特集

光 サン プ リ ン グ

張 吉 夫*

(1987年11月21日 受理)

Optical Sampling

Yoshio CHO*

(Received November 21, 1987)

In spite of recent advance in high-speed electronics reaching pico-second time regime, instrumentation means for their evaluations and testings are lacking. Pure electrical means is pointed out to have an inevitable limitation on its speed. Optical means can provide very short light pulses, which might be utilized to overcome the limitation in pure electrical means. Optical sampling technique is based upon recent availability of this very short optical pulse. Various optical sampling techniques are reviewed on the general common concept of sampling technique and advantages of optical sampling are stressed.

Key Words: Sampling, Optical, Ultrafast, Electro-optic, Photoconductive

1. はじめに

超高速現象の解明が進むのに平行して、エレクトロニクスで扱われる信号も、最近では、非常に高速なものとなり、これを観測する手段が追いつかないと云うのが、超高速の科学、技術の現状である。その最も端的な例が最近の超高速電子デバイスの急速な発展に見られる。例えば、最近のGaAs-MESFET (Metal-Semiconductor FET) のカットオフ周波数は 100 GHz に迫っている。また、いわゆる HEMT (High Electron Mobility Transistor) 構造を持つMESFETの1ゲートあたりの伝搬遅延は、10ps (ピコ秒) 台と云われている。これは、

バンド幅に直して 100 GHz である。ところが、現在、我々は、このように高速な、従って、広帯域なエレクトロニクスに対応できる観測手段を持っていない。一方、光の世界では、既に、ピコ秒よりも3桁下の時間単位、フェムト秒のパルス幅の超短光パルスが実現されている。そこで、この超短光パルスを、主として、電気信号波形のサンプリング・パルスに使用しようと云うのが光サンプリングである。

2. サンプリング技術

高速な現象なり、その波形を観測しようとする場合、もし、それが繰り返し現象であれば、サンプリング技術が使えらる。サンプリングの考

* 大阪大学産業科学研究所 (〒567 茨木市美穂ヶ丘8-1)

* Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University (8-1 Mihogaoka, Ibaragi-shi, Osaka 567)

え方の基本は、繰り返し波形の同一箇所を繰り返し抜き取れば、その箇所の波高値に変動はないから、直流分として扱え、したがって、通常の低周波領域の観測手段が使えるということである。(低周波域に変換することによる、帯域の狭帯域化や、平均操作の適用によって、感度の改善も期待できる。)もちろん、このサンプリング箇所を順次ずらしてゆけば、波形をゆっくりと再現できる。ただし、もとの波形が忠実に再現できるためには、波形を抜き取る際の抜き取りのゲート時間が、観測波形の変化に対して十分短くなければならない。すなわち、サンプリングの時間分解能を決定するものは、サンプリングのゲート時間である。

サンプリングということ、要素的なステップ(物理量なり、デバイス、媒体、効果などを含む)に分解して考えてみると、一応、Fig.1のように表される。通常、高速現象の観測は、電気的な量(電圧、電流、電荷など)に変換しておこなわれるから、そのステップが①、②に示してある。サンプリングシステムは、④以降のステップに対応する。サンプリング動作の最も重要な部分は、④、⑤、⑥のステップである。特に、④、⑤は、サンプリングのゲート動作に関するステップで、この部分に含まれる時定数、ゲート時間 t_g または、ゲートパルス幅 t_p の何れか大きい方の時定数で、サンプリングの分解時

間 τ_s が決定される。

一般に広く使われているサンプリングオシロスコープでは、④、⑤、⑥の部分は高速スイッチング素子(ステップリカバリーダイオード)と短い伝送線路(兼キャパシター)で、ほぼ一体に構成たれていて、すべてが電氣的に処理されている¹⁾。ところが電気回路においては、電荷の移動を伴うため、素子中での電荷の移動速度と回路の時定数がスイッチングのスピードを決めてしまい、現在の技術では、最も高速なスイッチング素子をもってしても、20~30psというのが限度である。このことが、現在のサンプリングオシロスコープのスピードを、立ち上がり時間25ps程度(たとえば、テクトロニクスのサンプリングヘッボS-4)にとどめている。

光サンプリングは、④、⑤、⑥の部分を、一部か、または、全部、光に置き換えてしまおうとするものである。特に、⑤のゲート信号を光に置き換えれば、先にも云ったように、そのパルス幅 t_p は、電気パルスで得られるものよりも桁違いに短いから、④のゲートに、光でゲート可能で、そのゲート時間 t_g が十分高速である(すなわち、 $t_g \sim t_p$ を満足するような)物理的效果なり、ゲートデバイスが使えれば、サンプリングの分解時間 τ_s は、従来の電氣的サンプリングによるものより飛躍的に短縮できるはずである。

3. 高速サンプリング技術の発展

先にもふれたように、一般に、エレクトロニクスで扱われる電気信号のスピードが急速に上がってきている一方で、これを測定する最も直接的な手段であるサンプリングオシロスコープの時間分解能には、この20年間、進歩が見られなかった。このアンバランスを解消しようという目的と、一方で、また、最近では特に、LSI技術の急速な発展に伴って、高密度に集積化されたLSIなどの高効率でダイナミックなテスターが要求されることから、非接触性、無擾乱性、あるいは、高い空間分解能などが同時に満足されるようなサンプリング技術が求められており、これまでに、種々の手段が提案され、また実

Fig.1 Elementary steps of sampling process.

Table I 種々のサンプリング技術

サンプリング技術	ゲート信号⑤— 収集データ信号⑥ の媒体	ゲート動作に 用いられる 材料/デバイス④	サンプリングに 用いられる 現象/効果④⑥	摘 要
サンプリング オシロスコープ	電気—電気	ステップリカバリー ダイオード キャパシター	電荷の充放電	従来技術
電子ビーム (EB) サンプリング	電子ビーム— 電子ビーム	半導体, 金属	二次電子放出	SEMの応用 LSIダイナミックテスター
ジョセフソン接合 (JJ) サンプリング	電気—電気	ジョセフソン接合	電荷の充放電	サンプリングオシロスコープ の高速化 極低温必要
光伝導 (PC) サンプリング	光—電気	光伝導スイッチ	光伝導	サンプリングオシロスコープ の高速化
電気光学 (EO) サンプリング	光—光	電気光学結晶	電気光学効果	GaAs-ICダイナミック テスターに適用可
光電子放出 (PE) サンプリング	光—電子	半導体, 金属	光電子放出	EBサンプリングの高速化 真空必要
電荷—光 (CO) プロービング*	光—光	半導体	半導体屈折率の 電荷密度依存性	Si-ICにも適用可
光オシロスコープ	光—電子ビーム	スリット	偏向電子ビーム	光波形の観測

*実時間モードで使われている。

際に開発されてきた。光サンプリングをこれらの種々の新しいサンプリング技術と比較し、光サンプリングの位置を知るために、それらのサンプリング技術をTable Iにまとめて示していた。

Table I中の番号は、Fig.1中の関連するサンプリングプロセスのステップの番号を示している。ここに示した種々のサンプリング技術のうち、サンプリングオシロスコープとEBサンプリング²⁾、JJサンプリング³⁾ならびに光オシロスコープサンプリング²³⁾以外は、すべて、光をゲート信号の媒体としている。光をゲート信号の媒体とするものは、すべて、広い意味で光サンプリングであるが、ゲート信号と収集データ信号の両方に光を用いるEOサンプリングを指して、特に、光サンプリングと呼ぶ場合もあるようである。以下に、光サンプリングを個々の技術について説明する。(光オシロスコープサンプリングは、特に高速光波形観測のためのサンプリング技術であり、本特集号にも別稿で扱われている²³⁾ので参照されたい。)

4. 光伝導 (PC) サンプリング

Fig.2 Configuration of photoconductive sampler⁵⁾.

広い意味での光サンプリングは、最初、サンプリングオシロスコープのスイッチングダイオードの働きを光パルスで制御される高速光伝導(PC)スイッチに置き換えることではじまった⁴⁾。この段階では、光サンプリングとは云っても、光パルスは単に、Fig.1のチャートのゲート信号⑤の媒体に使われているに過ぎない。④のゲートデバイスそのものは、PCスイッチで、光でゲート可能であるが、電気スイッチであり、基本的には従来の電氣的サンプリングオシロスコープと何等変わるところはない。Fig.2に、Austonらが、最初に、光伝導サンプリングで高

(a) PC Sampled

(b) Sampling Oscilloscope

Fig. 3 Comparison of PC- and conventional oscilloscope traces⁴⁾.

速pinフォトダイオードのレスポンスを観測した実験⁵⁾の配置を示す。この実験では、ローダミン6 Gのモード同期色素レーザーからの $t_p = 4$ psの光パルス列が使われた。光パルスを二分して、一方でpinフォトダイオードを照射し、他方で光伝導スイッチを照射する。両パルスは適当な可変の相互遅延を与えられるようになっている。フォトダイオードと光伝導スイッチがサイドから接続されている中央のストリップラインは両端が整合終端されていて、反射による波形の乱れを防いでいる。光伝導スイッチ素子はプロトン照射されたバルクGaAs結晶であり、そのゲート時間 t_g は別に行われた実験で12 psと測定された。光パルスで誘起されたフォトダイオードの応答波形は、ストリップライン上を進行し、適当な遅延の後、光伝導スイッチで同期サンプルされる。遅延を掃引すれば、原波形に対応するFig. 3 (a)⁴⁾のごときサンプリング波形が得られる。Fig. 3 (b)⁴⁾は、同じ波形を立ち上がり25 psのサンプリングオシロスコープで観測したものである。これら二つのトレースを比較すれば、光サンプリングによる時間分解能の改善は明かである。

PCサンプリングでは、上の例からも明らかに、一般に、 $t_g > t_p$ の関係にあり、分解時間 τ_s は t_g で決められてしまうために、超短光パルスの持つ真の超高速性は生かされていない。

しかし、超短光パルスさえ入手可能であれば、通常の電氣的サンプリングオシロスコープをそのまま高速化できると言う点で利用しやすい光サンプリング技術である。

PCスイッチ素子は、GaAs以外、InPでも試みられており、そのゲート時間について最近では、3 ps程度のものまで報告されている⁶⁾。

5. 電気光学 (EO) サンプリング

光伝導 (PC) サンプリングでは、 $t_g > t_p$ となり、超短光パルスの持つ真の高速性が十分に生かされなかった。Fig. 1の「④ゲートに用いられる効果」として、電気光学効果を使えば、電気光学効果に固有な t_g は、その機構から云って、一般に、 $t_g < t_p$ を満足すると考えられるから、超短光パルスの高速性をより一層生かすことができるはずである^{4,7)}。実際問題としては、ゲートデバイス (Fig. 1の④)である電気光学結晶にかかる電圧波形と、これを通過するゲート光パルス (同、⑤) との間の重なり時間が有限であるために t_g が生ずる。この t_g は、電圧波形とゲート光パルスの進行方向を互いに直交させる¹⁰⁾か、または、進行波型にして速度整合をとる^{8,9)}かすれば、ps台にもってくることが可能である。

実際の構成の一例^{8,9)}をFig. 4に示す。EOサンプリングの原理は、電気光学結晶を用いた光

Fig.4 Arrangement of EO sampling system^{8,9)} Fig.5 An example of EO-sampled trace⁸⁾.

の変調器そのものである。電気光学結晶をはさんでストリップラインが設けられている。ストリップライン上を伝搬する電圧波形は、電気光学結晶内に複屈折性を誘起するから、通常の光強度変調器構成において、変調特性の直線部分で使うようにバイアスし、電気光学結晶に光パルスを通せば、光パルスは結晶通過の瞬間のストリップライン上の電圧に比例した強度変調を受ける。すなわち、光パルスが電圧波形をサンプルしたことになる。測定すべき電圧波形と光

パルスを同期して、繰り返し電気光学結晶に通し、相互の遅延をゆっくりと変化すれば、もとの電圧波形に対応するサンプル波形が得られる。この例では、サンプルすべき電気信号として、衝突パルスモード同期 (CPM) 色素レーザーからの光パルス (120 fs, 繰り返し 100 MHz) を Cr ドープ GaAs の光伝導型の光検出器に照射し、その検出パルス電流を用いている。電気光学結晶には、ニオブ酸リチウム LiNbO_3 を使い、電気パルスとゲート光パルスを 18 度という角度で交叉させて速度整合をとった場合、 t_g は 3.6 ps と計算される⁸⁾。実際、得られたサンプリング波形を Fig.5 に示すが、10—90% の立ち上がりで、4.8 ps が得られている。最近のデータでは、分解時間 1 ps 以下が得られている^{7,11)}。

EO サンプリングの感度は、ゲートデバイスとして用いる電気光学変調器の変調感度とサンプル光パルスの平均レベルを検出する検出器のショットノイズ (検出の帯域 Δf に比例) で決まる。ショットノイズ電流に等しい信号検出電流を得るに要する変調電圧を最小検出可能電圧 V_m と定義すれば、 $V_m = (4/\pi) V_{1/2} (2q \cdot \Delta f / I_0)^{1/2}$

Fig.6 Two different arrangements of illumination of probe beams of EO GaAs-IC sampler.

と表される¹⁰⁾。ここに、 $V_{1/2}$ は変調器の半波長電圧、 q は電子電荷、 I_0 はゼロ信号時の検出電流である。電気光学結晶にタンタル酸リチウム LiTaO_3 を用い、ストリップラインと光パルスとを直交配置したときの $V_{1/2}$ を 2200V 、 I_0 を 10mA すると、 $V_m = 11 \times \sqrt{\Delta f} [\text{Hz}] \mu\text{V}$ となる。帯域 Δf は、少なくとも、サンプリングの繰り返し周波数は必要である。

EOサンプリングは、このように、高速で、かつ高感度であるだけでなく、データ収集の媒体 (Fig.1の⑥) が光プローブであることから、プロービングによって被測定波形が乱されることがなく (無擾乱)、かつプローブライン上での整合が不必要になるなど、通常の電氣的サンプリングによる高速波形測定で遭遇する困難性を解決できるという点でも利点を有している。

最近、EOサンプラーがEO波形アナライザという名称で製品化されている¹²⁾。分解時間は、カタログ上 4ps となっている。

6. GaAs-ICの直接EOサンプリング

最近のGaAs半導体デバイスの高速化への発展には著しいものがあり、それはマイクロ波、ミリ波での個別素子への応用から、ファイバー光通信、ギガビットレートでのデータ伝送、超高速コンピュータ用の各種の論理素子、メモリー、また、それらの高密度集積回路、等々に利用されようとしている。しかし、現在、このように高速で高集積化されたGaAs-ICを高速に、しかも効率よくテストするテスターは存在しない。

ところが、GaAs-ICのGaAs基板は、それ自体、電気光学結晶である。したがって、GaAs基板上の配線で構成されたGaAs-ICそのものが、至るところ、先に述べたEOサンプリングのゲートデバイス (Fig.1の④) を構成していると見ることができる。そこで、ゲート信号 (Fig.1の⑤) たるパルスレーザー光を、Fig.6に示すような配置で、配線近傍のGaAs基板に集光し、その反射光を収集データ信号 (Fig.1の⑥) とすれば、配線を伝搬する電圧波形をEOサンプリングの手法で直接読み出すことができる。EOサンプリングの高速性から考えて、通常の電氣的な方法では困難であったGaAs-ICのテスターが構成できることになる。しかも、EOサンプリングでは、レーザー光がプローブの役を果たしているの、非接触であり、しか

Fig.7 EO GaAs-IC sampler system¹⁵⁾

も、LSIなど的高密度に集積された配線にも対応できる高い空間分解能が実現できる。また、光の波長は当然GaAsの透明域に選ばれるから、基板中にキャリアを誘起することはなく、LSIを動作状態のまま（無擾乱に）、しかも、任意のノード点で読み出せる。このように、EOサンプリングは、電気的な方法では困難であった高速性を実現できるだけでなく、EOサンプリングでなければ実現できない多くの特徴をもたらす^{13,17)}。

GaAs-ICの直接EOサンプリングの構成の一例¹⁵⁾をFig.7に示す。GaAs結晶は、波長 $0.9\mu\text{m}$ 付近から透明であるから、サンプリングプローブ光には、波長 $1.06\mu\text{m}$ のモード同期YAGレーザーから繰り返し82MHz、パルス幅100psの光をパルス圧縮器で圧縮して2psのパルスとして使っている。プローブスポット径は μm である。テストICをレーザーの繰り返し周波数の正確なハーモニクス周波数からわずかにずらせた繰り返し周波数で動作させる。こうすると、IC配線上の電圧波形が、ずれの周波数で繰り返し掃引され、サンプリング波形が得られる。通常、GaAs-ICの基板には、GaAsの(100)面が使われるから、サンプリングに使われるGaAs結晶の電気光学テンソルは、 r_{33} 要素となり、サンプリングに使われる変調器構成は往復縦型となる。この時の最小検出可能電圧 V_m は $22 \times \sqrt{\Delta f}$ [Hz] μV と計算される¹³⁾が、この実験では、1Hzの繰り返し周波数のとき、1mV程度であった。このくい違いの原因としては、レーザーのタイミングジッタなどが挙げられている。

Fig. 8 EO Si-IC sampling pickup head⁸⁾.

Fig. 9 Configuration of PE sampling head.

一方、現在、IC、LSIなどは、ほとんど全て、Si基盤上に形成されている。ところが、Siは中心対称性の結晶構造を持つから、電気光学効果のような2次の光非線形性を持たない。したがって、現在、広く使われているSiのLSIにEOサンプリングを適用することができない。そこで、基板の結晶材料に依存しないEOサンプリングの方法が考案された¹⁸⁾。Fig.8に示すとき、電気光学結晶を先端に取り付けたプローブで、IC配線上の電圧波形に応じて、その上の空間に洩れている電界を非接触にピックアップしようとするものである。

7. 光電子放出 (PE) サンプリング

電気光学 (EO) サンプリングは高速性、無擾乱性において非常に優れた方法ではあるが、電気光学効果に頼っている点で、ICテスターなどに応用した場合、その適用範囲がGaAs基板などに限られるという欠点がある。その点、PEサンプリングは、線路上を伝搬する電圧を直接、光でプローブするものであり、その適用範囲は広い^{19,20)}。いわば、電子ビーム (EB) サンプリングの電子ビームを光に置き換えたようなものであり、それに応じて、データ収集信号 (Fig.1の⑥) も、EBにおける2次電子が光電子に置き換えられる。EBサンプリングとの違いは、EBに比べて、高速化が容易な点であろう。Fig.9にPEサンプリングの構成の一例¹⁹⁾を示す。もちろん、測定試料をも含めて、真空容器内に保つ必要がある。通倍cwモードロック

Nd:YAGレーザーからの波長532nmの出力をパルス圧縮によって繰り返し100MHz、パルス幅 $t_p=500$ fsのパルスとし、電圧波形が伝搬している伝送線上に集光する。平均出力が200mW程度で、伝送線表面からの多光子電子放出が、測定に十分な量で起こる。(伝送線の表面が例えば金である場合、3光子吸収で電子放出が可能となる。)引出しグリッドと伝送線表面との間の加速電界は伝送線上の電圧波形に応じて変化するので、放出光電子のエネルギー分布がシフトし、その結果、その後、減速グリッドを通過できる電子電流の大きさが変化する。電子電流の変化はマイクロチャンネルプレートMCPで増倍されて、アノード電流の変化として測られる。したがって、アノード電流が伝送線の電位と比例関係を保つよう各電極のバイアス電圧を調整すれば、伝送線上の電圧波形が光パルスでサンプルできたことになる。このサンプリングでゲートデバイス(Fig.1の④)となっているものは、上の一種の光電子エネルギーアナライザーであるが、そのゲート時間 t_g は、主に、伝送線表面と引出しグリッドの間のギャップ d の電子の走行時間で決まる。ギャップ長 $750\mu\text{m}$ 、その間の電界 5000V/mm のとき、 $t_g=40\text{ps}$ が得られた。ここでは、 $t_g>t_p$ であるから、PEサンプリングで、分解時間 τ_s を決定しているものは t_g であり、 $\tau_s=40\text{ps}$ 程度となる。ギャップ長を $50\mu\text{m}$ とすれば、 $\tau_s=10\text{ps}$ が期待できるとされている。感度は $40\text{mV}/(\text{Hz})^{1/2}$ 程度である¹⁹⁾。

8. 電荷-光(CO)プローブ

サンプリングではないが、Si-ICにも適用可能な実時間の光プローブが実験されている。これは、半導体の電荷密度の変化による屈折率の変化を光パルスプローブで非接触、無擾乱に読み出すものである^{21,22)}。この方法では、配線上の電位を測るのではなく、接合部の自由キャリアの密度を測ることになる。光源には、Siの透明域を考慮して、 $1.3\mu\text{m}$ 帯のcw動作半導体レーザー、または、YAGレーザーが用いられた。 0.9V の信号レベルを持つSiバイポーラIC内の

キャリア密度の変化を20ないし、100MHzのバンド幅で観測できたと云う。キャリア密度の変化を直接測定できるところに特長がある。これまでのところは、実時間モードで使われているが、サンプリングに適用することも可能であろう。

9. おわりに

以上、光サンプリング技術の現状を概観してきた。この技術は、現在、まだ発展段階にあり、評価、測定技術として確立されるまでには、まだ多くの問題点を残している。たとえば、現段階では、ps程度のパルス光源にしても、色素レーザーに頼らざるを得ず、高価で、かさだかく、しかも維持管理が容易でない。これを機器に組み込むことは不可能である。安定なピコ秒パルス発振のできる半導体レーザーの開発が待たれるところである。このように、実用化の見地からは未だ問題点が残されているとは云え、光サンプリング技術は、超短光パルスの持つ超高速性を、エレクトロニクスの分野に適用して、純電気的なエレクトロニクスでは実現できなかった高速性を実現し、同時に、高速性以外にも光の利用による多くの利点をもたらした点で、超高速光技術の他分野への応用の一つの際だった好例を与えたものと云える。このことから解るように、超高速光技術は、今後の高速エレクトロニクスには、欠かすことのできない部分として、それに取り込まれ、やがては、超高速光エレクトロニクスへと発展してゆくものと考えられる。その一つのゴールとして、例えば、光の混在したコンピュータなどが考えられるが、光サンプリングは、その意味で、将来の超高速光エレクトロニクスに対する一つの大きなきっかけを与えた技術と云えるだろう。

参 考 文 献

- 1) Tektronix, Sampling head S-4/S-6 Manual.
- 2) たとえば, Electronics, March 24, 1986, "Electron-beam testing of VLSI chips gets practical".
- 3) P. Wolf, in "Picosecond Electronics and Optoelectronics", New York, Springer Verlag, (1987).

- 4) C.H. Lee(ed.), "Picosecond Optoelectronic Devices", Academic Press, New York (1984).
- 5) D.H. Auston, P.R. Smith, Appl. Phys. Lett., **41** (1982) 599.
- 6) R.B. Hammond, N.G. Paulter, R.S. Wagner, Appl. Phys. Lett., **45** (1986) 289.
- 7) J.A. Valdmanis, G. Mourou, IEEE Jour. Quant. Electron. **QE-22** (1986) 69.
- 8) J.A. Valdmanis, G. Mourou, C.W. Gabel, Appl. Phys. Lett., **41** (1982) 21.
- 9) J.A. Valdmanis, G. Mourou, C.W. Gabel, IEEE Jour. Quant. Electron. **QE-19** (1983) 664.
- 10) B.H. Kolner, D.M. Bloom, P.S. Cross, Electron. Lett., **19** (1983) 57.
- 11) A.J. Taylor, J.M. Wiesenfeld, R.S. Tucker, J.R. Talman, U. Koren, Electron. Lett., **22** 325.
- 12) EG & G Princeton Applied Research M8300 Catalog.
- 13) B.H. Kolner, D.M. Bloom, IEEE Jour. Quant. Electron., **QE-22** (1986) 79.
- 14) J.L. Freeman, S.K. Diamond, H. Fong, D.M. Bloom, Appl. Phys. Lett., **47** (1985) 1083.
- 15) M.J.W. Rodwell, K.J. Weingarten, D.M. Bloom, Electron. Lett., **22** (1986) 499.
- 16) X.C. Zchang, R.K. Jain, Electron. Lett., **22** 264.
- 17) J.M.W. Rodwell, M. Riazat, K.J. Weingarten, B.A. Auld, D.M. Bloom, IEEE Trans. Microwave Theory and Technique, **MTT-34** (1986) 1356.
- 18) J.A. Valdmanis, S.S. Pei, in "Picosecond Electronics and Optoelectronics," New York, Springer Verlag (1987).
- 19) J. Bokor, A.M. Johnson, R.H. Storz, W.M. Simpson, Appl. Phys. Lett., **49** (1986) 226.
- 20) R.B. Marcus, A.W. Weiner, J.H. Abeles, P.D. Lin, Appl. Phys. Lett., **49** (1986) 357.
- 21) H.K. Heinrich, B.R. Hemenway, K.A. McGrody, D.M. Bloom, Electron. Lett., **22** (1986) 650.
- 22) H.K. Heinrich, D.M. Bloom, B.R. Hemenway, Appl. Phys. Lett., **48** (1986) 1066.
- 23) 土屋 裕, 本特集号 (1987).