

光半導体素子 (CdS) の過渡特性について (第1報)

外部回路条件の過渡特性に及ぼす影響

白崎 智義^{*} 白神 良昭^{**} 藤宗 寛治^{***}

Transient Characteristics of Photo-Semiconductor CdS, (I) The Effect of External Circuit Conditions

Chiyoshi SHIRASAKI Yoshiaki SHIRAGA Kanji FUJISO

The experimental study was made on phenomena observable when transient characteristics of photo-semiconductor was being affected by the external circuit conditions and elements and the following results were obtained;

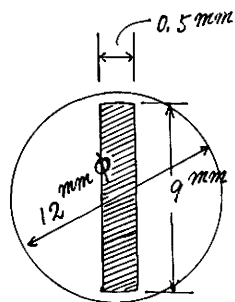
1. The decay time constant was considerably changed by different value of road resistance.
2. Increasing the intensity of light, the amplitude of a. c. component of photo-current increased and then decreased, gradually.
3. D. c. component of photo-current was affected by ambient light.

1. 緒 言

CdS のような不純物を含む光半導体は禁制帯に Trap を有するために、光りの断続照射などの過渡的刺戟に光電流が忠実に従うことができないことは知られている。CdS に光 pulse を照射したときの光電流過渡曲線は立上りと減衰の二部分に分けられ、前者の時定数が後者に比較して大きい特性をもつ場合もあるが、実験に使用した東邦産研製の CdS は後者の方が大きい特性をもっていた。本論文はこの CdS について、過渡特性曲線が外部回路素子やその他の要素との間にどんな関係があるかについて実験的研究を実施したものである。光 pulse の光度を連続的に変化させた場合に過渡曲線の頂点の変動に特異の現象がみられた。過渡曲線の減衰の部分は、光りが弱いときは指数函数的の下り方をしており、光りが強いときは双曲線状に下がるから、従って減衰曲線の時定数は光りの弱いときと強いときを比較した場合、後者は前者より小さいと一般に説明されているが、そうでない場合の現象も認められた。

以上の研究は CdS の特性を利用した測定回路やその他の応用面に対して何等かの参考になるものと考えられる。

2. CdS 光半導体の規格



第1図

使用した半導体光電素子は東邦産研電気株式会社製の CdS で TPM 型-3, No. 4402 である。その感光面の外形は第1図の斜線で示す矩形状であって、多結晶粉末が焼結されてできたものである。これに光りを照射するとき、carrier が結晶体内に励起されるために電導度が増加する現象が現われる。

この型の規格は catalogue によると第1表の通りである。

また特性は次のように発表されている。分光感度曲線によく似ていて、5200 Å において最大分光感度を有する。感光面に光を照射したときの光電流の立ち上がり時間に比べ、照射を停止したときの減衰時間の方が多少長くかかる。

* 内地留学生, 福井県丸岡高等学校教諭

** 助教授

*** 教授

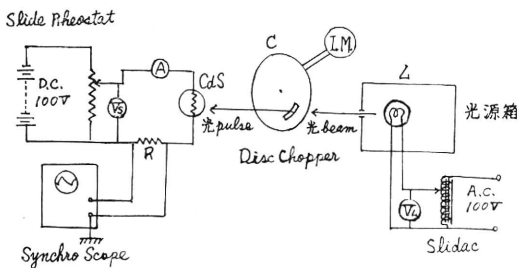
50°C~0°Cの温度変化において、暗電流は大体1/2位に変化する。暗電流は温度により多少相違している、高温では大きく低温では小さい。

TPM型-3の同型であっても、感光素子の感光面積は個々によって多少の相違がある。たとえば、No. 4403は0.5×9mm², No. 4404は1.2×9mm²であった。従って個々によって許容量大印加電圧に多少の相違があるので、規格は実験上の一応の目安として、個々の取扱いに注意した。

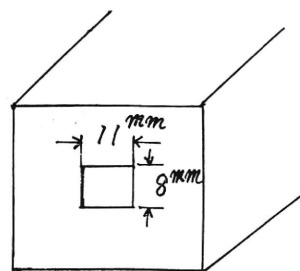
3. 実験とその結果

3.1 実験装置

実験に使用した装置の回路は第2図に示す。Cはdisc chopperで、直径25.2cmのAluminium



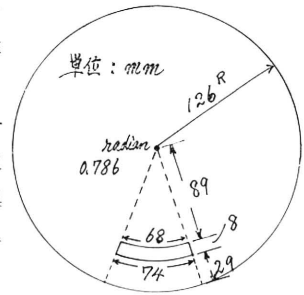
第2図 実験装置



第4図 光源箱の発光窓

円板の周辺近くに光りを通すための小さな穴を作ったものである。(第3図参照) これを Induction motor の shaft に取付けて回転したところ14 10R. P. M. の回転数を得た。従って、これによって得られる光 pulse の周

期は42.6msと算出される。Lはtungsten 白熱電球等の光源を入れるための暗箱で、箱の前面に作った小さな窓から光beamが発光するようになっている。(第4図参照) 光の強さはA. C. 100V 電源に接続したslidacで制御する。CdS 光半導体回路を入れた箱, disc chopper, 光源を入れた箱の三つは第5図のように直線上に配列する。第6図はその写真である。CdS 光半導体はD. C. ammeter と小型固定抵抗Rと直列に接続し、直流



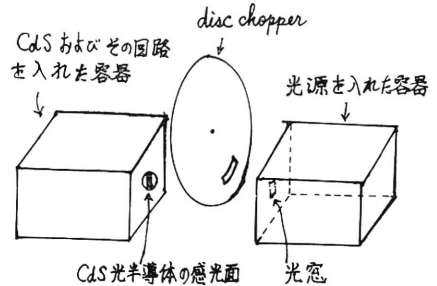
第3図 disc chopper

電源に結ばれる。直流電源は、D. C. 100V battery に rheostat をつなぎ、電圧を可変とした。このRを流れる光電流の電圧降下をSynchro-scopeに入れ、光電流の波形を観測する。

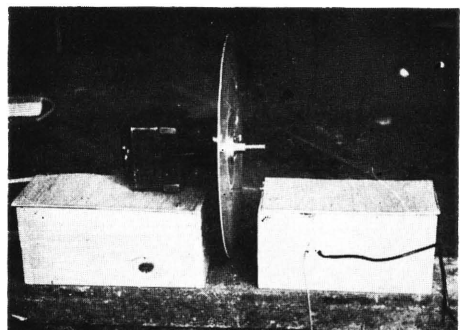
光源箱の小窓より発した光 beam は回転している円板の小穴によって、一定周期で断続され、光 pulse が発生する。これを電界のかかった CdS 光半導体の感光面に照射すると結晶体内で carrire が励起されて CdS 回路に光電流を生じる。従って回路内の負荷抵抗に電圧降下が生ずる。これを利用して光電流を観測す

型 式	TPM-3
100lx における抵抗値 20°C	40kΩ ± 50%
0lx における抵抗値 20°C ※	5 MΩ以上
許容電力連続通電	100 mw
光電流 温度係数 %/°C	0.2 ~ 0.6
暗黒時における許容最大印加電圧	D. C. 200V
感度素子寸法	mm 9φ × 1.0
許容使用温度	C° -40 ~ +50

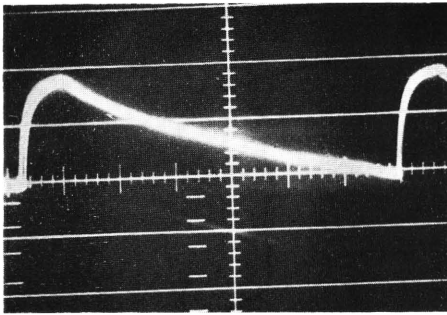
※ 消光1分後において測定



第5図



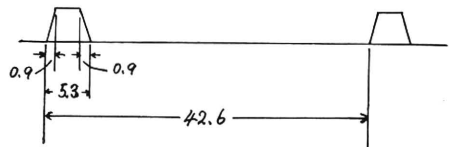
第6図



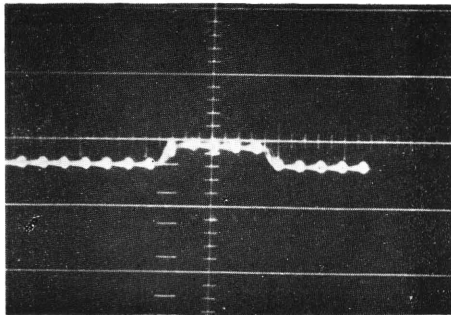
第 7 図 CdS の光電流の過渡曲線
 度計の受光板に置き換えて照度を測定した。勿論光源電圧は曲線観測の際に使用した光源電圧に一致させた。

3・2 光 pulse の波形

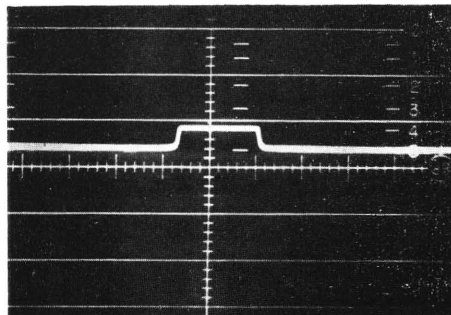
光源箱から発光する光 beam を disc chopper で chop したときにできる光 pulse を第 8 図に示す。光 pulse の周期は 42.6ms で、このうち 5.3ms が照射期間である。pulse 波形は完全な矩形でなく台形を呈していて、立上りと減衰にそれぞれ 0.9ms かかっている。事実、この光



第 8 図 光 Pulse 単位 ms



第 9 図 光電管の光電流



第 10 図 Photo-Transistor の光電流

れた穴に巾 2mm の細巾の黒テープを第 11 図のように貼りつけて、この部分で一瞬光を切るように仕掛けた。これを回転させたときの光電流の過渡曲線は第 12 図、第 13 図に示す。第 13 図は第 12 図に 1 ms の time marker をつけ加えたものである。明らかに曲線上に凹みが二ヶ所見られる。凹みの位置を時間で算出する

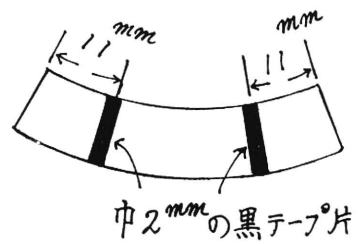
pulse を光電管に受けたときの光電流の波形を観測すると第 9 図に示す通りで、第 8 図の pulse の部分が説明できる。写真の time marker は 1ms である。第 10 図は photo-transistor で同じ光 pulse を受けたときの光電流波形で、これもうまく光 pulse の波形を現わす。
 実験に使用した光 pulse の波形は第 8 図であるが、光電流の過渡曲線は光 pulse の形状、特に pulse 巾によって左右されるので、この点についても調べた。これについては、3・4 にまとめておいた。

3・3 光電流の過渡曲線

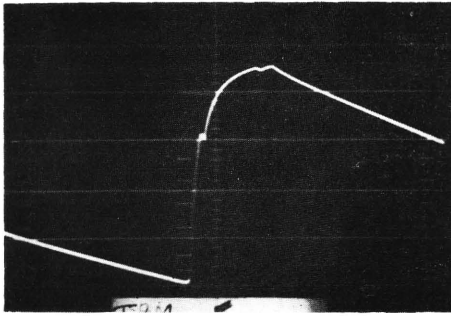
(1) 光 pulse 波形と光電流過渡曲線との時間的位置の対応関係について

光 pulse を CdS 光半導体に照射したときに生ずる光電流の波形の一例はさきに第 7 図に示したが、光 pulse の波形を立上り、平坦、減衰の三つの部分に分けた場合、これからが過渡曲線のどの部分に対応するかを調べた。

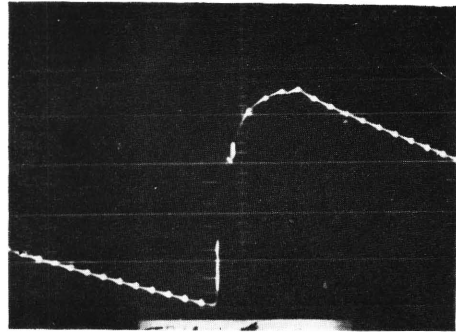
disc chopper の光を通すために作ら



中 2mm の黒テープ片
 第 11 図

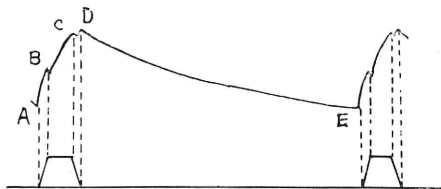


第 12 図



第 13 図

と、光 pulse と光電流過渡曲線との間の時間的な位置の対応関係がはっきりする。これを第14図に図示した。これより次のことが分る。曲線の立上り部分 AD は光 pulse を受けたとき、DE は光を切ったときの現象で、AB は光 pulse の立上りの部分、BC は平坦の部分、CD は減衰の部分に対応する。

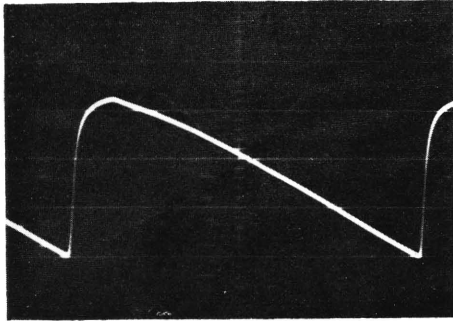


第 14 図 光 Pulse と過渡曲線との時間的位置の対応関係

(2) 立上り時定数と減衰時定数との比較について
実験に使用した光半導体では、曲線の立上り時定数の数値に比較して減衰の時定数の方が割合大きかった。たとえば第16図の立上りの時定数は 0.9ms で、減衰の時定数は 0.024ms で、後者の時定数の方が明らかに大きい。

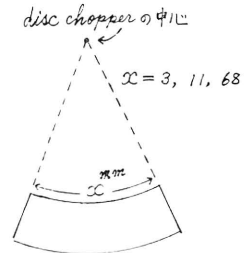
3・4 光 pulse の巾と過渡曲線との関係

CdS 回路の供給電圧を 70V、負荷抵抗を 500k Ω として CdS 光半導体の感光面に一定の光度の光 pulse を照射した。いま、光源箱の光窓の大きさはそのままとし、disc chopper の穴を ④68mm、



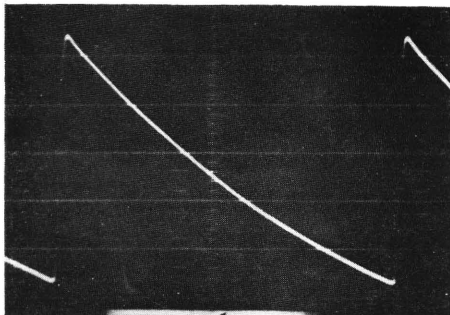
第 16 図 ④ 68mm

⑤ 11 mm、③ 3 mm の三通り用意した。(第15図参照) それぞれの場合の過渡曲線は第16図、第17図、第18図で示される。



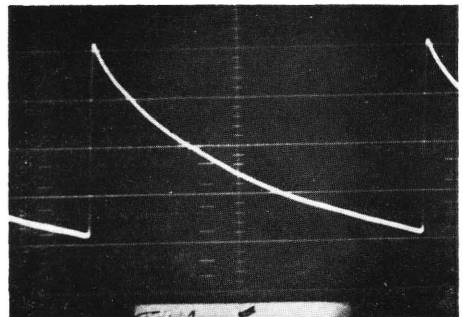
第 15 図 disc chopper の中心

第 19 図は光 beam の断面を X、disc chopper の穴を Y として、それぞれの場合の光 pulse の巾を説明したものである。



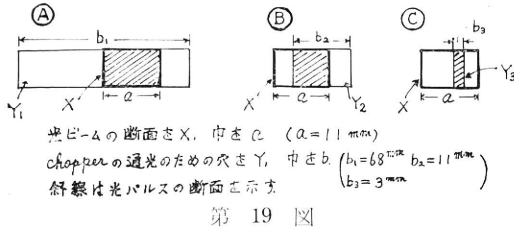
第 17 図 ⑤ 11mm

④ については光 beam の巾 a と chopper の穴の巾 b_1 との間に $a < b_1$ の関係



第 18 図 ③ 3 mm

があるから、結晶面の全域が一定時間一定光度の光を受けている。③については $a=b_1$ の関係がある



から、結晶面が受ける光は一定の強さになることがなく、時間とともに直線的な増と減の変化をする。また照射時間は①より短い。③については $a>b_3$ の関係があるから光度は①に比較して小さくなるが、一定時間その光度を保つ。そして光 pulse の位置が時間とともに移動するから、結晶面での感光部分は一定しない。感光時間はさらに

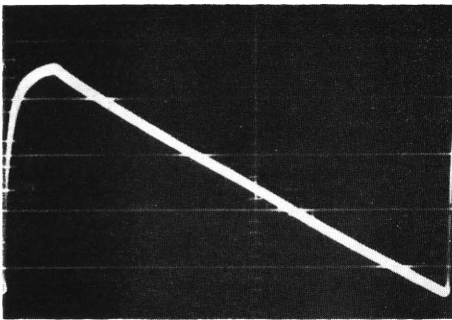
短かくなる。

このように、chopper の穴の中の大きさによって結晶面への光の受け方が異なってくる。

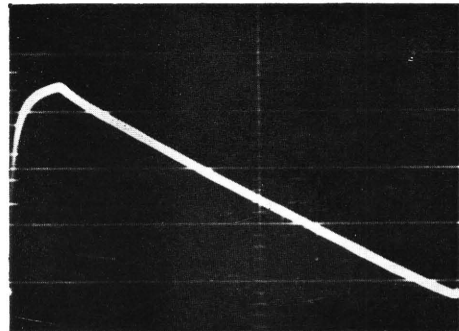
3・5 周囲の光が過渡曲線に及ぼす影響

CdS 光半導体の感光面の周囲がある明るさの状態にあるときには、光 pulse を照射したときの光電流の過渡曲線は次のような影響を受ける。

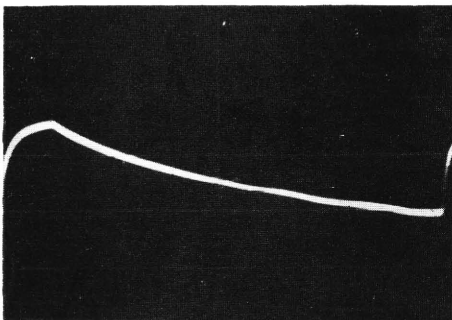
第20図の光電流が流れているときに、光半導体の周囲の明るさを増すと過渡曲線の直流分が増加



第 20 図

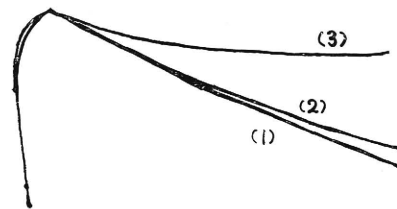


第 21 図



第 22 図

第 23 図



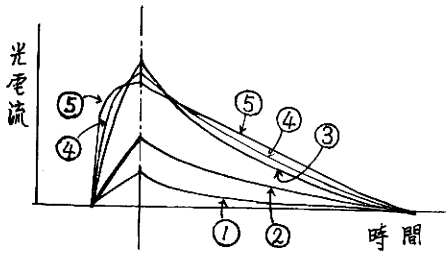
(1), (2), (3) はそれぞれ第20図, 第21図, 第22図を示す。

し、交流分の振巾が小さくなって、第21図, 第22図の順に変形する。曲線の減衰部分の時定数は、周囲の明るさが強くなるに従い小さくなる。この三つの曲線の変形の様子は第23図で示される。これより周囲光の強弱によって直流分の変化が見られるとともに、頂点の位置に変動のないことが分る。

3・6 光の強さと過渡曲線との関係

CdS 回路の負荷抵抗を高い数値におき、電源電圧を一定とする。光 pulse の光度を次第に強くすると、これに応じて光電流の過渡曲線は変形するが、その変形に特異の現象がみられる。即ち、光 pulse の光度を次第に強くすると、曲線の頂点は始めの間は上昇するが、ある光度附近で最高の位

置に達して一時停止のような状態をみせ、そのあと頂点より左側即ち立ち上りの部分が上方にふくらみ上る。さらに光度を強くすると頂点は逆に降下し始め、頂点附近が平坦な状態に近づく現象がみられる。

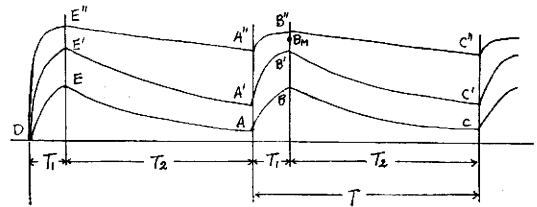


第 24 図 光りの強さによる曲線の変形

E 点で光を切ると曲線 EF に沿って減衰するものと仮定する。いま E 点で光を切ってから充分減衰しきらないうちに、たとえば時間 T_2 後の曲線 EA 上の A 点で第 2 回目の光 pulse が入射し、再び T_1 の間照射すると、曲線 AB に沿って光電流が再度上昇し BC に沿って減衰する。従って、このあと周期 T で、そのうち T_1 の照射

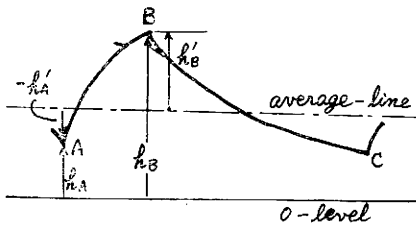
第24図は上述の模様を示したもので、①、②、③、④、⑤の順に光度を強くするとき、曲線の頂点Bは③のときに最高の位置に達し、④、⑤で頂点が降下し、⑤で頂点附近が平坦に近い状態にある。なお、この現象は光電流の交流分の観察においてみられる。

この現象は次のように説明できる。第 25 図において、CdS 光半導体に第 1 回目の光 pulses が時間 T_1 だけ照射したとき、光電流が曲線 DE に沿って上昇し、



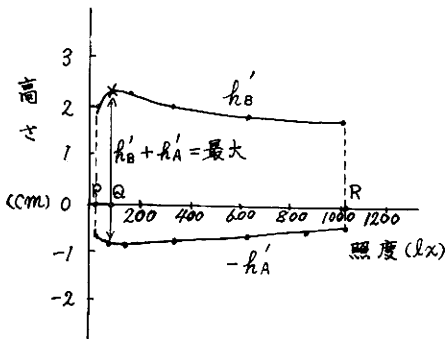
第 25 図

光 pulse の光度を強くすると導電帯の carrier の密度が増加するから、E 点は上昇し、E' 点に達すると考えられる。しかし E 点の上昇には限度があって、ある高さ (図中の E'' 点) 以上には上らない。E' まで引き上げられた光電流の過渡曲線は曲線 A' B' C' の示す波形を繰返す。



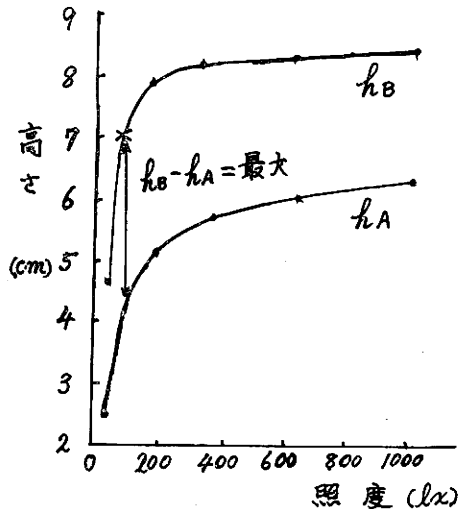
第 26 図

次に第26図の示すように、A, B 2 点の高さを 0-level から測って h_A, h_B , 交流分の平均値からみて $-h'_A, h'_B$ とする。光 pulse の光度を次第に強くしたときの h_A, h_B および $-h'_A, h'_B$ の変化の様子を示した実験例をそれぞれ第27図、



第 28 図

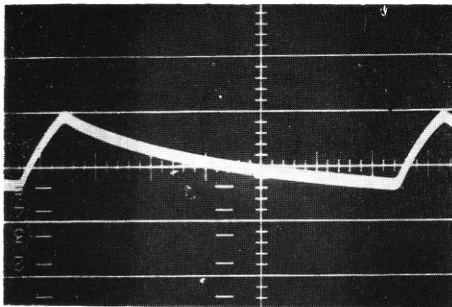
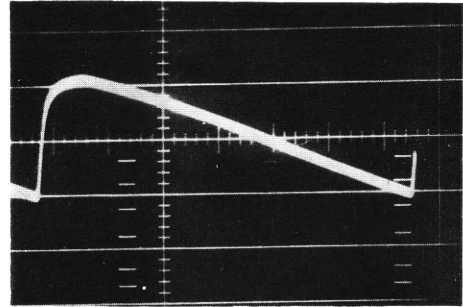
第27図、第28図で示す。synchroscope の signal selection を DC とすれば第27図、AC とすれば第28図が観測できる。第27図では $h_B - h_A$ の差が最大にな



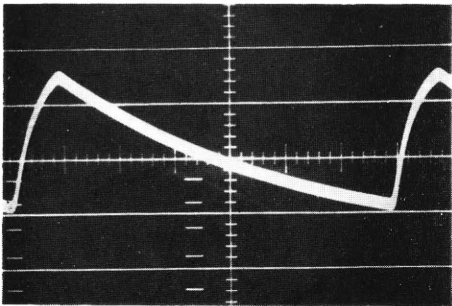
第 27 図

るとき、B 点が第24図の③の場合の曲線の頂点に相当し、また第25図の点 B_M の位置に相当する。第28図では $h'_B + h'_A$ が最大になるときの B 点について、これと同じことがいえる。CdS 光半導体の面における照度が P から Q まで増すと、 $-h'_A$ の増分に比較して h'_B の増分が大きいので B 点の上昇が目立ち、Q 点附近では B 点の高さの変動が微妙であるので scope 上の観測では一時静止しているように見える。Q を越えて照度を大きくするとき $-h'_A$ が僅か変化するのに対して h'_B がかなり降下するので B 点の降下現象がはっきり見られる。

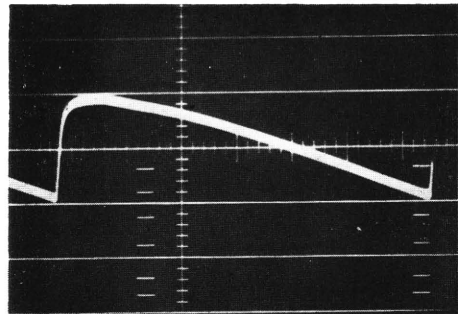
次に観測結果の一例を示す。CdS 光半導体回路の供給電圧を 10V、負荷抵抗を $100k\Omega$ とし、光源に白熱電球を用い、CdS の感光面の照度が 10lx, 20lx, 94lx, 154lx, 296lx のそれぞれの場合の過渡曲線は第29図 (A), (B), (C), (D), (E) を得た。(C) の time marker は 1 ms である。

第29図 R=10Ck Ω (A) 10 lx

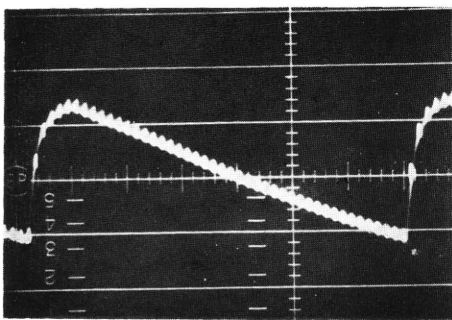
(D) 154 lx



(B) 20 lx



(E) 296 lx

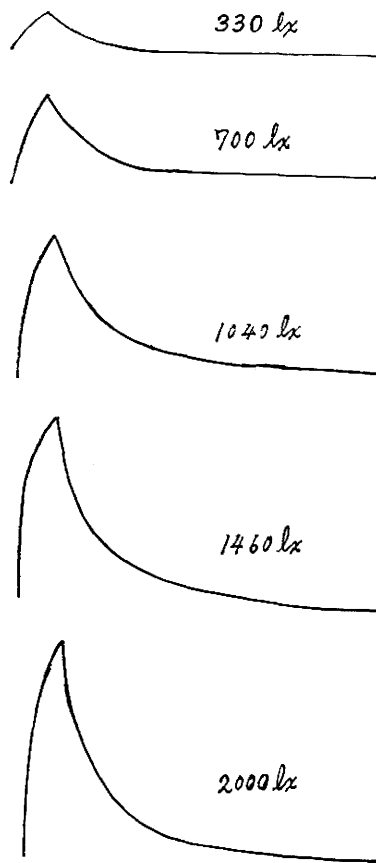


(C) 94 lx

光源として、この他昼光色電球、赤外線電球の場合、また白熱電球からの光線を、青、黄、緑、橙の各色の filter を通して照射した場合についても同じ実験を試みたが、白色光の場合と同じ傾向の結果を得た。

CdS 光半導体回路の負荷抵抗を低い数値とした場合についての曲線の形状変化は次の通りである。負荷抵抗を 750Ω 、供給電圧を 53V とし、CdS 光半導体の感光面に白熱電球を光源とした光 pulse を照射し、その強さを次第に強くしたときの

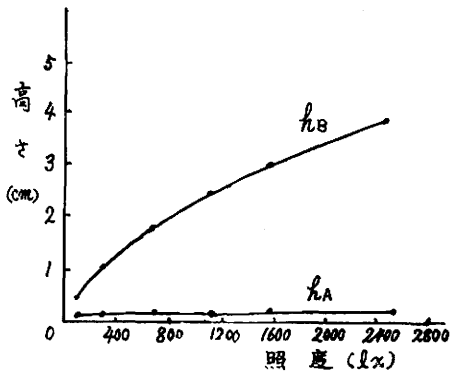
の光電流の過渡曲線を観測する。感光面の照度が 330lx, 700lx, 1040lx, 1460lx, 2000lx の各場合について sketch した結果を第30図に示す。これによれば、光 pulse の光度が強くなるとともに



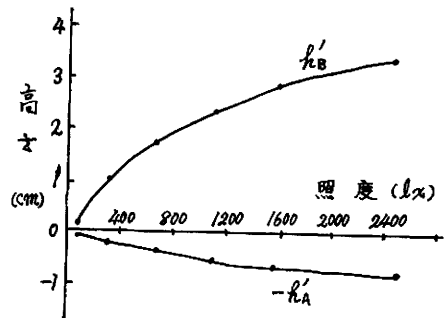
第 30 図 R=750 Ω

曲線の頂点は上昇する。そして負荷抵抗が高い場合のように最高の位置に達して降下するという現象は認められない。

このときの曲線上の2点 A, B の高さの変動は第31図, 第32図で示される。第31図は 0-level から測った場合, 第32図は交流分の平均値から見た場合である。図より頂点 B は光度が強くなるとともに上昇することが分るが, $h_B - h_A$ または $h'_B + h'_A$ が最大になるときが認められない。



第 31 図



第 32 図

曲線の形状は光度が弱いときは指数函数的の曲線に, 強いときは双曲線によく似ている。

単結晶の光半導体に光照射したときの導電帯に引上げられる電子, 密度の増加は

$$dn/dt = Q - Bn(n + M)$$

である。ここで

Q = 光照射によって価電子帯から伝導帯に引き上げられる電子の数

M = 価電子帯近くに存在する不純物準位の密度

n = 伝導帯中の電子密度

B = 再結合確率

いま, 光を切ると

$$Q = 0$$

よって

$$dn/dt = -Bn(n + M)$$

これより, 光りが弱いときは $n = n_0 e^{-BMt}$

光りが強いときは $n = n_0 / (1 + Bn_0 t)$

ただし, n_0 = 光を切ったときの伝導帯の電子の密度

従って, 光りが弱いときは指数函数の曲線状に, 光りが強いときは双曲線状に光電流が減衰すると, 一般に説明されている。

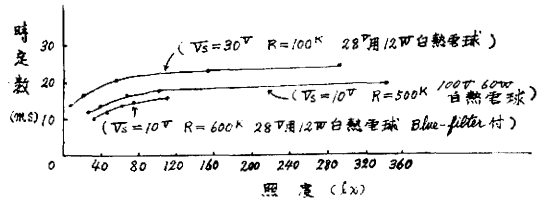
本研究では, 多結晶の CdS を使用して, 回路の負荷抵抗が小さい場合の現象がこれとよく似ていることが分ったが, 負荷抵抗の大きいときは全く違った現象が現われている。このように外部回

路によって現象が異なることが分ったが、これの説明については研究中である。

3・7 光りの強さと減衰時定数との関係

既に、CdSの負荷抵抗を高抵抗にし、供給電圧を一定として結晶体を照射する光 pulse の光度を次第に強くするとき、曲線の形状が変化することを説明した。いま、光度によって変化する減衰曲線の時定数の光度に対する特性を調べると第33図を得た。図中の V_S は供給電圧、 R は負荷抵抗である。光源として図で示すように三種の場合を実験したが、何れの場合も光度を強くすると減衰時定数が大きくなり一定値に近づく。

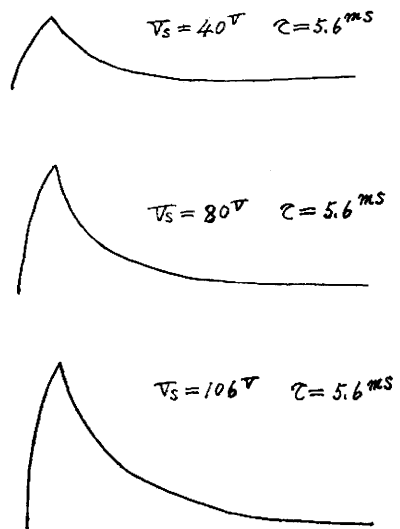
低抵抗が負荷になっている場合については、一例として第34図の結果が得られるが、これは第30図から算出したものである。これによると光りが強くなると時定数が小さくなる。



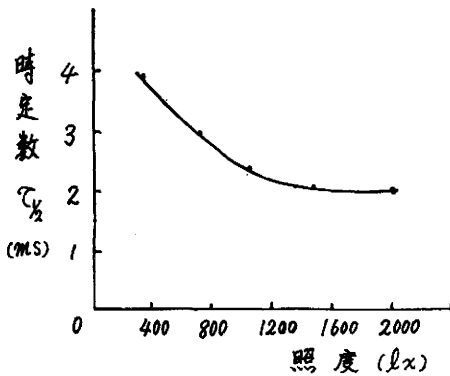
第 33 図

3・8 供給電圧と減衰時定数との関係

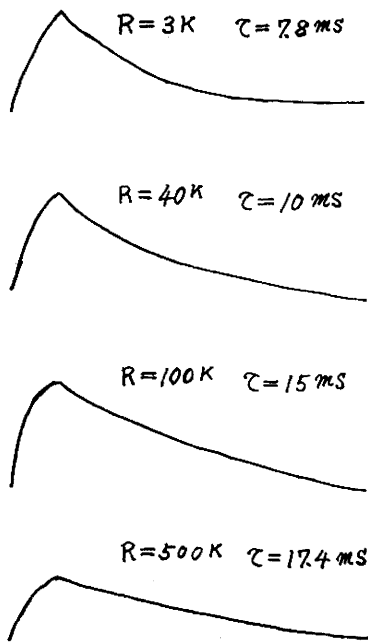
CdS 光半導体に一定限度の光 pulse を照射し、供給電圧を変化したときの光電流の平均値は変化するが、減衰曲線の時定数は一定である。結晶面の照度を 370 lx、負荷抵抗を 3 k Ω とし、供給電圧が 40V、80 V、106V の場合のそれぞれの曲線を第35図に示す。減衰時定数 ($\tau_{1/2}$) は何れも 5.6ms で等しい。



第 35 図 $R = 3 \text{ k}\Omega$, 一定光度



第 34 図



第 36 図 光度、供給電圧一定

これより一般に、減衰時定数は供給電圧の変化に対しては関係することが少ないことが分る。

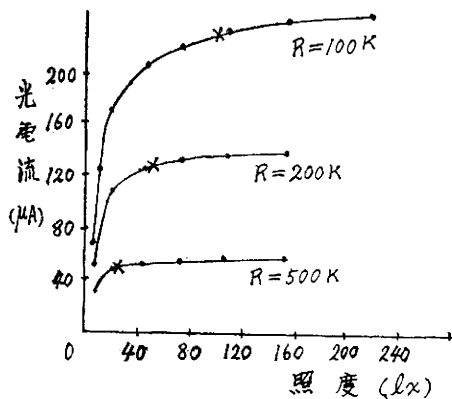
3・9 負荷抵抗と減衰時定数との関係

CdS 光半導体に一定光度の光 pulse (結晶面での照度は 270 lx) を照射し、CdS の供給電圧を 20V に保ち、負荷抵抗に 3 k Ω 、40k Ω 、100k Ω 、500k Ω の各場合を選んだときの過渡曲線は第36図に示される。それぞれの時定数 (τ) を算出すると、図に示す通りである。

これより、負荷抵抗が小さくなると減衰時定数も小さくなることが分る。従って CdS の負荷抵抗を小さくすると、光電流の過渡曲線の減衰の度を強め双曲線の形状に近似させることができる。

3・10 静特性曲線と過渡曲線との関係

CdS 半導体回路の供給電圧を一定とし、負荷抵抗を parameter とするとき、結晶体面を連続照射する光の強さに対する光電流の特性を調べる。第37図は供給電圧を 30V, 負荷抵抗を 100k Ω ,

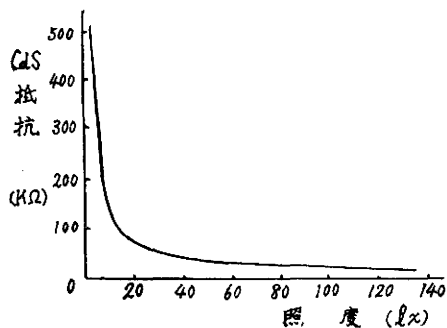


第 37 図 静特性曲線

200k Ω , 500k Ω とした場合の静特性曲線を示す。負荷抵抗が大きいと光電流は小さい値におさえられ、曲線は容易に飽和の状態に近づく。曲線上の X 点はその照度において光 pulse を照射したときの過渡曲線の交流分の振巾が最大で、頂点の位置が最高にあることを示す。X 点が曲線上で占める位置は大体曲線が飽和する一歩手前である。これは 3・6 の実験結果から納得できる。

この場合、CdS の端子電圧は第 38 図の示すように照度とともに変化している。曲線上の X 点の意味は前述と同じである。

また、CdS 抵抗は第 39 図の示すように光の強さとともに変化する。



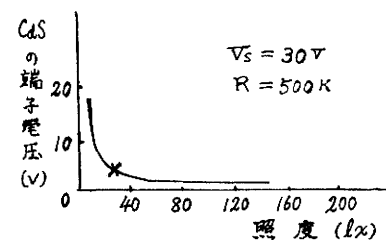
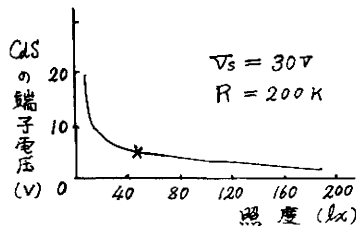
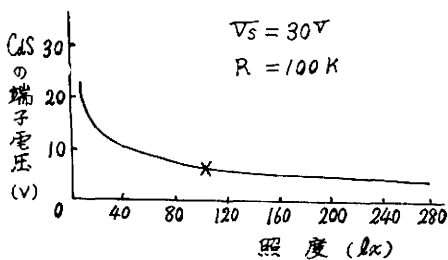
第 39 図

光 pulse によって生じた光電流の曲線の振巾が最大の状態にあるという条件をみたまず光度とそのときの減衰の時定数を、負荷抵抗を parameter として求めた実験結果の一例を第40図に示す。

これより、光度が強くなると、上記の条件をみたまず抵抗値は小さな値をとり、減衰時定数も小さくなること分る。

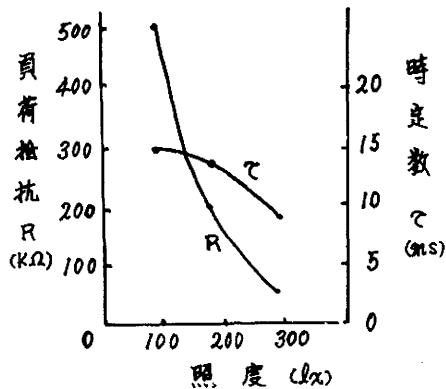
CdS の負荷抵抗を一定値に保ち、結晶体面に連続照射する光の強さに対する光電流の特性を供給電圧を parameter として求める。第41図は負荷抵抗が 200k Ω の場合の静特性光線で、供給電圧 (V_s) が 30V, 50V の場合について測定した結果に基づいている。曲線上の X 点があとも同一照度上にあるところから、負荷が一定の場合、過渡曲線の振巾が最大に達するときの照度は供給電圧の

200k Ω , 500k Ω とした場合の静特性曲線を示す。負荷抵抗が大きいと光電流は小さい値におさえられ、曲線は容易に飽和の状態に近



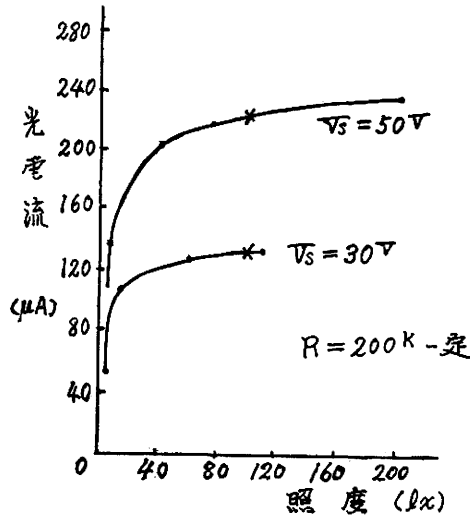
第 38 図

光 pulse によって生じた光電流の曲線の振巾が最大の状態にあるという条件をみたまず光度とそのときの減衰の時定数を、負荷抵抗



第 40 図

大きさに無関係であることが分る。



第 41 図 静特性曲線

4. 結 言

以上、光半導体素子としてCdSを使用した場合の光電流の過渡曲線が外部回路条件やその他の要素によって受ける影響を現象的に追究した。特に実験に使用のCdSは曲線の立上り時定数に比較して減衰の時定数が大きい特性を持っているために、光線の入射時の応答は優れて居るが、光線を切ったときの応答は大変悪い。光を切ったときの曲線の減衰の度を改善して鋭くするための外部回路の条件として、負荷抵抗をある程度小さく、照射光の光度を適度に大とすればよいが、充分満足できる段階には至らない。減曲衰線の時定数は負荷抵抗の大小によって大きく変化する。即ち光 pulse の光度が強いときの減衰曲線の時定数は負荷抵抗が大きいと大きいが、負荷抵抗が小さいと小さくなる。これは超低周波増巾回路に CdS を使用する場合の参考になるものと考えられる。

本研究について御指導と御援助を仰いだ村本浩講師，実験装置の製作に御協力下さった山形一三技官の各氏に深謝致します。

文 献

- 1) 東邦産研電気株式会社，CdS フォトコン規格表
- 2) 酒井善雄，新しい半導体素子，P 88
- 3) 宮地抗一，固体電子工学，P 173
- 4) 渡辺寧，半導体とトランジスタ (I)

(受理年月日 昭和37年11月5日)