

TR-O-0086

39

PAL-SLMの基本特性とその応用可能性

一井麻理子

Peter Davis

1995.12.15

ATR光電波通信研究所

PAL-SLMの基本特性とその応用可能性

同志社大学 工学研究科 電気工学専攻

一井 麻理子

ATR光電波通信研究所 通信デバイス研究室

P e t e r D a v i s

目次

1	はじめに	2
2	PAL-SLMの基本特性	3
2.1	PAL-SLMの構造と動作原理	3
2.2	実験系	3
2.3	PAL-SLMの基本特性	3
2.4	Open-Loop特性	5
3	Closed Loop特性	6
3.1	Closed-Loopにおける双安定動作	6
3.2	フリップフロップ動作	7
3.3	2次元カオスパターン	7
4	結論	9
4.1	まとめ	9
4.2	課題	9
	謝辞	9
	参考文献	9
	図表	10

1 はじめに

神経回路網の研究、特にその計算機シミュレーションにおいて計算量の爆発的増加は避けられない問題である。また電子回路、光・電子回路での模倣もなされているが、ニューロン数やインターコネクションの集積限界がある。これに対し、全光型回路はビームスポットを有効に使うことによりこれらの問題を解決できる可能性を持つ。

PAL-SLM（位相変調用空間光変調器）はパラレルアドレッシングが可能であることから全光型ニューラルネットワークの実現に有利である。本研究の最終的目的地はここにあるが、そのためには PAL-SLM の持つ変調特性について詳しい理解が必要とされる。また、一般的な問題であるインターコネクションの手法に関するさらなる研究も求められる。

本報告書では、まず PAL-SLM の構造および基礎特性に関する実験結果について述べる。次に 2 枚の PAL-SLM をレーザによるリング型共振器中に挿入し、open loop 特性および closed loop 特性について実験と計算機シミュレーションを行なった。ここでは光強度の双安定状態に加え、単一の外部トリガによるフリップフロップ動作が実現されている。最後に、全光型ニューラルネットワークへの応用に向けて、その課題を述べる。

2 PAL-SLM の基礎特性

2.1 PAL-SLM の構造と動作原理

まず本研究においてキーデバイスとなる PAL-SLM (Parallel Aligned nematic Liquid crystal Spatial Light Modulator、以下 PAL) について、その概要を述べる。

PAL は誘電体多層膜ミラーの両端に、平行に配向された液晶層とアモルファスシリコン (α -Si:H) 層を張り付けた構造を持ち、液晶層には読みだし光、 α -Si:H 層には書き込み光がそれぞれ与えられる。さらにその外側には透明電極が設けられ、一定の駆動電圧がかけられている。書き込み光強度が増加すると α -Si:H 層の電圧が下がるため、液晶層にかかる電圧は上がる。この時、液晶分子が回転することにより屈折率が変化し、読み出し光の位相が変調される。

ここで、読み出し光の偏光面が液晶分子の配向方向に対して 45° に設定されていれば、偏光板等を用いることにより強度変調が得られる。今回の実験においては、2枚の PAL をリング状に構成する目的上、それぞれの PAL を強度変調用に設定した。

書き込み光強度に対する位相変調量は非線形な関数で表され、この関数は PAL の各種のパラメータによりほぼ任意に変化させる事ができる。また受光面内に設定した各画素において独立な変調を得る事も期待できる。

2.2 実験系

Fig.1 に主な実験系を示す。使用した PAL は浜松ホトニクス (株) 製 PAL-SLM X5641 No.41 および No.81 であり、これらは製造時期の違いにより多少の特性差を持つ。また、PAL の駆動電圧や書き込み・読み出しのためにレーザが供給する光量等により書き込み・読み出し特性 (以下、入出力特性) が変動することを踏まえ、これら 2枚の PAL を区別して PALa (No.41)、PALb (No.81) と呼ぶことにする。

実験系は 2枚の PAL を挟んで 2本のレーザ光がリングを構成するものである。PALa から読み出された変調光は偏光ビームスプリッター (PBS, Polarized Beam Splitter) によって強度変調成分のみ取り出され、全反射ミラーを経て PALb に書き込まれる。さらに PALb から読み出された光は同様にして PALa に書き込まれ、2枚の PAL が変調しあう。従って系の定常状態はそれぞれの PAL に対する種々のパラメータの組み合わせにより決定され、時間的・空間的に複雑な光量変化を得る事もできる (3.3)。

これらの強度変調の様子は、光路中に設置された透明シートからの反射を CCDカメラに取り込み、視覚的な観測を行なった。透明シートによる光強度の減衰は書き込み光量と比較して無視できる程度であり、系に対して影響はないものとみなせる。ただし PAL によって変調された二次元スポットの輝度分布を定量的に解析する場合、この取り込み方法では問題があり、ビームサンプラー等を用いて直接レーザ光の一部を CCDカメラに入力する事が望ましいと考えられる。

書き込み光・読み出し光の供給源としては同型の半導体レーザ (Laser Diode, 以下 LD) モジュール 2本を用いた。この LDモジュールの波長は 680nm であり、そのビームスポットはあらかじめ直径 2cm 程度に拡大、コリメートされている。

2.3 PAL-SLM の基礎特性

PAL の読み出し光の時間的な変動や 2次元的な光強度分布を解析するためには、PAL の持つ基本的な特性を理解する必要がある。

まず、PAL による読み出し光の位相シフト量 Φ は次式のように表される。

$$\Phi = \phi_0(V_{off}) + \Delta\phi(I_w, I_{ri}). \quad (1)$$

ここで V_{off} [V] は PAL の駆動電圧、 I_w [W] は PAL への書き込み光強度、 I_{ri} [W] は読み出しのために供給する光強度、 ϕ_0 は駆動電圧による初期位相変調量、 $\Delta\phi$ は書き込み光・読み出し光強度による位相変調量を示している。さらに 2.1 で述べたように読み出し光の偏光面を液晶の配向方向に対し 45° に設定して強度変調を行なう場合、配向方向成分のみに変調がかかることから読み出し光強度 I_{ro} は、

$$I_{ro} = \frac{I_{ri}}{2} \{1 - \cos \Phi\} \quad (2)$$

で表現されることが分かる。ここで、 $\Phi = \pi[\text{rad.}]$ であれば I_{ro} は最大値をとる (π 変調)。

(1) 式において ϕ_0 、 $\Delta\phi$ は、それぞれ V_{off} 、 I_w 、 I_{ri} の関数であり実験的により与えられる近似式である [1]。そこで 2 枚の PAL の基礎的な特性に関する実験を以下のように行なった。

はじめに ϕ_0 に関する実験として、駆動電圧 V_{off} - 読み出し光強度 I_{ro} 特性をそれぞれの PAL について測定した。この結果を Fig.2 に示す。ここでは $\Delta\phi$ による変調を避けるため I_w および I_{ri} を一定とした上で、 V_{off} を変化させた時の I_{ro} をパワーメータで直接測定している。Fig.2 においては PALa、PALb 共に V_{off} に対し I_{ro} が周期的な変化をみせている。このことは V_{off} の増加に伴って液晶層の屈折率が直線的に増加していくことから明らかである。また、 V_{off} が約 1[V] の付近に変調が起こるしきい値が存在することも付記しておく。逆に V_{off} が 4[V] を越える付近からは I_{ro} の変化が鈍くなっており、液晶分子がほぼ完全に光軸方向に回転してしまっていることをうかがわせる。従って、十分な変調量を得るためには V_{off} を 2~3[V] に設定することが望ましい。

以上より、3.1 以降のシミュレーションにおいては ϕ_0 の近似として次式を用いることにする。

$$\phi_0 = \pi \left\{ 1 - \cos\left(\pi \frac{V_{off}}{V_i}\right) \right\}. \quad (3)$$

ここで V_i は、Fig.2 にみられる I_{ro} の変動を \cos 関数で近似する際、その周期に対応するためのパラメータである。

次に $\Delta\phi$ に関する実験として、 V_{off} を一定としたときの書き込み光強度 I_w - 読み出し光強度 I_r 特性を測定した。また同時に、 V_{off} を数種類設定し、特性の変化の観測も同時に行なった。この実験結果を Fig.3 に示す。Fig.3 における特徴としてまず挙げられるのは、横軸すなわち I_w が \log スケールである事である。これは $\alpha\text{-Si:H}$ の受光強度に対する抵抗変化の関数に起因するものである。このことは PAL が小さい書き込み光強度に対して感度が高いことを示している。

しかし同時に $1 \sim 5[\mu\text{W}]$ 付近の I_w では変調量の低下がみられる。その原因には $\alpha\text{-Si:H}$ の書き込み光に対する感度によるもの、 I_{ri} が PAL 内の誘電体多層膜ミラーを透過して変調が起こっているものなどが考えられるが現時点では特定できていない。ここでは近似式を与えるため後者を仮定し、次式を $\Delta\phi$ として用いる。

$$\Delta\phi = \pi \left[1 - \cos\left\{ \frac{\log_{10}(I_w + kI_{ro})}{3} \pi \right\} \right]. \quad (4)$$

ここで k は誘電体多層膜ミラーの透過率である。

一方 Fig.3 において、 V_{off} の変化に伴い特性曲線が左右にシフトしていることが分かる。従って、各 PAL の入出力特性は V_{off} によりほぼ任意に設定することが可能であり、2 枚の PAL の特性に非常に多様な組み合わせを設けることができる。

ここまで述べた PAL の特性の他に無視できないのは、応答速度である。PAL の応答速度は液晶分子の応答速度に支配されるが、これは駆動電圧 V_{off} によって変化する。ここで、PAL の駆動電圧 V_{off} - 応答時間 τ 特性を Fig.4 に示す。応答時間の測定は、書き込み光側に設置した電磁シャッターを TTL 信

号により周期的に開閉し、それに呼応した読み出し光の変動をオシロスコープに取り込んで行なった。ここで、電磁シャッターの開閉速度は液晶の応答速度に比べて十分速いため、測定に支障をきたさない。また Fig.2 のような初期変調の影響を避けるため、読み出し光側に $\lambda/4$ 板を設置した上で、 π 変調を基準とするように I_w を調整しながら測定した。

Fig.4 においては、 V_{off} の増加に伴い τ は減少しており、応答が速くなっていることが分かる。これは駆動電圧により液晶分子の拘束力が強くなるためである。また立ち下がり時間 τ_{fall} より立ち上がり時間 τ_{rise} の方が全体にわたって短い、これも同様の理由によるものと考えられる。また、特性曲線に波がみられることは測定方法に起因するものであり本来は滑らかな減少を示すとすると、 τ を表す近似式として次式を得る。

$$\tau = \tau_0(V_{off}) + \epsilon. \quad (5)$$

ここで ϵ は τ_{rise} と τ_{fall} の差の平均を 2 で割ったものであり、rise 時には負、fall 時には正の値をとるものとする。また、

$$\tau_0(V_{off}) = a \exp(-bV_{off}) + c \quad (6)$$

を特性曲線の近似として用いる。ここで a 、 b および c は各 PAL の特性差に対応する係数である。

これらの応答時間は、実験系における光の周回時間と比べて非常に大きい。つまり系の定常状態を決定する際に τ は重要な意味を持つ。

2.4 Open Loop 特性

PAL を縦続接続が可能であることを確認し、多段の PAL の入出力特性を調べるため、open loop 特性を以下のように測定した。まず、PALb からの読み出し光が PALa に戻らないようにしておき、PALa には外部に設置した He-Ne レーザからの光が書き込まれるようにする。ここで He-Ne レーザは、ビームエキスパンダとコリメートレンズを用いて、あらかじめ PALa の受光面において一様とみなせる程度までスポットを広げてある。次にニュートラルデンシティー (ND, Neutral Density) フィルターにより PALa に対する書き込み光強度 I_{aw} を変え、その時の PALb からの読み出し光強度 I_{br} をパワーメータで測定する。

PAL を 2 枚接続した場合、測定の際に調整するパラメータとしては PALa、PALb の駆動電圧 $V_{a,off}$ および $V_{b,off}$ 、読み出しのための供給光強度 $I_{a,ri}$ および $I_{b,ri}$ が挙げられる。つまりこれらの組み合わせごとに測定点が存在するわけであるが、ここでは最も単純な例として $I_{a,ri}$ と $I_{b,ri}$ を固定しておき、変調の最も少ない時 (dark level) および π 変調の時 (bright level) の $V_{a,off}$ と $V_{b,off}$ を選んだ。この実験結果を Fig.5 に示す。

Fig.3 と比較すると、PAL を 2 段に接続することによりその入出力特性が変化していることが分かる。また Fig.5(b)、(c) においては 100 [μ W] 付近の書き込み光に対して感度が向上している。従って 3.1 のようなリング状の接続を行なった際に、1 枚の PAL を用いるより多彩な各光強度の変化が期待できる。

3 Closed Loop 特性

3.1 Closed Loop における双安定動作

2.3に述べた基礎特性を踏まえた上で、Fig.1 のように closed loop を形成し、2枚の PAL の読み出し光の変化を調べる。

実験を行なう際に問題となることの一つに、変調を受けるレーザスポットが2次元画像であるため、PAL の書き込み光と読み出し光の間に 1:1 の関係が成立しているかどうか判断できないという点がある。PAL の解像度は 50[lp/mm] 以上であるが、結像レンズを設けない Fig.1 のような実験系においては、アライメントの基準とした点から外側へとレーザ光が拡散していくと考えられる。従って、厳密な意味での closed loop 特性を得るためにはレンズで結像を行なうなどのアライメントに対する工夫が必要である。ここでは実験系の簡素化の理由から、PALa の読み出し光源を虹彩絞り (iris) で2次的に制限し、ほぼ 1:1 のマッピングに近づけるようにした。

また、2.4 に述べたように各 PAL に対する V_{off} 等のパラメータの組み合わせは非常に多いため、その全てについて実験することはできない。そこで 2.3 で挙げた近似式を用いてシミュレーションを行なった。PAL の特性の近似式は (1) 式~ (6) 式であるが、PBS やミラーによる光強度の損失を考慮して、

$$I_{aw} = \gamma_b I_{bro} \quad (7)$$

$$I_{bw} = \gamma_a I_{aro} \quad (8)$$

とする。ここで γ_a 、 γ_b はそれぞれ LDa、LDb の光路中における損失の総和を表している。さらに緩和の式より、

$$\begin{aligned} I_{aro} &= \frac{I_{ari}}{2} \{1 - \cos \Phi_a(I_{aw}, V_{aoff})\} \\ &= F'_a(I_{aw}) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} I_{bro} &= \frac{I_{bri}}{2} \{1 - \cos \Phi_b(I_{bw}, V_{boff})\} \\ &= F'_b(I_{bw}) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\tau_a \frac{dI_{aro}}{dt} = -I_{aro} + F'_a(I_{aw}) \quad (11)$$

$$\tau_a \frac{dI_{bro}}{dt} = -I_{bro} + F'_b(I_{bw}) \quad (12)$$

$$(13)$$

を得る。これらの式において、添え字の a、b はそれぞれ PALa、PALb におけるパラメータを示す。

(12) 式および (13) 式を基に行なったシミュレーション結果のうち、特徴のあるものを Fig.6 に示す。ここで、(b) のグラフは closed loop において LDa 側の光路を遮断したとき (cut) と外部から PALb に He-Ne レーザ光を入力したとき (input) の、 I_{aw} および I_{bw} の時間応答の様子であり、(a) のグラフは同じパラメータ設定の時の open loop 特性である。(b) において、外部トリガによって二つの安定状態が出現していることが分かる。またこれらの二つの安定状態は、(a) における open loop 特性と $I_w(n+1) = I_w(n)$ を表す破線の交点に相当している。外部トリガを加える時間が短い場合、安定状態間のスイッチングは起こらないが、これは液晶の応答時間が系の周回時間より非常に大きいことによる。

このシミュレーションにおけるパラメータを用いた実際の実験結果を Fig.7 に示す。この写真は CCD カメラからの映像を撮影したものであり、スポットの大きさは iris を最も絞ったもの (約 1[mm]) である。カメラに取り込んだ画像は Fig.1 に示される位置であるので I_{aw} に相当する。Fig.7 から、明らかにスポット位置の光強度が双安定状態にあることが分かる。

さらに Fig.1 に示す位置に 7×7 のドットアレイが印刷されたマスクを置いて実験を行なったところ、Fig.8 のような結果を得た。一番下の写真は右上 $1/4$ のみ cut したものであり、これらのピクセルがそれぞれ独立にスイッチできることを示唆するものである。ただしここで問題となるのは、スポット内での各 LD の光強度分布や PAL 受光面内の電圧分布が一様でないことである。そのため、アレイ内のピクセルごとに I_w 、 V_{off} などのパラメータにばらつきが生じ、ピクセルの位置によっては双安定動作が得られない場合がある。これについては 4.2 で再度述べる。

3.2 フリップフロップ動作

3.1 における実験の中で、He-Ne レーザ光を入力した際に一度反転したスポットが再度反転する現象が観測された。すなわち同一入力によるフリップフロップが実現されたことになる。一般的に全光回路のフリップフロップ動作においては負のパルスをもどくように得るかが大きな問題 [2] であり、この実験結果が理論的に裏付けられるものであれば工学的に意味がある。

そこで、3.1 に述べたシミュレーションを、実験にほぼ即したパラメータで行った。シミュレーション結果の表示方法として、 I_{aw} および I_{bw} の時間的変化を同時に知ることができるよう、横軸に I_{aw} 、縦軸に I_{bw} をとった。また、与えられた V_{off} に対するそれぞれの PAL の入出力特性を同時に表示している。この場合、2つの入出力特性の交点は不動点にあたる。

Fig.9 は実際の実験に近いパラメータを用いたときのシミュレーション結果である。(a) (b) それぞれは安定状態から外部トリガ (input) を受けてもう一方の安定状態に移る、過渡応答を示すものである。矢印の部分はそれぞれ外部トリガが入力されていることを表す。それぞれの過渡応答は違った経路をたどっており、 $I_{aw} - I_{bw}$ 空間内に二つの安定状態に収束する点が分布していることがわかる。フリップフロップ動作が得られるパラメータ設定については V_{off} および τ の組み合わせに支配されており、特定の値に限られるものではない。また、トリガ時間によって動作は制限される。

しかしシミュレーションにおけるパラメータの厳密な値をそのまま実験に用いたとき、一時は再反転するものの時間を経ると元の状態に戻ってしまい、必ずしもフリップフロップが起こるわけではなかった。この時間のオーダーは PAL の応答時間と比べて大きく (数 sec.)、Fig.9 のような動作原理に沿うものではないと考えられる。ここで変調される 2次元の範囲は、Fig.7 において見られるようにスポット内に限られるものではなく、その周辺の領域にもある程度の影響を及ぼしている。単一の外部トリガによるフリップフロップ動作は 3.1 における双安定動作に比べてパラメータ設定が微妙であるため、上記のような 2次元の変調範囲、すなわちアライメントの影響が顕著に現れていると思われる。

ここに述べたような、非線形素子をリング状に接続した全光回路におけるフリップフロップ動作については、理論的な報告もなされている [3]。

3.3 2次元カオスパターン

実験において V_{off} および I_w を掃引していくと、これまでに述べた安定な状態の他に時間的に 2次元パターンが変化していくような領域が存在した。特に V_{off} を掃引したときのパターンの変化は著しく、Fig.10 に挙げるようなカオスパターンも見られた。ここで、写真のパターンは全てスポットの中心を軸として時計回りに回転している。また V_{off} の変化に伴って、点在する明るい領域が次第に細くなることがわかる。

このような複雑に変化するパターンは多くのパラメータ領域でみられたが、シミュレーションにおいては現在のところ実現されていない。パターンの回転速度や方向がミラーの微調整により変化することから、3.2 に述べたようなアライメントの問題がカオスパターンを生み出す原因の一つになっていると考えられ

る。しかし PAL 内で変調が周辺へ影響を及ぼし合っていないとは言い切れず、これらの現象については (1) 式 ~ (13) 式を 2 次元に拡張した解析が必要とされる。

4 結論

4.1 まとめ

本報告書では以下の事項について述べた。

1. PAL-SLM の基礎的な特性を明らかにし、その変調の実験的近似式を与えた。
2. 2枚の PAL-SLM をリング状に構成することにより、双安定状態及び単トリガによるフリップフロップ動作を実現した。
3. 近似式を用いて計算機シミュレーションを行い、2. の理論的検証を行った。

4.2 課題

今後の課題として挙げられることは、まず 3.1 や 3.2 に述べたように、1次元マッピングから2次元マッピングへ解析対象を拡張することである。これは実験においても計算機シミュレーションにおいても言え、両方の結果を基にレーザスポットの拡散や PAL 内での相互変調等の詳しい理解を得ることは、今後の系の応用に役立つだろう。そのためには結像レンズを用いたアライメントなど、測定方法に関する工夫が必要となる。

また PAL の機械的な面では、受光面内における V_{off} の不均一分布が特性に影響を及ぼしている。LD スポット内の光強度が一様でないことも考慮すると、実際に特性を同一視できる領域はかなり限定される。この領域をいかに効率よく使用するかも課題の一つである。

謝辞

2カ月の短い研究実習期間ではありましたが、このような研究の機会を与えて頂いた猪股社長、また、実験指導や討論をして頂いたATR光電波通信研究所の皆様に深く感謝致します。

参考文献

- [1] T. H. バーンズ, 永寿伴章, 小銀治繁, 松田浄史, 吉田成浩: 第18回光学シンポジウム講演予稿集, 27, (1993).
- [2] 神谷武志, 荒川泰彦: “超高速光エレクトロニクス”, 培風館, 177, (1991).
- [3] K. Otsuka and K. Ikeda: Opt. Lett., Vol.12, No.8, 599, (1987).

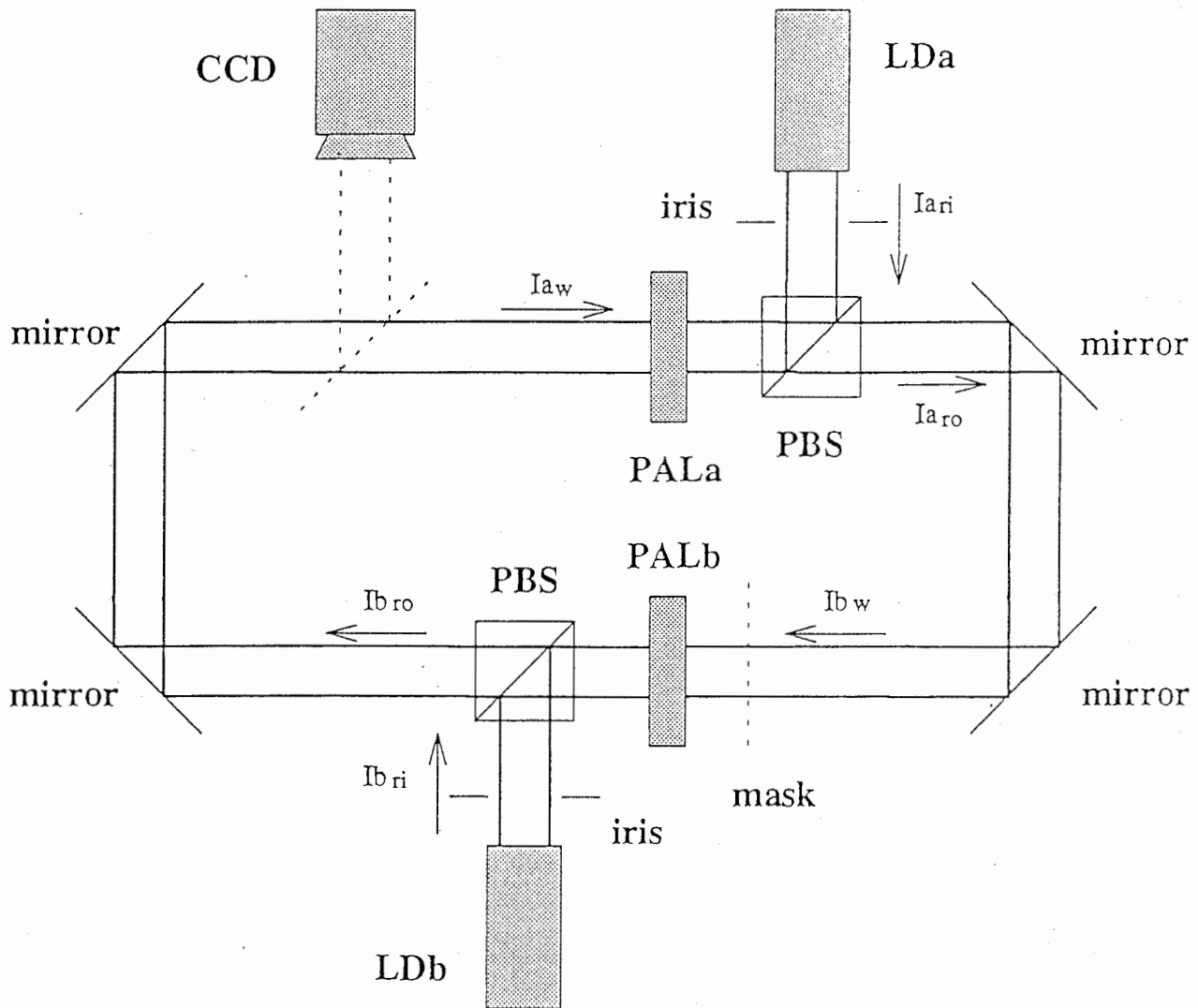


Fig. 1 : 実験系

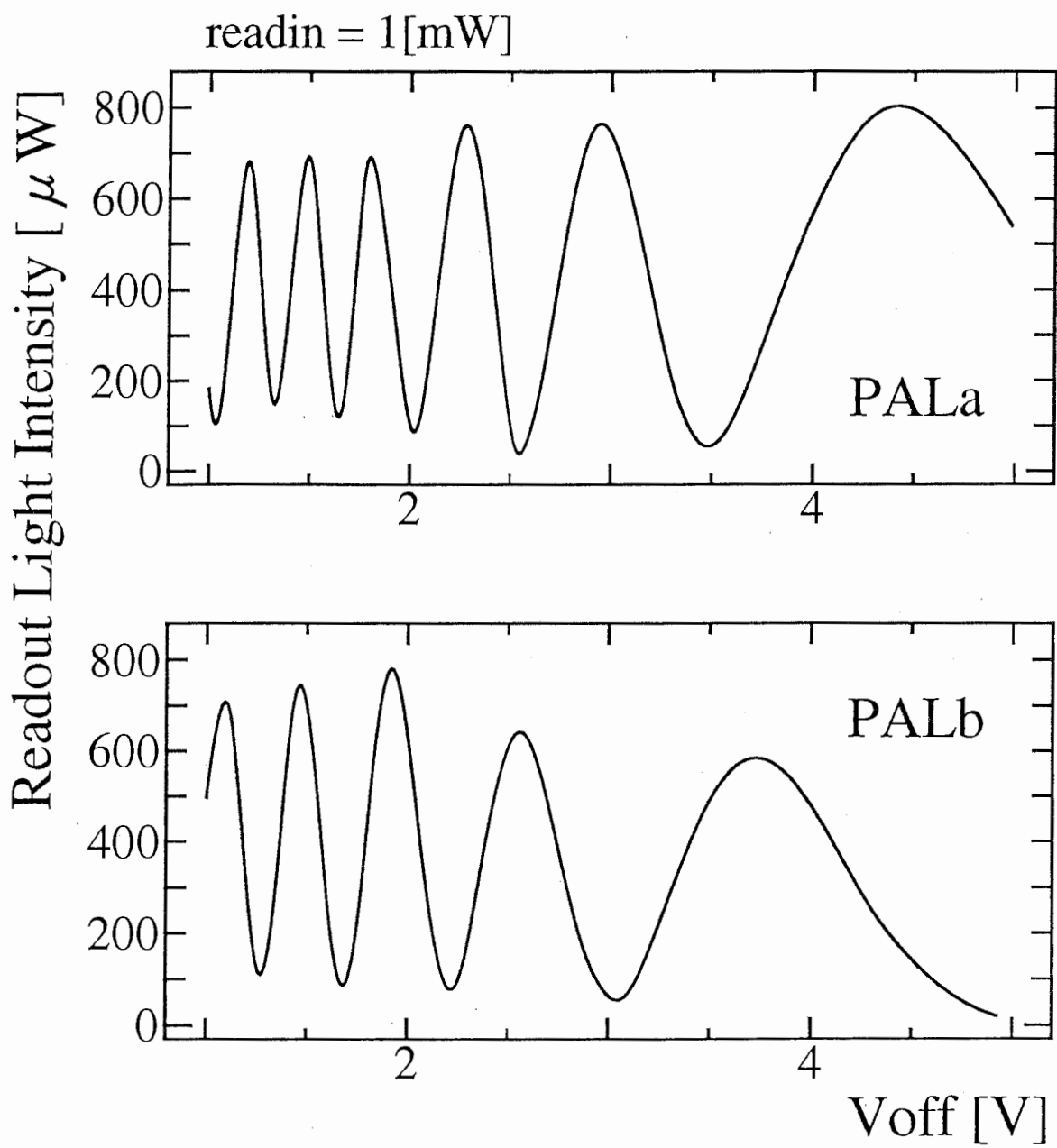


Fig. 2 : V_{off} - I_{ro} 特性

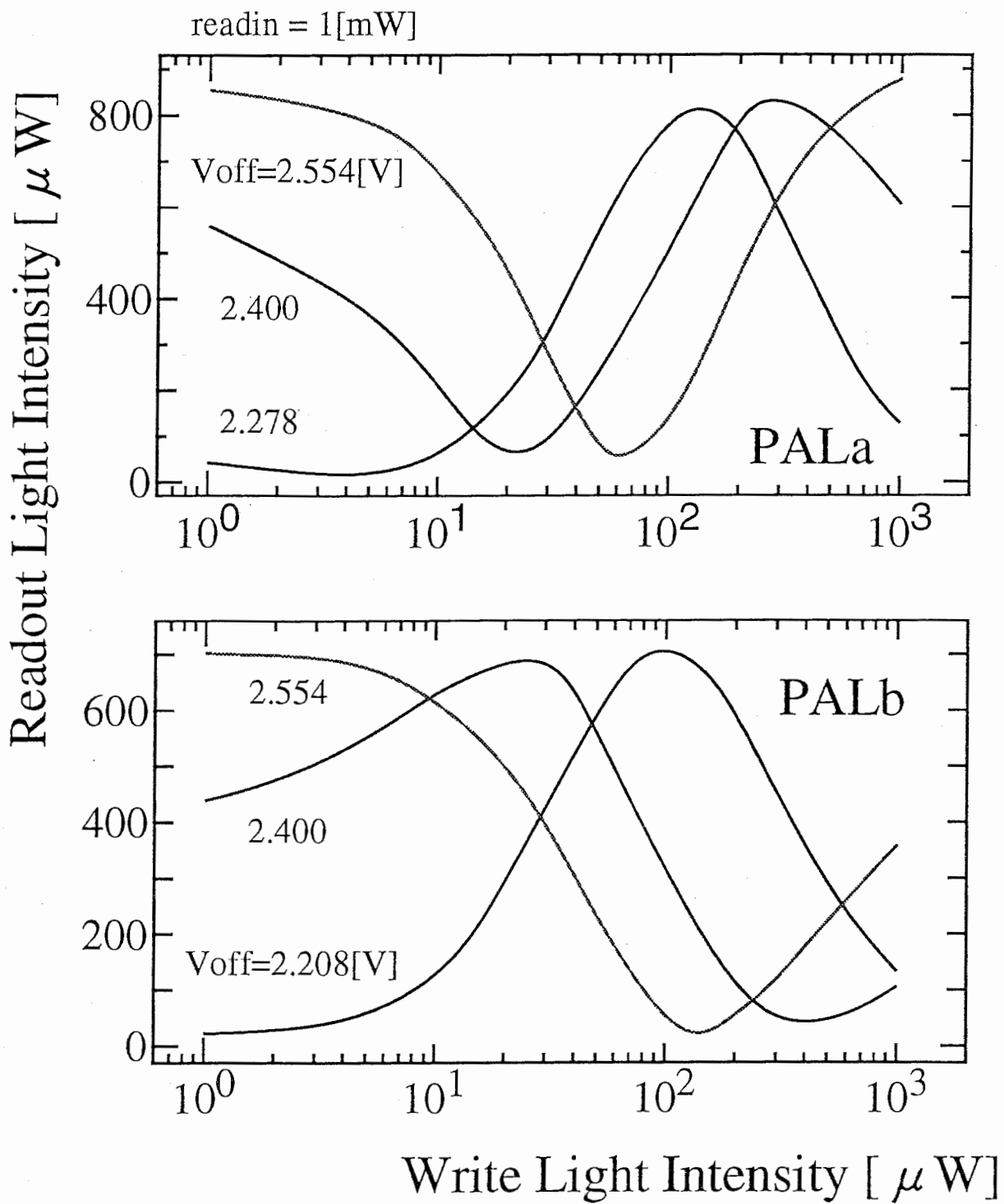


Fig. 3 : $I_w - I_{ro}$ 特性

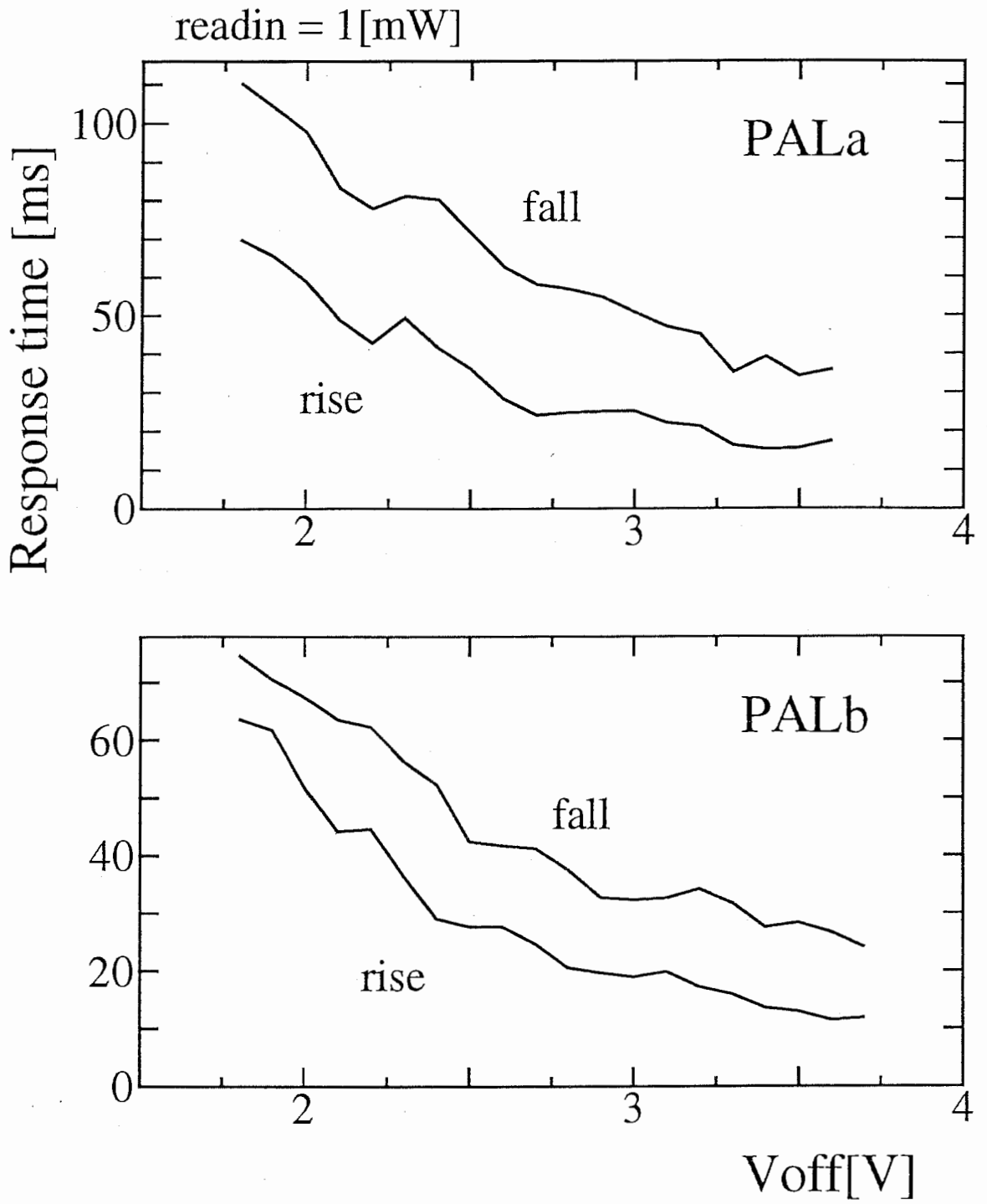
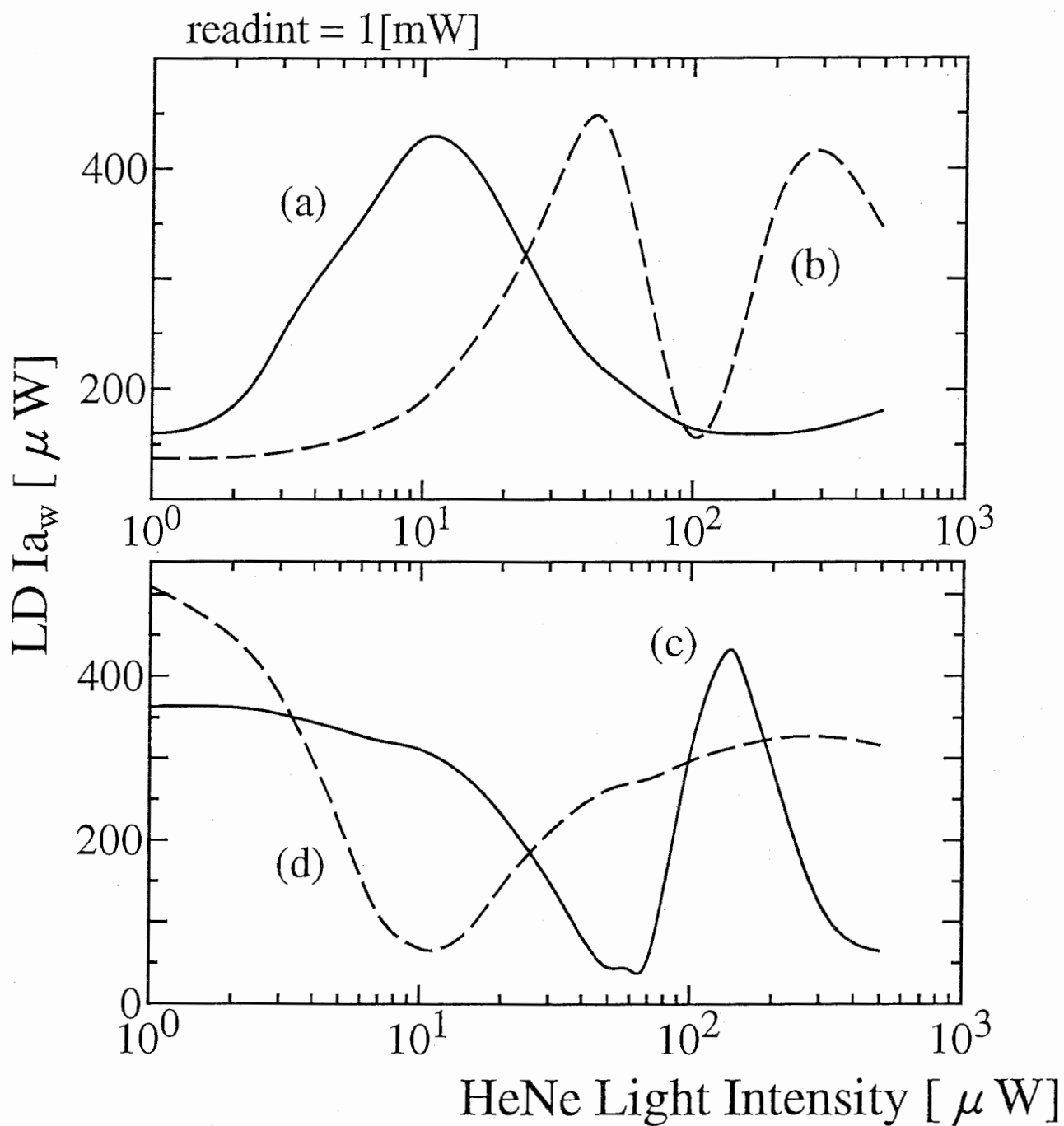


Fig. 4 : $V_{off} - \tau$ 特性



(a)PALa:dark PALb:dark (b)PALa:bright PALb:dark
(c)PALa:bright PALb:bright (d)PALa:dark PALb:bright

Fig. 5 : open loop 特性

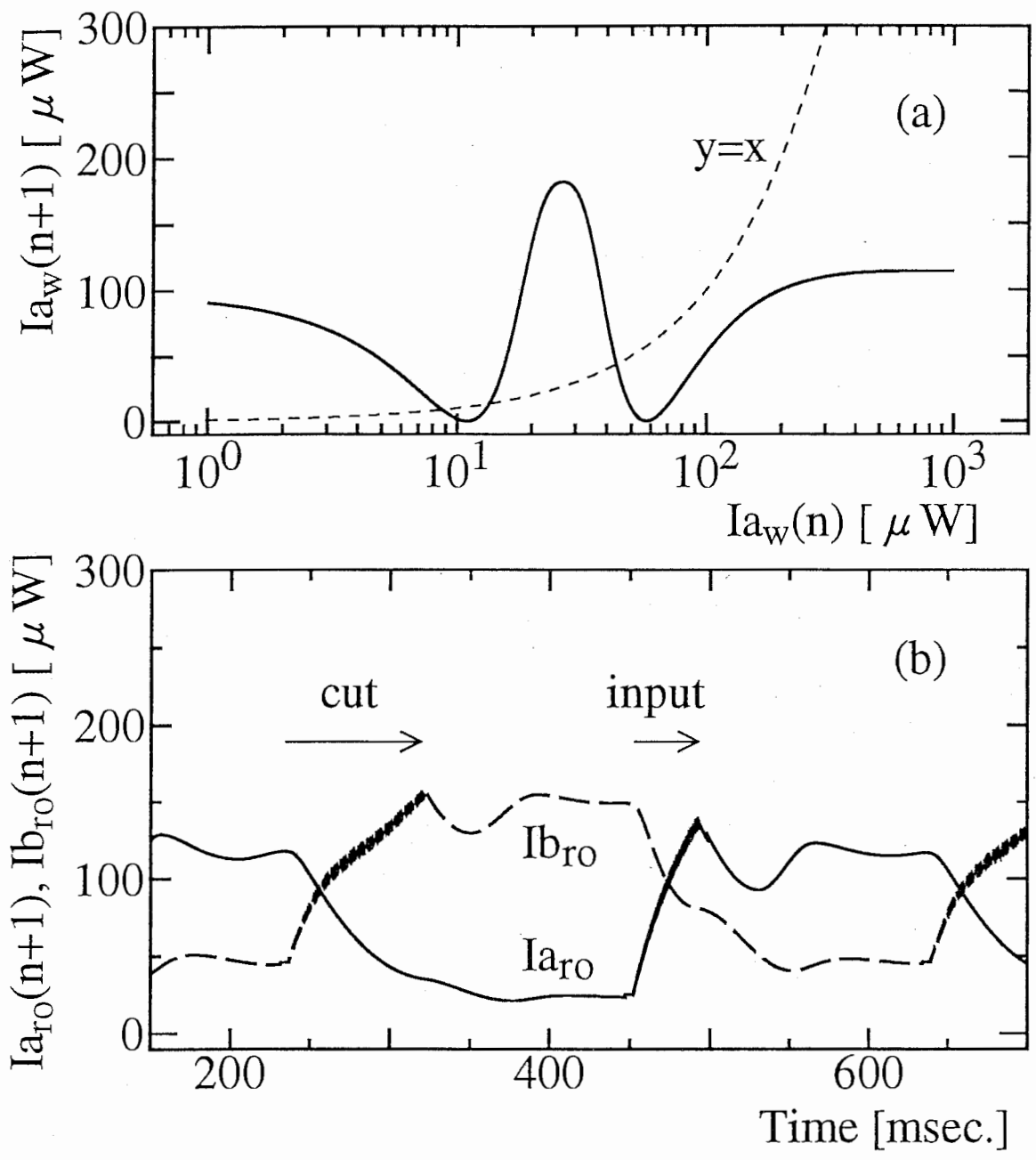


Fig. 6: 計算機シミュレーションにおける双安定動作

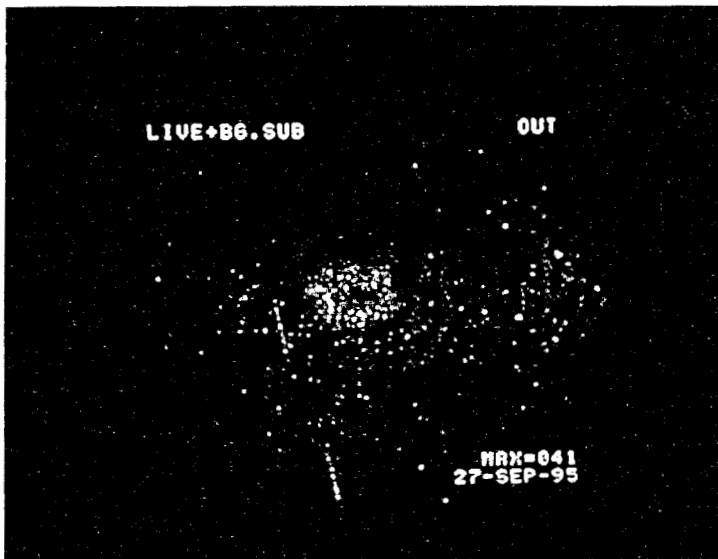
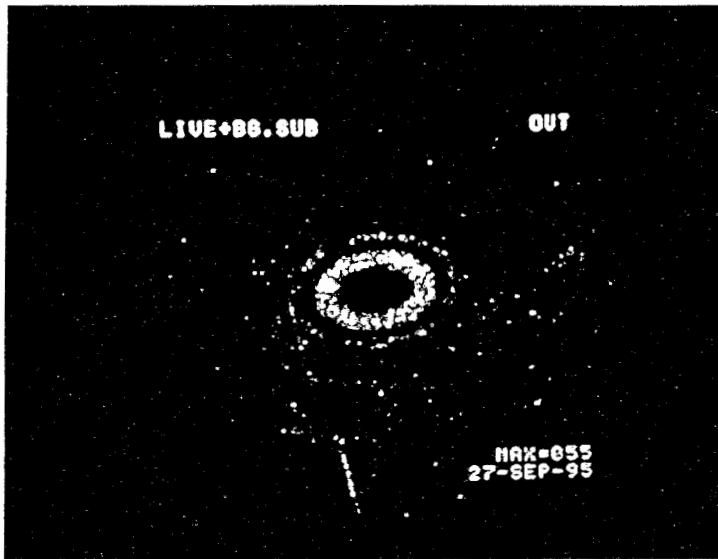


Fig. 7: 双安定動作の様子

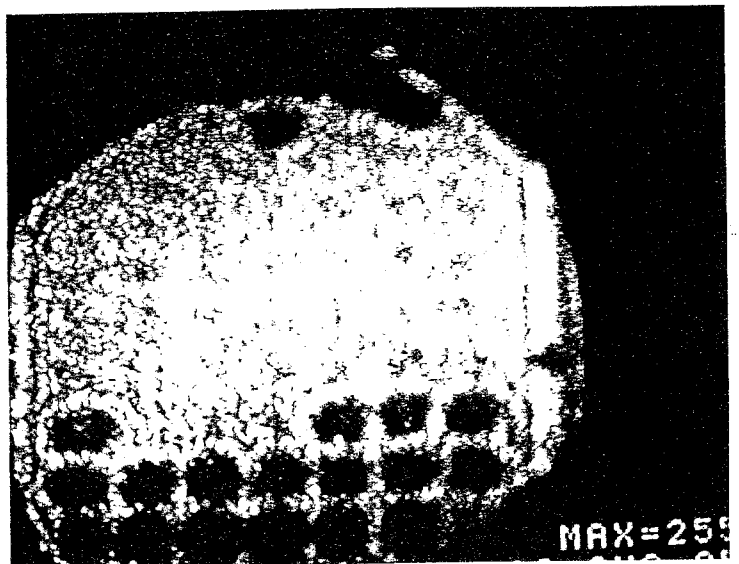
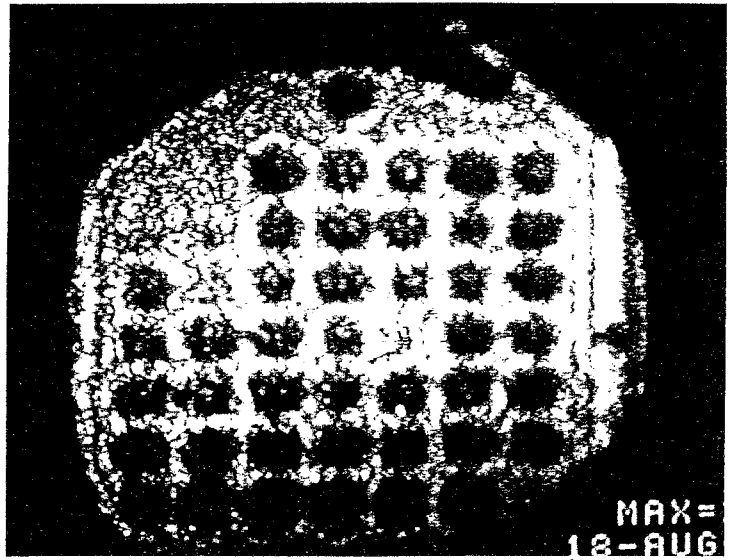
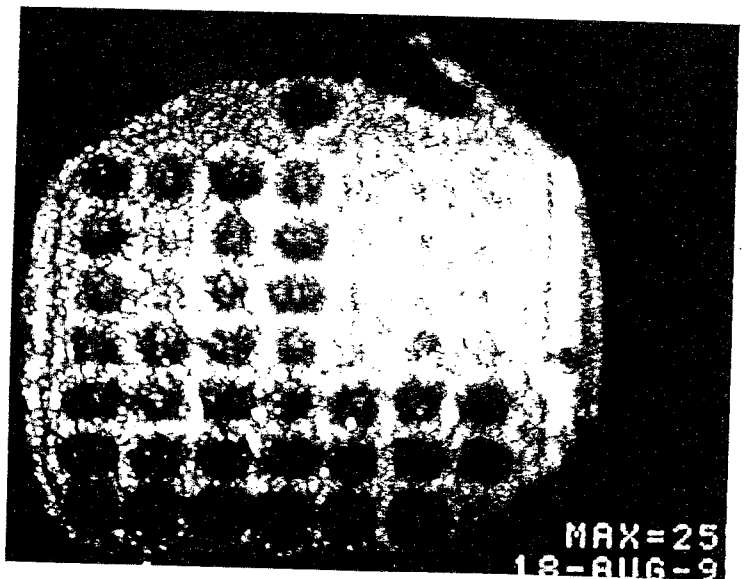


Fig. 8 : Bistable Array



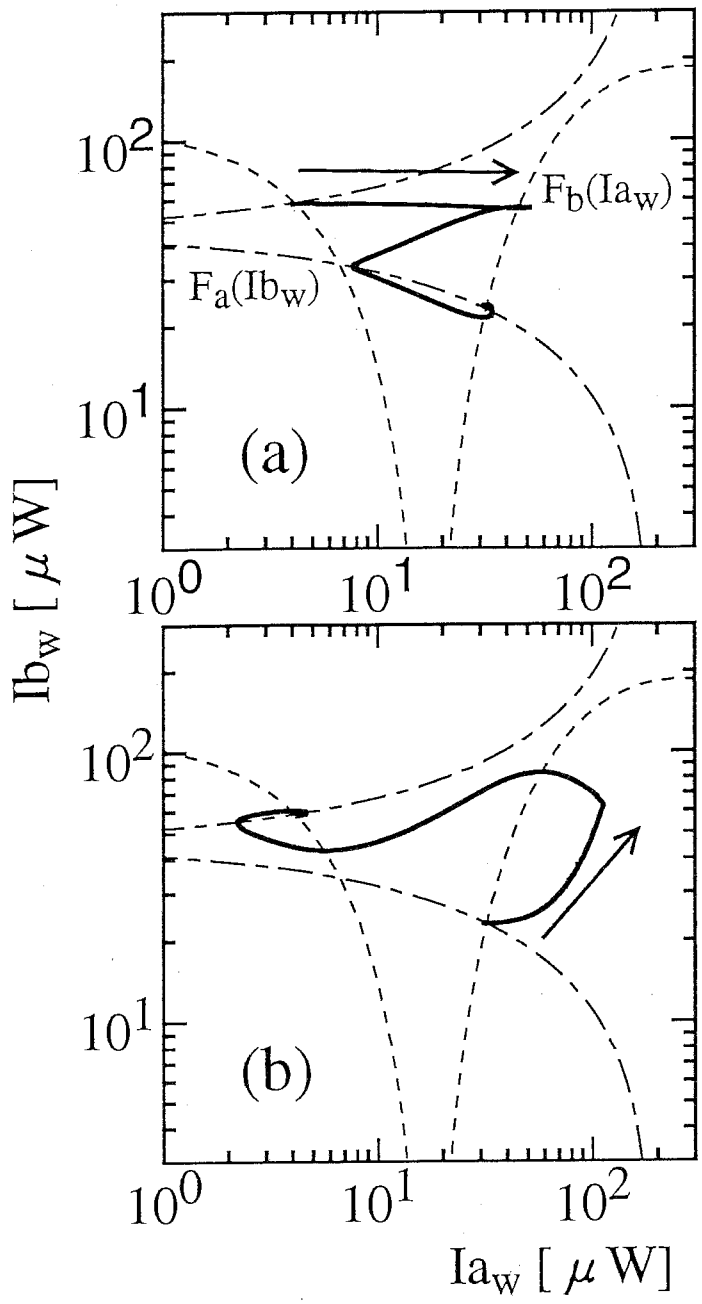


Fig. 9 : フリップフロップ動作の計算機シミュレーション

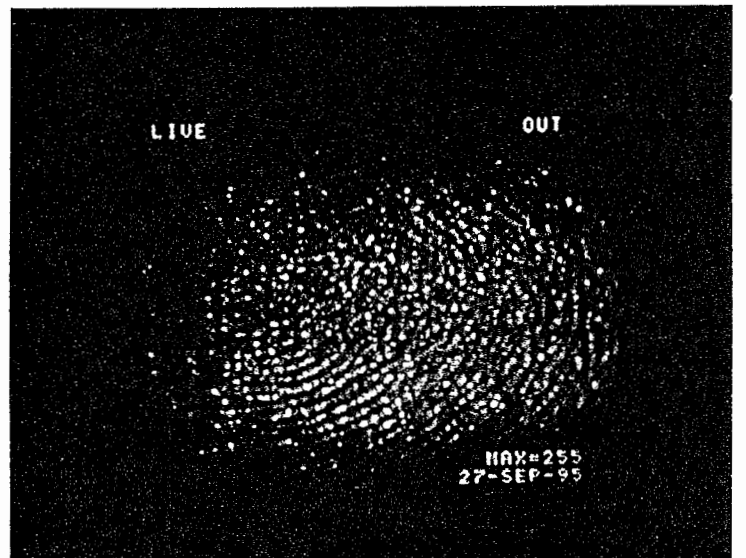
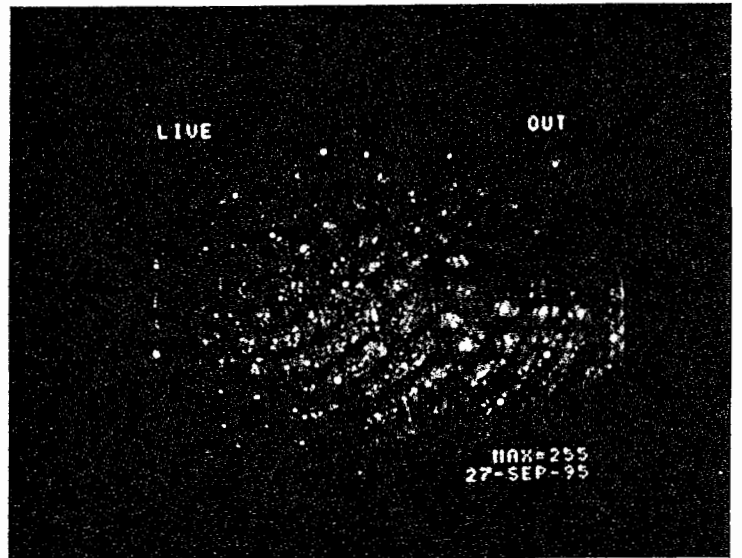
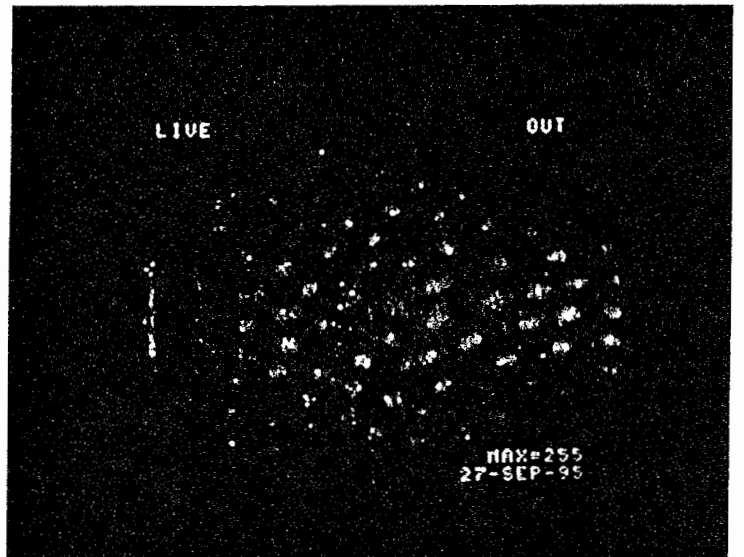


Fig. 10 : カオスパターンの例