

解説

高速光シャッター

渡部 俊太郎

東京大学物性研究所 〒106 東京都港区六本木 7-22-1

(1983年11月9日受理)

High Speed Optical Shutter

Shuntaro WATANABE

Institute for Solid State Physics, University of Tokyo,
7-22-1, Roppongi, Minato-ku, Tokyo 106

1. はじめに

レーザーの出現によって様相が一変した分野に、光物性¹⁾や光誘起化学反応²⁾などの高速過渡現象の研究がある。レーザー出現以前に使われていたフラッシュランプの光パルス幅は μs 以上であったが、Qスイッチレーザーの出現によりパルス幅は $< \text{ns}$ 領域となり、モード同期レーザーによりまたたく間に ps 領域へ入っていった。最近では 30 fs の光パルスまで得られている³⁾。

高速光シャッターの原理の多くはレーザー自体とは無関係なものが多いが、最近の光シャッターの進歩はレーザーと密接不可分であった。その理由はQスイッチやモード同期が実は高速光シャッターと同じ原理の素子を用いて行なわれたことである。また光源としてのレーザーが高速光シャッターを使いやすいものとしたこともその理由である。

高速光シャッターとして最もよく使われるのは、電気光学効果を用いたシャッターである。このなかにはポッケルスセルとカーセルがある。そのほかに磁気光学効果や音響光学効果を用いたものがある。最近では、固体、気体プラズマや半導体表面のレーザープラズマを用いたシャッターも使われている。また電気光学効果とは逆に ps レーザーパルスにより半導体内に電子-正孔プラズマを作り、導電状態にする半導体スイッチが開発され、ポッケルスセルの駆動やストリークカメラのスキャンに利用された例がある。ポッケルスセルや音響光学素子についてはすでにすぐれた製品があり、その他のシャッターについてもすぐれた解説があるが、ここでは全体を通

して概説したい。

2. ポッケルス効果を用いたシャッター

光が結晶中を進行するとき、屈折率楕円体は

$$\left(\frac{1}{n^2}\right)_1 x^2 + \left(\frac{1}{n^2}\right)_2 y^2 + \left(\frac{1}{n^2}\right)_3 z^2 + 2\left(\frac{1}{n^2}\right)_4 yz + 2\left(\frac{1}{n^2}\right)_5 xz + 2\left(\frac{1}{n^2}\right)_6 xy = 1 \quad (1)$$

と表わせる⁴⁾。線形の電気光学効果はポッケルス効果と呼ばれ、電気光学テンソル r_{ij} によって

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_i = \sum_{j=1}^3 r_{ij} E_j \quad (2)$$

と表わせる。ここで $\Delta(1/n^2)_i$ は $(1/n^2)_i$ の微小変化である。反転対称な結晶では、光学的性質は電場の向きを反転させても変化しないので $r_{ij}=0$ となり、ポッケルス効果は現われない。 r_{ij} 成分の形は結晶の点群の対称性によって決定され、たとえば $\bar{4}2m$ 点群に属する KH_2PO_4 (KDP) ではゼロでない r_{ij} 成分は r_{41} , $r_{52}=r_{41}$, r_{63} であり、(1)は

$$\frac{x^2}{n_o^2} + \frac{y^2}{n_o^2} + \frac{z^2}{n_e^2} + 2r_{41} E_x yz + 2r_{41} E_y xz + 2r_{63} E_z xy = 1 \quad (3)$$

と書きあらためられる。ここで Z 軸は結晶の光軸で n_e は光軸方向の屈折率、 n_o は x, y 方向の屈折率である。ポッケルスセルの場合一般に電気光学効果が最大となるように電界と入射光の方向を決める。KDP の場合入射光と電界がともに光軸方向のものが多い。この場合(3)は

$$\frac{x^2+y^2}{n_o^2} + \frac{z^2}{n_e^2} + 2r_{63}E_x xy = 1 \quad (4)$$

となり、Z軸のまわりに x, y 軸を 45° 回転させた新座標 x', y' では

$$\frac{x'^2}{n_x'^2} + \frac{y'^2}{n_y'^2} + \frac{z^2}{n_e^2} = 1 \quad (5)$$

となる。ただし

$$n_{x'} = n_o - \frac{y_o^3}{2} r_{63} E_x$$

$$n_{y'} = n_o + \frac{n_o^3}{2} r_{63} E_x \quad (6)$$

x 方向に偏光する入射光が KDP を透過する間に、 y', x' 成分の間に

$$\Gamma = \pi V / V_{1/2}, \quad V_{1/2} = \lambda / 2n_o^3 r_{63} \quad (7)$$

の位相遅れが生じる。ここで $V = E_x L$ (L は Z 方向の長さ) は印加電圧、 $V_{1/2}$ は位相差が π となる電圧で半波長電圧と呼ばれる。図1のようにポッケルスセルの前後に直交する偏光子をおくと、 x 方向に偏光する入射光に対する透過率は

$$T = \sin^2 \frac{\Gamma}{2} \quad (8)$$

である。つまり $V_{1/2}$ の矩形波電圧が印加されると、偏光面が 90° 回転し、ほぼ電圧波形に対応した光パルスが損失なく得られる。表1に $\bar{4}2m$ 点群に属する結晶の諸定数をまとめる。また図2に KDP, ADP, KD*P の透過率曲線を示す。99% 以上 KDP の H を D に置換した KD*P は、 $V_{1/2}$ が最も低いばかりでなく、紫外域か

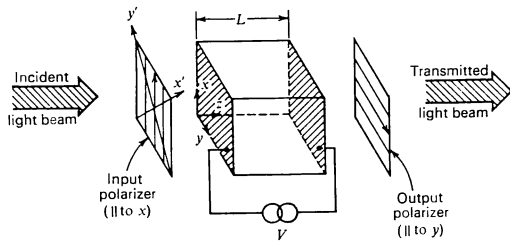


図1 ポッケルスシャッターの原理図⁴⁾

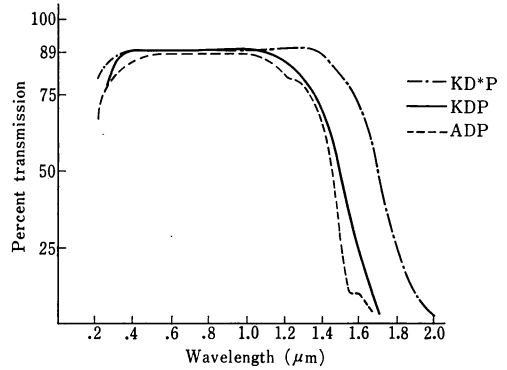


図2 $\bar{4}2m$ 点群に属する結晶の分光透過率曲線⁶⁾

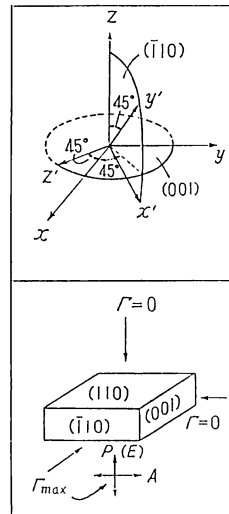


図3 $\bar{4}3m$ 点群に属する結晶のポッケルス効果の一例 (P, A はおのおの偏光子と検光子の方向、電場は P の方向である⁵⁾)

ら近赤外域での透過範囲が広く、最もすぐれた特性を示す。

赤外域 ($1 \sim 20 \mu$) では $\bar{4}3m$ 点群に属する GaAs や Cd-Te などが用いられる。できるだけ低い電圧で動作させるため、電界と入射光の方向は図3に示すように直交さ

表1 $\bar{4}2m$ 点群対称性をもつ結晶の諸定数

Material	Electro-optic constant, r_{63} ($\mu\text{m}/\text{V}$) $\times 10^{-6}$	Typical 1/2 wave voltage at 5461 Å, kV	n_o approx
ADP (ammonium dihydrogen phosphate)	8.5	9.2	1.526
KDP (potassium dihydrogen phosphate)	10.5	7.5	1.51
KD*P (potassium dideuterium phosphate)	26.4	2.9-3.4*	1.52
KDA (potassium dihydrogen arsenate)	10.9	6.4	1.57
RDP (rubidium dihydrogen phosphate)	11.0	7.3	—
ADA (ammonium dihydrogen arsenate)	5.5	13	1.58

* Voltage depends on deuterium content. 99% D₂ corresponds to 2.9 kV.

表 2 $\bar{4}3m$ 点群対称性をもつ結晶の諸定数⁷⁾

	CdTe	GaAs
Refractive index n_0	2.6	3.3
$n_0^3 r_{41}$ (m/V)	$12 \pm 1 \times 10^{-11}$	5.8×10^{-11}
Unclamped electro-optic coefficient r_{41} (m/V)	6.8×10^{-12}	1.6×10^{-12}
Absorption coefficient a (cm^{-1})	0.005 ± 0.002 (Sample 1)	0.012-0.02
	0.007 ± 0.002 (Sample 2)	
$a/n_0^3 r_{41}$, 10^{-10} (V/m ²)	0.5	2
Temperature coefficient of the refractive index ($1/n$) (dn/dt) ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	$+4.4 \pm 0.3 \times 10^{-5}$	$5.67 \pm 0.34 \times 10^{-5}$
Transmission range (μm)	1-30	1-18

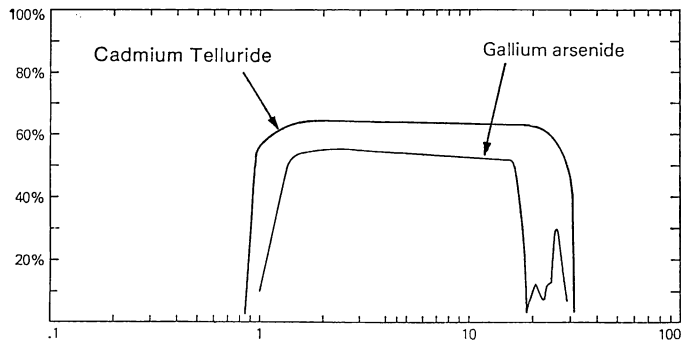


図 4 $\bar{4}3m$ 点群に属する結晶の分光透過率曲線⁸⁾

せる場合が多い⁵⁾。(110)面に直交し、(001)面(x , y 面)に偏光する入射光の x' , y' 成分の位相差は

$$\Gamma = \pi V/V_{1/2}, \quad V_{1/2} = \lambda d / (2n_0^3 r_{41} L) \quad (9)$$

となる。ここで d は電極間距離、 L は入射方向の結晶長である。電界と入射光の方向が同じ KDP の $V_{1/2}$ が L によらないのに対し、この場合結晶長が増加するだけ $V_{1/2}$ は低下する。表 2 と図 4 に $\bar{4}3m$ 群に属する結晶の諸定数と透過率曲線を示す。

実際のポッケルスセルは応答を速くするために工夫がなされている。可視、近赤外域では、入射面に直接金属酸化物(SnO, CdO, InO etc.)を蒸着して電極としていたが、抵抗を低くするため膜厚を厚くすると透過率が下がり光損傷を受けやすいため⁹⁾、最近では円形開口をもったリング電極を使うことが多い⁹⁾。この場合、一様電界を得る工夫がなされている。ポッケルスセルの応答は結晶の応答ではなくむしろ電気回路できまるため、結晶まわりの浮遊容量は極端に低くし、普通インピーダンスが 50Ω になるよう接続されている。

高速光シャッターとして動作させるためには、数 kV から 10 kV の矩形波電圧が必要である。典型的な駆動パルス回路を図 5 に示す。必要な電圧に充電された同軸

ケーブルをスイッチ素子で放電させる。ケーブルはパルス整形回路として働き、パルス幅はケーブル長(1m で 5 ns)によって決まる。スイッチ素子としては、アバランシェトランジスタ^{10,11)}、クライトロン¹²⁾、レーザートリガー半導体スイッチ(後述)¹³⁾、レーザートリガースパークギャップ(LTSG)などが用いられる¹⁴⁾。アバランシェトランジスタスイッチは npn トランジスタをアバランシェ降伏領域で動作させるもので、高い電圧が必要な場合直列で用いる。さらに高電圧が必要な場合、クライトロン回路を用いる。

紫外から近赤外域の偏光子としては方解石のグランプリズムが普通であるが、口径が大きい場合や紫外域では多層膜偏光子を用いる場合がある。この場合消光比(p, s 偏光の透過率の比)があまり高くないため、何枚か重ねて使う必要がある。不純物の少ない方解石を用いれば、250 nm 程度まで十分使用できる。図 6 に KrF (248 nm) レーザー光からポッケルスセルで sub-ns パルスを切り出した結果を示す¹⁵⁾。スイッチとしては LTSG、偏光子としては多層膜偏光子(2枚)とグランプリズムを用いた。

赤外域では一般に半波長電圧が高くなるので、スイ

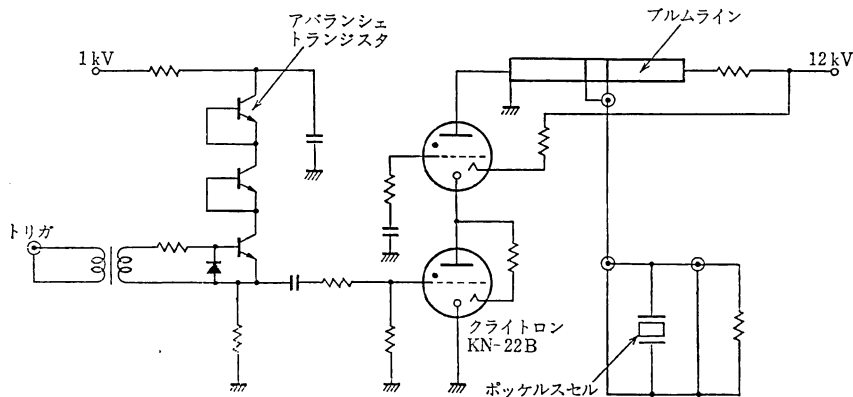


図5 アバランシェトランジスタとクライトロンを用いたポッケルスセル駆動回路の一例¹⁰⁾

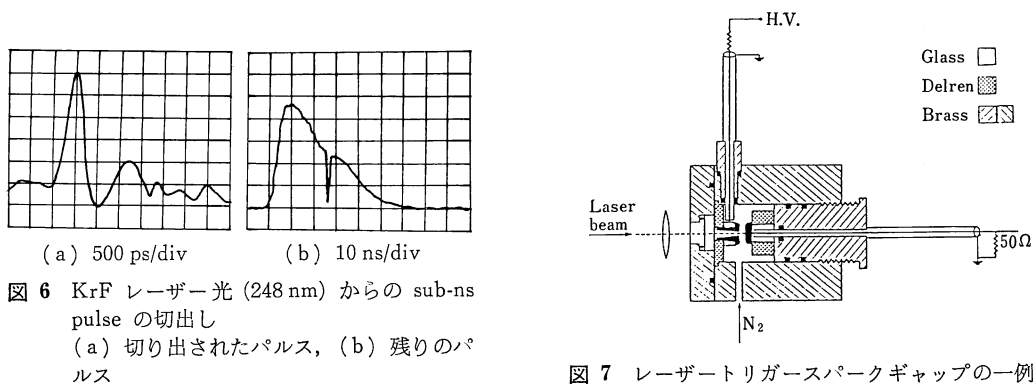


図6 KrF レーザー光 (248 nm) からの sub-ns pulse の切出し
(a) 切り出されたパルス, (b) 残りのパルス

図7 レーザートリガースパークギャップの一例¹⁴⁾

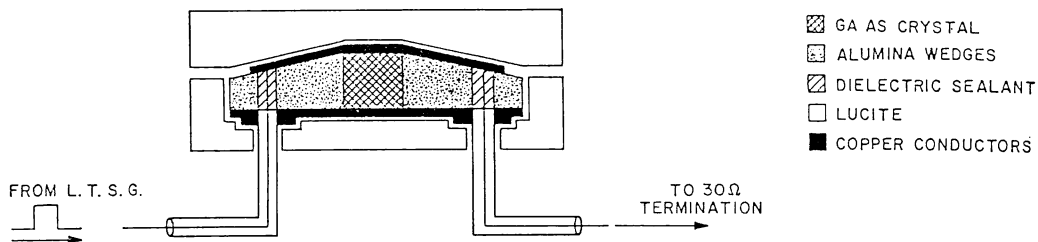


図8 GaAs を用いて, 30Ω にインピーダンス整合されたポッケルスセル¹⁶⁾

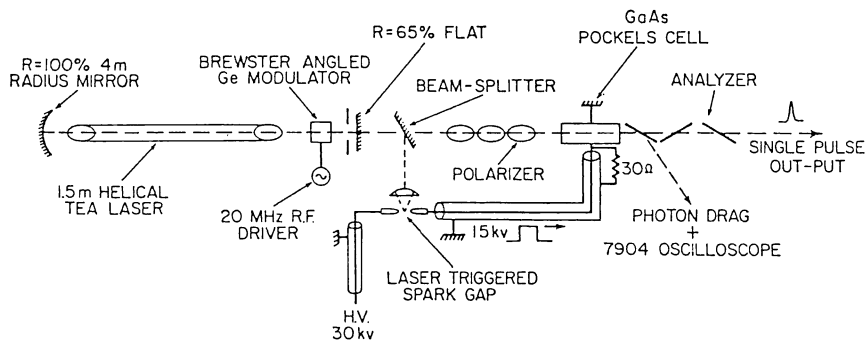


図9 CO₂ レーザーのモード同期パルス列から単一パルスを選択する実験配置図^{16,17)}

ッチ素子としては LTSG を用いる。LTSG の例を図 7 に示す。偏光子としては屈折率の高い Ge や GaAs 板をブリュスター角に数枚重ねたものを用いる。屈折率が 10.6μ で、 4.02 (Ge), 3.30 (GaAs) と高いため一枚当りの消光比が十分高いからである。

図 8 に GaAs を用いて 30Ω にインピーダンス整合されたポッケルスセルの一例を示す¹⁶⁾。図 9 に CO₂ レーザーのモードロックパルス列から単一パルスを選択する実験配置図を示す^{16,17)}。

3. カーシャッター

反軸対称性をもつある結晶や液体に電界を印加すると光学的異方性を示す。結晶の場合、電界が力学的歪みを生じ、電界の 2 乗に比例した屈折率変化(ポッケルス効果は 1 乗)が起きる。液体の場合は双極子モーメントをもつ分子が電界によって平均してある程度方向が整い、異方性が生じ、電界の方向に光軸をもつ一軸性結晶のようにふるまう。電界に垂直な方向から、電界に対し 45° で偏光した光を入射すると、電界に平行および垂直な成分の位相遅れ Γ は¹⁸⁾

$$\Gamma/2\pi = (n_{11} - n_{\perp})l/\lambda = KIE^2 \quad (10)$$

と表わせる。ここで l はセルの長さ、 E は電界、 K はカー定数である。入射光の偏光面から 90° 回軸させた方向に偏光子をおけば透過率は(8)式となる。 K は波長と温度によるが、波長 $5,461 \text{ \AA}$ 、温度 20°C で CS₂ に対し $3.95 \times 10^{-14} \text{ m/V}^2$ 、C₆H₅NO₂ に対し $4.40 \times 10^{-12} \text{ m/V}^2$ である¹⁸⁾。

カー効果を示す媒質に偏光した強いレーザー光を通すと同様な複屈折が現われる。レーザー光の電場に平行と

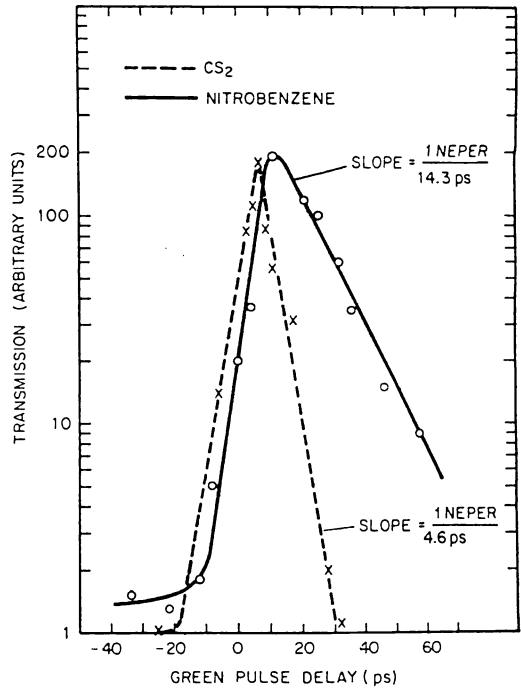


図 11 光カーシャッターを用いて得られた CS₂ と C₆H₅NO₂ の透過率曲線²¹⁾

直角方向の屈折率変化の差は¹⁹⁾

$$\delta n_{11} - \delta n_{\perp} = \frac{1}{2} n_2 \langle E \rangle^2 \quad (11)$$

ただし $\langle E \rangle^2$ はレーザー電場の 2 乗の時間平均、 n_2 はカー効果を表わす定数である。図 10 に光カーシャッターの配置図を示す²⁰⁾。ゲートパルスとして、ps パルスを用いれば、シャッタースピードは媒質のオリエンテ

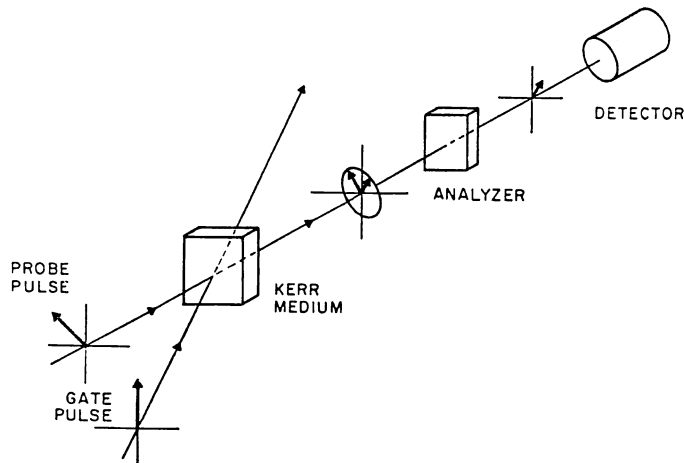


図 10 光カーシャッターの原理図²⁰⁾

ーション緩和できます。図 11 に示すとおり²¹⁾, CS₂ や C₆H₅NO₂ の緩和は非常に速く, おおの 2 ps, 32 ps である²²⁾, n_2 はおのの esu 単位で 2×10^{-11} , 1.5×10^{-11} 程度である²²⁾.

光カー効果は ps 領域のパルス測定や, 時間分解分光の有力な手段の一つである。

4. プラズマシャッター

プラズマの密度が増加するに従い, プラズマに入射する電磁波はほとんど反射もしくは吸収され, 透過しない。プラズマ周波数と電磁波の周波数が一致するプラズマ密度は臨界密度と呼ばれ,

$$n_c = m\omega^2/4\pi e^2 \quad (12)$$

と表わせる。ここで m , e は電子の質量と電荷, ω_0 は電磁波の角周波数である。つまり急激に n_c 程度のプラズマを生成すれば, 光シャッターとして使うことができる。(12)式からわかるように, 波長が長いほど n_c が低いので, より簡単に n_c 程度のプラズマを作ることができる。たとえば, CO₂ レーザー (10.6 μm) では $10^{19}/\text{cm}^3$, YAG レーザー (1.06 μm) では $10^{21}/\text{cm}^3$ である。プラズマを作るにはレーザーや exploding wire が用いられるが, 高速シャッターとして使う場合, 短パルスレーザーが用いられる。図 12 にレーザーによる, ガスブレイクダウンを用いたシャッターの一例を示す^{23,24)}。プラズマを透過した後のパルスの立下り時間は焦点上のビーム広りをプラズマの拡散が横切る時間程度であるから 10 ps 程度である。このようにして得られた立下りの早い 10.6 μm の光パルスを高温の CO₂ 吸収セル中を透過させると, パルスの前半は入射光を打ち消す分極が

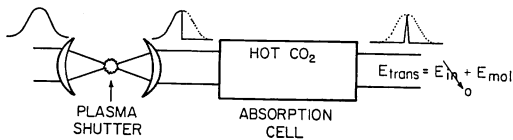


図 12 CO₂ レーザーのガスブレイクダウンと free induction decay を用いたシャッター²⁴⁾

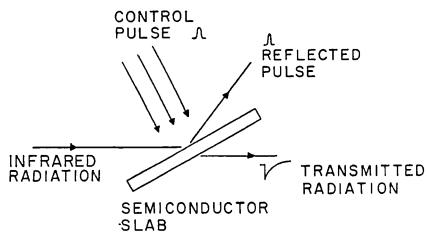


図 13 Ge の表面プラズマを用いたシャッター²⁹⁾

誘起され, 完全に吸収される。ところが入射光が急激に打ち切られると, CO₂ の分極の緩和が追従できず, 緩和時間程度の間, 入射光と位相の反転した光を放射する (free induction decay). この方法で, CO₂ レーザー光で 32 ps のパルス幅が得られている²⁴⁾.

核融合用のレーザーシステムでは, ターゲットからの反射光をさえぎるためアイソレーターとして用いられている^{25,26)}.

類似した原理であるが, 半導体表面の電子-正孔プラズマを用いたシャッターがある^{27,28)}. 図 13 にその原理図を示す²⁹⁾. プリユースター角にセットされた Ge 板に 10.6 μm のレーザー光を入射させ, 入射スポットに別の短パルス光 (色素レーザー, ガラスレーザー etc.) を照射すると, 表面付近 ($< \mu\text{m}$) に臨界密度以上の電子-正孔プラズマが生成され, 短パルスの反射光が得られる。このパルスの立上りはほぼ照射した短パルス光と同じで, 立下りはプラズマの拡散や再結合で決まる。プラズマの減衰はその厚さによって決まり, 短波長のコントロールレーザーを用いたほうが反射光の立下りは早い。この方法で < 30 ps が得られている。この原理は透過にも適用でき透過光の立下りはコントロールレーザーの立上りによって決まる。反射と透過を組み合わせれば, もはやプラズマの拡散や再結合によるパルスのなまりが取り除かれるため, 2 ps の色素レーザー光により 2 ps の 10.6 μm 光が得られている³⁰⁾.

5. 半導体オプト・エレクトロニクススイッチ¹³⁾

このスイッチは正しくいえば光シャッターではなく, 逆に短パルスレーザーによる電子スイッチであり, 働きとしては, LSTG やアバランシェトランジスタ回路と同様, ポッケルスセルの駆動や³¹⁾, ストリークカメラのスキャンに使われる³²⁾. 半導体スイッチの一例を図 14 に示す。高抵抗 ($\sim 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$) の Si ウェーハーに Al を蒸着し, マイクロストランシジョンラインを形成し, 1 mm 以下のギャップを作る。そこに 0.53 μm の ps パルスを照射すると, 電子-正孔ペアが生成され, 導通状態となる。立上りは 10 ps 程度であるが, 立下りはプラズマの再結合が速くないため波尾は一般に長い。そこで 1.06 μm の第 2 パルスを照射すると, penetration depth は 0.53 μm と比べ長いので, 入力側の高圧電極がアースと導通し, 出力側へは電圧が伝わらない。このようにパルスの on, off を波長の異なる 2 個の ps パルスで制御することにより, 数 kV で数十 ps の電圧波が得られる。

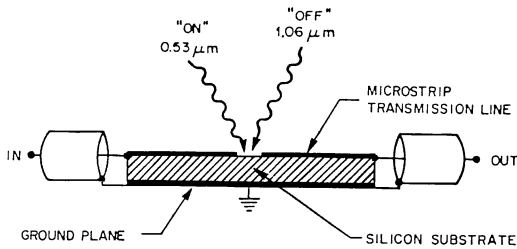


図 14 光トリガー半導体スイッチの原理図¹³⁾

このスイッチはコンパクトで低ジッターであるため、最近時間分解分光に盛んに使われている。

6. その他の光シャッター

前述の高速光シャッターのほか、ファラデーローターや光偏向器も特殊なシャッターとして使用される。ファラデーローターは反射光の逆走防止に広く使われている。ファラデー効果を示す媒質中を偏光した光が通過するとき、偏光の回転角 θ

$$\theta = \nu Hd, \quad (13)$$

ここで ν はヴェルデ定数、 H は磁界の強さ、 d は媒質の長さである。

ファラデー素子の前後に反時計方向に 45° 傾けて偏光子を置く。前の偏光子の方向に偏光した入射光をファラデー素子で反時計回りに 45° 回転させれば後の偏光子を透過する。逆に反射して来る光に対し、回転は時計方向であるから、反射光の逆走は防止できる。ファラデー素子としては Tb^{3+} を添加したホウケイ酸ガラス等が用いられ、大口径なものが可能なため、大出力ガラスレーザーシステムに使われている。シャッターとしての速度は磁場によって規定されるために遅い。

光偏向器を用い、スリット板上に光ビームを高速偏向させると光パルスが得られる³³⁾。最短パルス幅は光偏向器の1スポット掃引時間となる。パルス波形は偏向光ビームの遠視野空間パターンで決まるので、偏向器の後に適当な空間フィルターを置けばパルス波形の成形もできる。

音響光学変調器を用いてキャビティダンピング³⁴⁾や Q スイッチに使った例がある³⁵⁾。音響光学素子の利点は繰り返し動作が可能なことである。

文 献

1) 塩谷繁雄: 化学総説, No. 24, ナノ秒, ピコ秒の化学, 日本化学会編(学会出版センター, 東京, 1979).
 2) 住谷 實, 高木芳弘, 中島信照, 吉原経太郎: 応用物理, 52 (1983) 941.

3) C. V. Shank, R. L. Fork, R. Yen and R. H. Stolen: Appl. Phys. Lett., 40 (1980) 761.
 4) たとえば A. Yariv: *Quantum Electronics* (John Wiley and Sons, New York, 1967) p. 301.
 5) S. Namba: J. Opt. Soc. Am., 51 (1961) 76.
 6) R. Goldstein: Laser Focus, Feb. (1968).
 7) J. E. Kiefer and A. Yariv: Appl. Phys. Lett., 15 (1969) 26.
 8) Laser Focus, 1981 Buyers' Guide (1981).
 9) L. L. Steinmetz, T. W. Pouliot and B. C. Johnson: Appl. Opt., 12 (1973) 1468.
 10) レーザー学会編: レーザーハンドブック (オーム社, 東京, 1982) p. 373.
 11) (a) 加藤義章, 金辺 忠, 中塚正大, 佐々木孝友, 吉川省吾, 都島宏一郎, 武中浩郎, 鷲尾邦彦, 岸田俊二: レーザー研究, 9 (1981) 157.
 (b) I. Matsushima, T. Kasai and M. Yano: Rev. Sci. Instrum., 52 (1981) 1860.
 12) EG & G Application Note K 5503 B-2 (1979).
 13) D. H. Auston: Appl. Phys. Lett., 26 (1975) 101.
 14) A. J. Alcock, M. C. Richardson and K. Leopold: Rev. Sci. Instrum., 41 (1970) 1028.
 15) S. Watanabe: unpublished.
 16) L. F. Champagne, F. O'Neill and W. T. Whitney: Opt. Commun., 11 (1974) 11.
 17) L. F. Champagne, F. O'Neill and W. T. Whitney: Opt. Commun., 13 (1975) 282.
 18) コールラウシュ: 実験物理学, 第3巻, 光学, 久保田広訳 (高工出版, 東京, 1956) p. 316.
 19) D. H. Auston: *Ultrashort Light Pulses*, ed. S. L. Shapiro (Springer-Verlag, Berlin, 1977) p. 157.
 20) E. P. Ippen and C. V. Shank: *ibid.*, (1977) p. 93.
 21) R. R. Alfano and S. L. Shapiro: Phys. Rev. Lett., 24 (1970) 592.
 22) D. H. Auston: *Ultrashort Light Pulses*, ed. S. L. Shapiro (Springer-Verlag, Berlin, 1977) p. 160.
 23) E. Yablonovitch and J. Goldhar: Appl. Phys. Lett., 25 (1974) 580.
 24) E. Yablonovitch: *Laser Interaction and Related Plasma Phenomena*, Vol. 4, ed. H. J. Schwarz and H. Hora (Plenum, New York, 1977).
 25) N. H. Burnett and M. C. Richardson: Rev. Sci. Instrum., 47 (1976) 241.
 26) Lawrence Livermore Laboratory Laser Program Annual Report-1977 UCRL-50021-77 (1977) 2-182.
 27) A. J. Alcock, P. B. Corkum and D. J. James: Appl. Phys. Lett., 27 (1975) 680.
 28) D. B. Corkum, A. J. Alcock, D. F. Rollin and H. D. Morrison: Appl. Phys. Lett., 32 (1978) 27.
 29) P. B. Corkum, A. J. Alcock, D. J. James, K. J. Andrew, K. E. Leopold, D. F. Rollin and J. C. Samson: *Laser Interaction and Related Plasma Phenomena*, Vol. 4, ed. H. J. Schwarz and H. Hora (Plenum, New York, 1977).
 30) P. B. Corkum: *Technical Digest of Conf. on Lasers and Electro-Optics*, Baltimore, Maryland (1979) p. 204.
 31) G. Mourou and W. Knox: Appl. Phys. Lett., 35 (1979) 492.
 32) G. Mourou and W. Knox: Appl. Phys. Lett., 36 (1980) 623.
 33) T. Kobayashi, H. Ideno and T. Sueta: IEEE J. Quantum Electron., QE-16 (1980) 132.
 34) D. Maydan: J. Appl. Phys., 41 (1970) 1552.
 35) R. B. Chesler: Proc. IEEE, 58 (1970) 1899.