - 10) R. S. Tucker, A. J. Taylor, C. A. Burrus, G. Eisenstein and J. M. Wiesenfeld: "Coaxially mounted 67 GHz bandwidth InGaAs pin photodiode," *Electron. Lett.*, **22** (1986) 917-918.
  - 11) J. M. Wiesenfeld, R. S. Tucker, A. Aantreasyan, C. A. Burrus, A. J. Taylor, V. D. Motta and P. A. Garbinski: "Electro-optic sampling measurements of high-speed InP integrated circuits," *Appl. Phys. Lett.*, **50** (1987) 1310-1312.
  - 12) M. S. Heutmaker, T. B. Cook, B. Bosacchi, J. A. Wiesenfeld and R. S. Tucker: "Electrooptic sampling of a packaged high-speed GaAs integrated circuit," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-24** (1988) 226-233.
  - 13) X. C. Zhang and R. K. Jain: "Analysis of high speed ICs with electro-optic probes," *Proc. SPIE*, **795** (1987) 317-338.
  - 14) A. Tackeuchi, T. Inata, S. Muto and E. Miyauchi: "Picosecond characterization of InGaAs/InAlAs resonant tunneling barrier diode by electro-optic sampling," *Ultrafast Phenomena VI* (Springer-Verlag, Berlin, 1988) pp. 182-184.
  - 15) J. F. Whitaker, T. B. Norris, T. C. L. G. Sollner, W. D. Goodhue, X. J. Song and L. F. Eastman: "Tunneling-time measurements of a resonant tunneling diode," *Ultrafast Phenomena VI* (Springer-Verlag, Berlin, 1988) pp. 185-188.
  - 16) A. J. Taylor, J. M. Wiesenfeld, G. Eisenstein and R. S. Tucker: "Timing jitter in mode-locked and gain-switched InGaAsP injection lasers," *Appl. Phys. Lett.*, **49** (1986) 681-683.
  - 17) C. H. Brito-Cruz, R. L. Fork and C. V. Shank: "Compression of optical pulses to 6 fs using cubic phase distortion compensation," *Tech. Dig. CLEO '87* (1987) pp. 12-13.
  - 18) C. J. Clark, E. A. Chuchard, K. J. Webb, K. A. Zaki, C. H. Lee, P. Polak-Dingles, H. L. A. Hung and H. O. Huang: "Investigation of a new optoelectronic cw microwave source," *J. Lightwave Technol.*, **LT-5** (1987) 388-397.
  - 19) P. Spano, A. D'Ottavi, A. Mecozzi and B. Daino: "Experimental observation of time jitter in semiconductor laser turn-on," *Appl. Phys. Lett.*, **52** (1988) 2203-2204.
  - 20) H. F. Liu, M. Fukazawa, Y. Kawai and T. Kamiya: "Gain-switched picosecond pulse (<10 ps) generation from 1.3  $\mu\text{m}$  InGaAsP laser diodes," *Conf. Dig. 11th Int. Conf. on Semiconductor Lasers* (1988) pp. 94-95.
  - 21) A. Takada, T. Sugie and M. Saruwatari: "High-speed picosecond optical pulse compression from gain-switched 1.3  $\mu\text{m}$  distributed feedback laser diode (DFB-LD) through highly dispersive single-mode fiber," *J. Lightwave Technol.*, **LT-5** (1987) 1525-1533.
  - 22) 河田 聡: "物理計測における最近の信号回復論", *応用物理*, **55** (1986) 2-23.
  - 23) T. Kamiya, R. Takahashi, H. Kamiyama, H. F. Liu and I. Tanaka: "A new scheme of resolution improved electrooptic sampling," *Ultrafast Phenomena VI* (Springer-Verlag, Berlin, 1988) pp. 192-194.
  - 24) J. M. Wiesenfeld, G. Eisenstein, R. S. Tucker and G. Raybon: "Distortionless amplification of picosecond pulsed by a traveling-wave InGaAsP optical amplifier," *CLEO '88* (1988) p. 408.