

# 放射線像研究

VOL. 6 . No. 1 . (通巻46号) 1976年2月

## \* 目 次 \*

研究会記事・会告 .....	1 頁
特別講演資料	
半導体による放射線像の検出について	
岐阜大学工学部 仁田昌二 .....	5 頁
論 文	
47-1 光子計数法による微弱光の測定	
京都工繊大 小島克之・金森仁志 .....	21 頁
47-3 各種フィルターによるX線特性の変化	
京都大学原子炉実験所 佐藤孝司 .....	24 頁
47-4 R O C 曲線によるフィルム増感紙系の評価	
大阪大学医療短大 山下一也	
大阪大学病院中放 若松孝司・長畑 弘	
岐阜大学工学部 内田 勝・田中嘉津夫・小寺吉衛 .....	30 頁

## 第 4 7 回 研 究 会 記 事

第 4 7 回 R I I 研究会は下記のように開催されました。

日 時 昭和 5 1 年 2 月 2 8 日 ( 土 )  
場 所 名古屋大学医学部附属病院  
特別講師 京都工芸繊維大学 金 森 仁 志 氏  
岐阜大学工学部 仁 田 昌 二 氏

出 席 者 ( 敬称略 )

有村貞実, 伊藤 博, 今川房之助, 内田 勝, 大関修治, 岡部春海, 小川史顕, 小原 健, 加藤 功, 加藤久豊, 金森仁志, 木下幸次郎, 楠本芳二, 小寺吉衛, 小島克之, 斉藤 誠, 佐々木常雄, 佐藤 茂, 佐藤孝司, 鈴木健司, 竹中栄一, 田中嘉津夫, 恒岡卓二, 角田 明, 津山泰子, 永野一夫, 仁田昌二, 橋爪俊幸, 畑川政勝, 速水昭栄, 半崎正隆, 藤田広志, 長谷川 伸, 松本義一, 松本誠二, 三浦典夫, 山岡信行, 脇方妙子, 他数名

プログラム ( \* 印のものは本誌に論文が掲載されています。 )

特別講演

- 1) 南米の印象 ( 第 3 回光散乱国際会議報告 ) 京都工芸繊維大 金 森 仁 志 氏  
\* 2) 半導体による放射線像の検出について 岐阜大学工学部 仁 田 昌 二 氏

研究発表

- \* 1) 光子計数法による微弱光の測定 京都工繊大 小島 克之・金森 仁志  
2) 放射線画像系における粒状性の管電圧特性  
岐阜大・宮崎県立宮崎病院 \* 藤田 広志・鈴木 健司  
小寺 吉衛・稲津 博・田中嘉津夫・内田 勝  
\* 3) 各種フィルターによる X 線特性の変化 京都大学原子炉実験所 佐藤 孝司  
\* 4) R O C 曲線によるフィルム増感紙系の評価 大阪大学医療短大 山下 一也  
大阪大学病院中放 若松 孝司・長畑 弘  
岐阜大学工学部 内田 勝・田中嘉津夫・小寺 吉衛  
5) ガンマ線シンチレータパルス波形の一測定法  
日立電子・三井記念病院 \* 山口 奉頼・秋貞 雅祥 \*  
木下幸次郎

6) 胸部X線診断情報処理システムについて

京都府立医大 小川 史顕・岡部 春海

前田 知穂・村上 晃一

島津製作所医用電子機器工場 山岡 信行

7) 左室容積測定法

北里大学 池田 裕之

日立電子 山口奉頼・木下幸次郎

# 会 告

## —— 第 4 8 回研究会について ——

第 4 8 回研究会は下記のように開催いたします。

日 時 昭和 5 1 年 6 月 1 9 日 ( 土 )  
場 所 東 京

## —— 会 費 に つ い て ——

昭和 5 1 年度分会費をお納め下さるようお願いいたします。できるだけ振替を御利用下さい。

納 入 先 振替 東京 1 - 1 5 1 9 8 0  
放射線イメージ・インフォメーション研究会  
5 1 年度会費 1, 5 0 0 円

なお、振替で御納入の分については、会として領収書を発行せず、郵便局の領収書を以てこれにかえます。

## —— 新 入 会 員 ——

下記の方々を会員として迎えました。

氏 名	〒	勤務先及び所在地	T E L
松 本 誠 二	2 5 0 - 0 1	富士写真フィルム株式会社足柄研究所 南足柄市中沼 2 1 0	0 4 6 5 - 7 4 - 1 1 1 1
山 本 真 司	1 8 5	株式会社日立製作所中央研究所第四部 国分寺市東恋ヶ窪 1 - 2 8 0	0 4 2 3 - 2 3 - 1 1 1 1
坂 本 清	6 6 2	兵庫医科大学中央放射線部 西宮市武庫川町 1 - 1	0 7 9 8 - 4 5 - 6 2 5 8
中 村 薫	1 9 6	日本電子株式会社電子光学事業部開発部 昭島市中神町 1 4 1 8	0 4 2 5 - 4 3 - 1 1 1 1
竹 村 等		同 上	

## 住 所 変 更 等

氏 名	〒	勤 務 先 新 住 所	T E L
秋 貞 雅 祥	3 0 0 - 3 1	筑波大学附属病院放射線部 茨城県新治郡桜村大字妻木	0 2 9 8 - 5 3 - 3 7 7 0
木 内 繁	9 9 0 - 2 3	山形大学病院放射線科 山形市蔵王飯田西の前	
斉 藤 誠	1 7 1	東京都豊島区長崎保健所 東京都豊島区長崎3-6-24	0 3 - 9 5 7 - 1 1 9 1
鈴 木 正 吾	9 8 0	東北大学医療短大放射線技術学科 仙台市星陵町2-1	0 2 2 2 - 7 4 - 1 1 1 1
中 島 緑 彦	1 5 7	NHK TOCフィルム現像室 東京都渋谷区神南2-2-1	
平 城 実	2 5 0	大日本塗料㈱ 小田原市成田1060	0 4 6 5 - 3 6 - 1 1 1 1
穂 森 敏 晴	8 9 4	県立大島病院放射線科 名瀬市真名津町18-1	

## 常 任 委 員 会 議 事 録

日 時 昭和51年2月28日(土)

場 所 名古屋大学医学部附属病院

- ① 51年1月よりの郵便料金値上げに伴ない、会員宛通信費(演題伺い、プログラム、雑誌送料)が従前の約3倍となった。これに対処して複数の加入者の職場に対してはまとめて送付することとし、職場ごとに代表者を選定した。
- ② 以上の処置に伴い、会員関係の窓口を一元化するため雑誌印刷を東京に移すこととした。
- ③ 以上の措置によっても会計面で不足が予想されるため、51年度より年会費を1,500円とするを次回総会にはかることとした。

## 半導体による放射線像の検出について

岐阜大学工学部電気工学教室 仁田昌二

### 1. 序

半導体検出器は、入射粒子エネルギーと出力パルス波高値間の比例性、分解能などにすぐれ、値段も比較的安い等、他の検出器にくらべて素晴らしい特徴をもっている。各種放射線と物質（半導体）の相互作用は大変興味あるテーマであるが、こゝでは、放射線が半導体中に、電子-正孔対を作るものとして話をすすめることにする。

半導体の検出器で受けた信号は、増巾器中の半導体回路、システム等によって処理されるが、回路関係についての話は省略する。また、放射線によって出来る格子欠陥（放射線損傷）は、検出器の寿命という観点および基礎的にも大変興味あるテーマであるが、この点についても、話を省略することにする。

こゝでは、まず半導体の一般的な内容について述べ、その内容にもとずき、半導体検出器について述べ、最後にその他の半導体による放射線の検出方法を2、3述べる。

### 2. 半導体

半導体の電子の性質を理論的に考えるのに、主に次の3通りの方法がある。

(a)バンド理論的方法、(b)確率的運動論および、(c)化学結合論を基礎とするもの、である。(a)と(b)は従来良く用いられているので、通常の半導体テキストに良くみられる方法である。(c)の化学結合を基とする方法は最近注目をあびてきた方法である。こゝでは(c)の方法にもとずき説明する。<sup>1) 2)</sup>

図1は、現在最も代表的半導体であるゲルマニウム(Ge)やシリコン(Si)等のテトラヘドラム半導体の電子状態と原子の電子状態の関係を示す。原子ではS状態に2ケの電子がつまり、少しエネルギーの高いところに6ケのP-状態があって、2つの電子が占めている。これらの原子は共有結合をするとき、いわゆる化学結合の手を4本持った混成状態(hybridized states)を作る。そのエネルギーはP状態とS状態の間である。この8つの混成状態には4つの電子が入っている。各原子当り4つの価電子が共有結合を作ると、それらの電子は、より安定した状態となる。これを結合性状態(bonding states)と呼ぶ。それと同時に、各原子当り4つの残りの状態は、反結合性

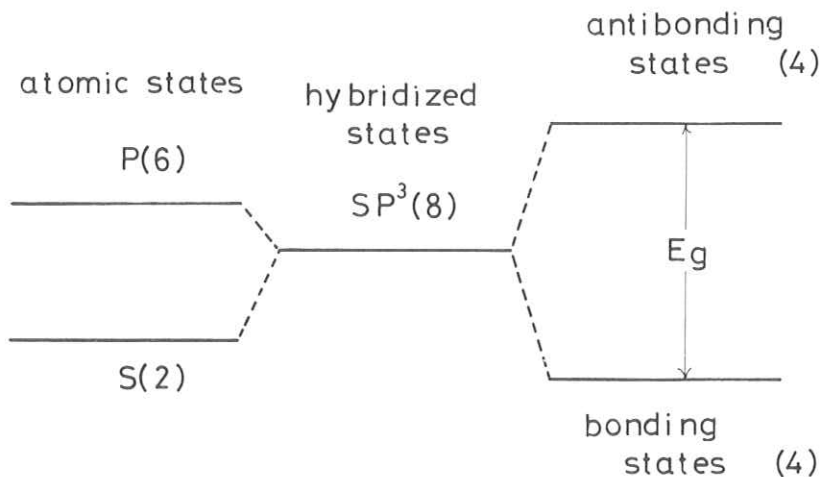


図1. Tetrahedral Semiconductor (Kastner, 1972)<sup>(2)</sup>

状態 (antibonding states) を作る。この状態には通常電子が入っていない。両状態ともエネルギー的にバンド状に広がっている。結合状態が価電子帯を作り反結合状態が伝導帯を作る。価電子帯に電子が一杯つまっている状態は、電子を励起できる状態が見つからないので電子を加速出来ず、電気伝導に寄与しない。しかし、放射線等で価電子帯の電子を反結合性状態の作る伝導体に励起すると価電子帯には電子のぬけ穴 (正孔と呼ぶ) が出来、それによって価電子帯内での電子の加速が出来る。この沢山の電子による電気伝導は正荷電をもった粒子が1個運動するのと等価となり、電子のぬけ穴を正孔と呼ぶ。伝導帯に励起された電子も同様に、電気伝導に寄与する。

図2はM属のS,

Se, Te が入ったカルコゲナイド半導体の電子状態の説明図である。この場合、共有結合を作らないP状態 (ローン対状態) は結合が出来た後もエネルギー状態はあまり変わらず、

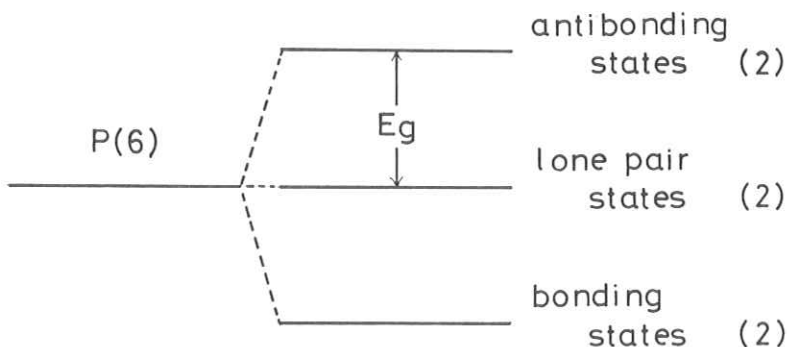


図2. Chalcogenide Semiconductor (Kastner, 1972)<sup>(2)</sup>

これが電子で占められている最も高いエネルギー帯となるので価電子帯を作る。伝導帯はこの場合もやはり反結合性状態を作る。

図3にはIV価のGe中にIII価のInおよびV価のAsが入ってn型およびp型半導体を作る様子を示す。(a)、(b)では簡単に書いた格子は実際には(d)の構造をもとに、トポロジー的には(c)の様な単位を元にして、結晶格子を作っている。

伝導帯と価電子帯のエネルギー間隔  $E_g$  は等方性結晶におきかえた間隔で考えると、共有結合にもとづくものは Penn 間隔  $E_n$  で与えられる。<sup>(3)</sup> イオン結合の成分と共有結合の成分を矛盾なく取り扱う方法は J. C. Phillips によって明らかにされ、<sup>(4)</sup> 大成功をおさめた。

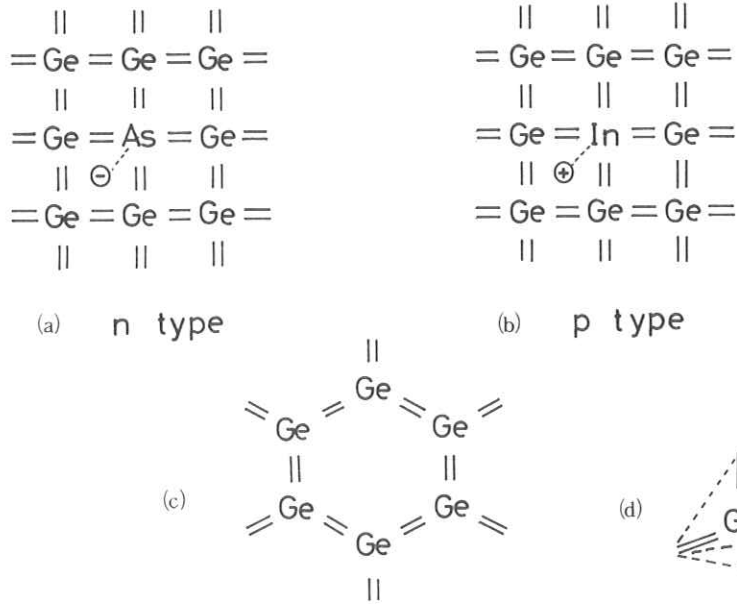


図3. n型およびp型半導体と構造

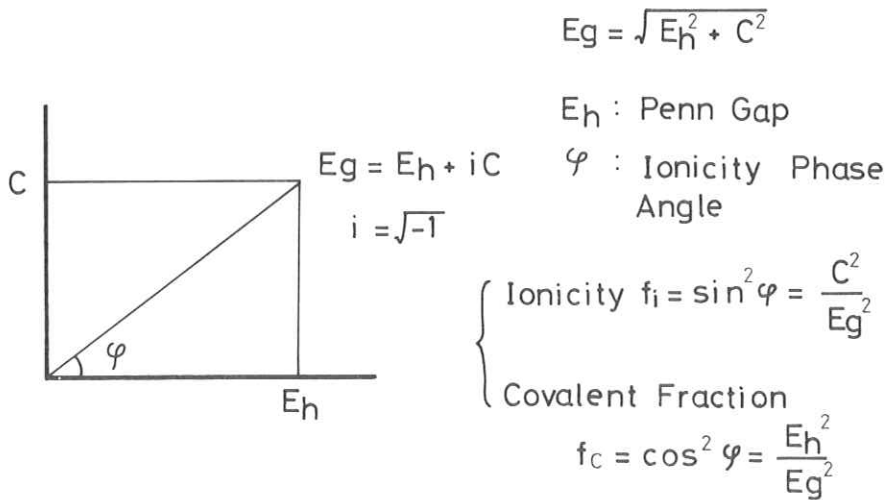


図4. Ionicity and Covalent Bond (J.C. Phillips, 1970)<sup>(4)</sup>



図 4. に結果を示したように、 $E_g$  は

$$E_g = E_n + iC \quad \dots\dots\dots (1)$$

$E_n$  : Penn 間隔  
 $C$  : イオン成分にもとづく間隔

で与えられ、イオン成分の割合 (Ionicity)  $f_i$  は次式で示される。

$$f_i = \frac{C^2}{E_g^2} = \sin^2 \varphi \quad \dots\dots\dots (2)$$

$\varphi$  : イオン性位相角

テトラヘドラル半導体は元素半導体 (IV 属) の Ge、Si を中心に III-V 属化合物半導体の GaAs 等、II-IV 属化合物半導体の CdS、CdTe 等が主なものであるが、Ge、Si は完全に  $E_n$  のみで  $E_g$  がきまり、GaAs 等ではイオン性が少し入り、CdS、CdTe ではイオン性が大きくなる。従来 Pauling 等の化学結合論<sup>(5)</sup> では  $f_i$  の定義があいまいで、 $f_i$  と結晶構造の相関は完全ではなかったが、Phillips による  $f_i$  の定義によって  $f_i$  と結晶構造の相関は完全になった。<sup>(4)</sup>

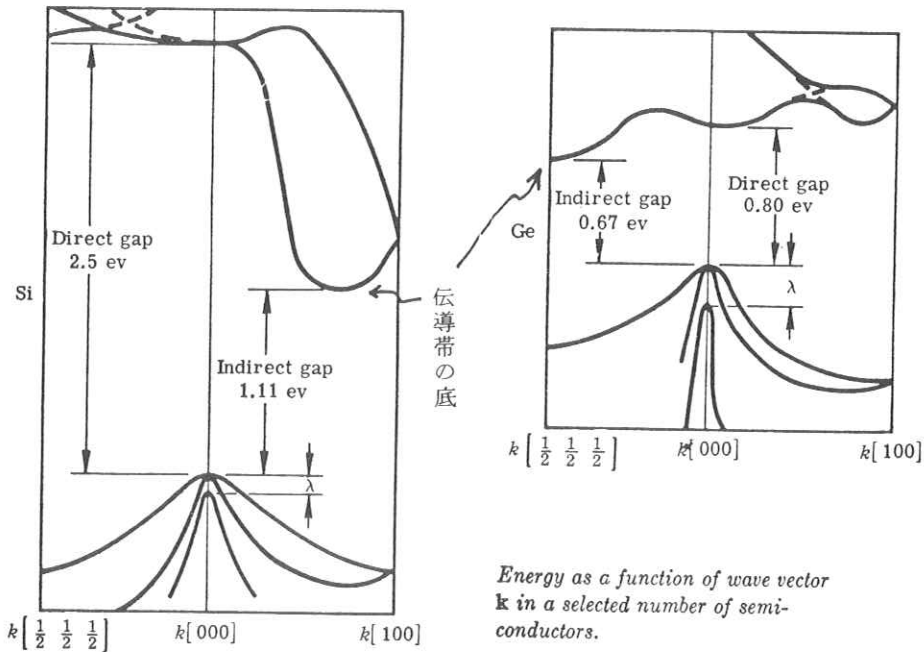


図 5. Ge と Si のエネルギー帯<sup>(6)</sup>

図5にGeとSiの波数 $k$ とエネルギー $E$ の関係(エネルギー帯)を示す。 $k$ は運動量に関係した量である。価電子帯の頂上は $k=0$ の位置にあるが、伝導帯の底は $k \neq 0$ であるから、伝導帯の底から価電子帯の頂上へ電子が移るには、エネルギーと運動量を保存するために、フォノン(格子振動の量子)等の助けが必要である。このような半導体を間接遷移型半導体(Indirect Gap Semiconductors)と呼ぶ。

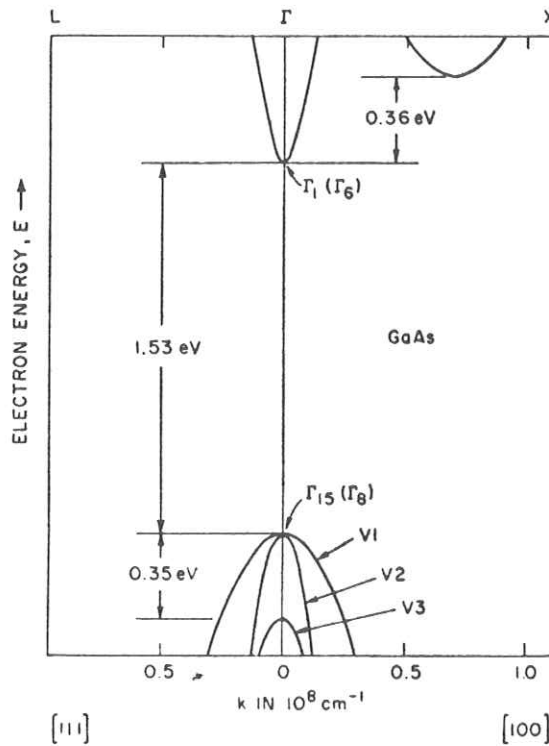


図6. GaAsのエネルギー帯<sup>(7)</sup>

図6にⅢ-V化合物半導体の代表としてGaAsのエネルギー帯を示した。この場合、伝導帯の底と価電子帯の頂上が一致して $k=0$ のところにある。このような半導体を直接遷移型半導体(Direct Gap Semiconductors)と呼ぶ。

図7のCdTe(Ⅱ-VI属化合物半導体)も、同様に直接遷移型の半導体である。

直接遷移型半導体は、伝導帯から価電子帯に電子が遷移するときにフォノン等の助けをかりずに直接遷移できるため、遷移の確率が大きくなる。このためレーザーとか発光ダイオード等への応用に、GaAs等が用いられる。

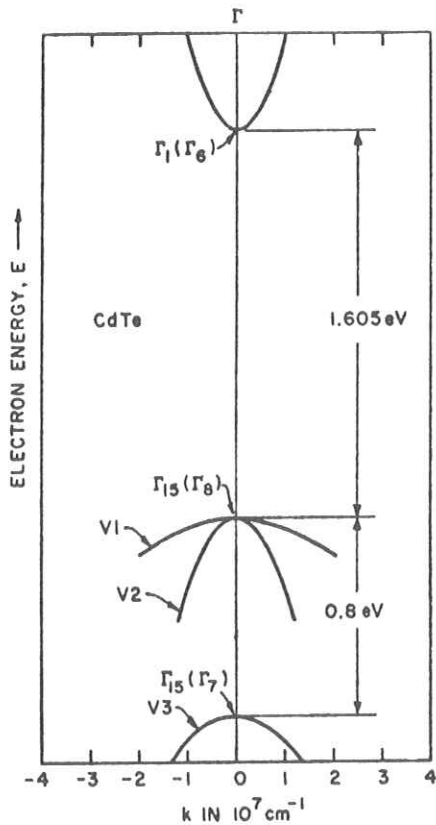


図7. CdTeのエネルギー帯

表1. Ge, Si 中の浅い不純物単位<sup>(8)</sup>

Impurity element	$E_0$ (eV) <sup>a</sup>	
	Thermal	Optical
In silicon	Li	0.033(7)
	P } Donors	0.041(7) 0.045(11)
		As
	Sb } Donors	0.039(7) 0.043(10)
		Bi
	In germanium	B
Al } Acceptors		0.057(7) 0.067(9)
		Ga
In		0.16 (7) 0.154(9)
In silicon		P } Donors
	As	0.0127(6)
	Sb	0.0096(6)
	B	0.0104(6)
	Al } Acceptors	0.0102(6)
		Ga
In	0.0112(6)	

a: Numbers in parentheses refer to footnote references in text.

表1にGeとSi中の浅い不純物単位の性質を示す。<sup>(8)</sup>これらの不純物はLiを除きGeまたはSiとおきかわって、図4で示したような形でドナーまたはアクセプタとして働く。LiはIb属の小さな原子で格子間に入り、ドナーとしての働きをする。格子間に入ることと、原子半径が小さいためLiは拡散しやすい。この性質は半導体検出器を作る上から非常に重要である。

浅い不純物はトランジスタ他への応用に非常に重要であるが、種々の不純物は深い不純物単位を作る。Ge中の深い不純物単位の例を図8に示す。<sup>(8)</sup>放射線等でも作られる格子欠陥も深い単位を作る。これらは電子または正孔を一時トラップするトラップ単位として働いたり、また伝導帯の電子が価電子帯の正孔と再結合するときに重要な再結合中心として働く。

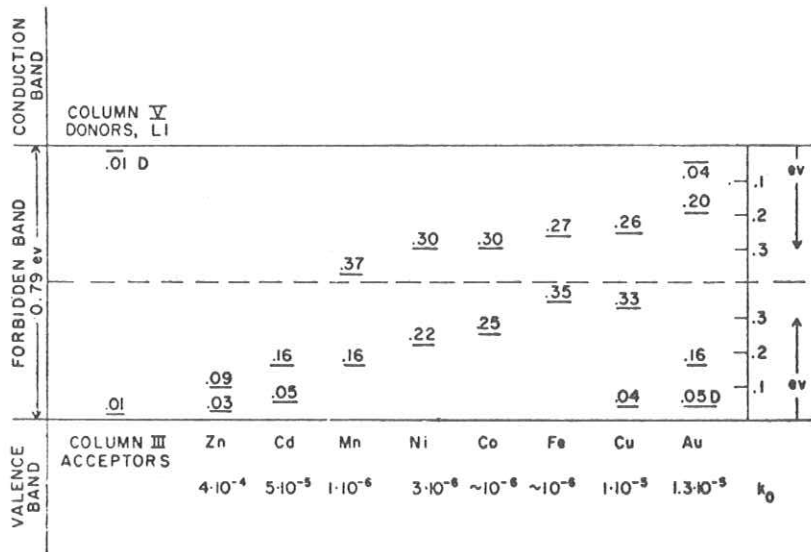


図8. Ge 中の深い不純物<sup>(8)</sup>

### 3. 半導体検出器

半導体検出器は大別して、バルク型と接合型に分類することができる。

#### 3-a. バルク型半導体検出器<sup>(9)(10)</sup>

図9. にバルク型半導体の模型図を示す。半導体のバルクの両端にオーム接触電極をつけ約  $10^3 \text{ V/cm}$  程度の電界を印加する。放射線が当たっていない時にも暗電流が流れるが、これは小さいことが望ましい。放射線によって電子-正孔対が作られると、電界によって各々正、負の電極方向にドリフト速度  $v_d = \mu E$  で運動する。〔 $\mu$ ：移動度、 $E$ ：電界〕。途中

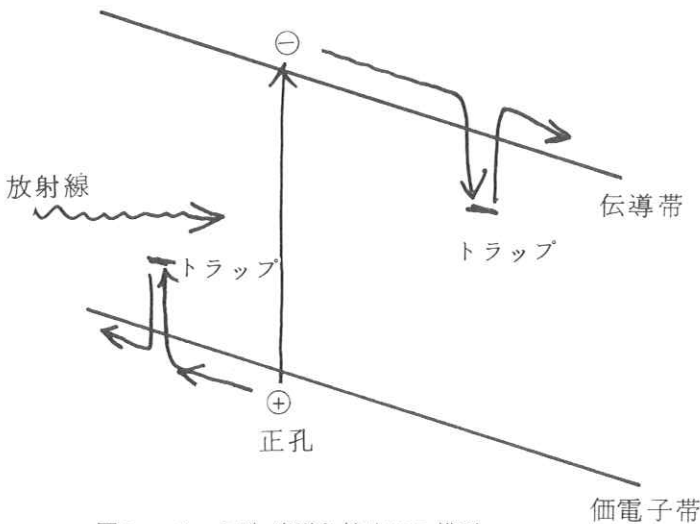


図9. バルク型 半導体検出器の模型

でキャリア（電子 and/or 正孔）は再結合したり、トラップ準位につかまり、しばらくしてから再び伝導に寄与する。トラップにつかまったキャリアは空間電荷を形成し、外部電界を弱める。

以上、暗電流を小さくおさえ、 $v_d$ を大きくし、トラップの影響をさけるためには、(a)結晶の純度を上げる。(b)印加電界を上げる。(c)compensationによって抵抗を上げる。(d)低温に冷却して、抵抗を上げる。等が必要になる。抵抗を大きくすることは暗電流を小さくし、また大きな電界が印加できるために必要である。暗電流を $\mu A$ 程度以下におさえ、 $10^3 V/cm$ を印加できるためには、抵抗率 $\rho = 10^9 \Omega-cm$ 程度またはそれ以上にしなければならない。また結晶を出来るだけ完全なものにし、大きなライフタイム $t_e$ をもつようにする。また材料としては、大きな移動度 $\mu$ をもつことが必要である。

(9)(11)  
3-b. 接合型放射線検出器

接合には Pn 接合型のものと金属-半導体接触型 (MS 接合型) のものがあるが、主に pn 接合型のものを中心に述べる。

図 1 0. に pn 接合の模型とその中でキャリア、不純物分布および空間電荷の分布を示す。空乏層は、不純物の無い場合よりも抵抗が高く、この領域に放射線が電子-正孔対を作りそれを両端に集めて検出する。したがってこの空乏層を厚くする必要がある。このために検出器では逆バイアス  $V_a$  を加える。よく用いられる  $n^+ - p$  型の空乏層の厚み  $d$  は次式で与えられる。

$$d = \sqrt{\frac{E_0 (V_0 + V_a)}{2 \pi P_p e}} \dots\dots\dots (3)$$

ここで  $V_0$  は固有障壁ポテンシャル、 $E_0$  は誘電率、 $P_p$  は p 型領域の正孔密度である。

実際に用いられる pn 接合型の寸法例とその空間電荷分布を図 1 1 に示す。これは p 型 Si

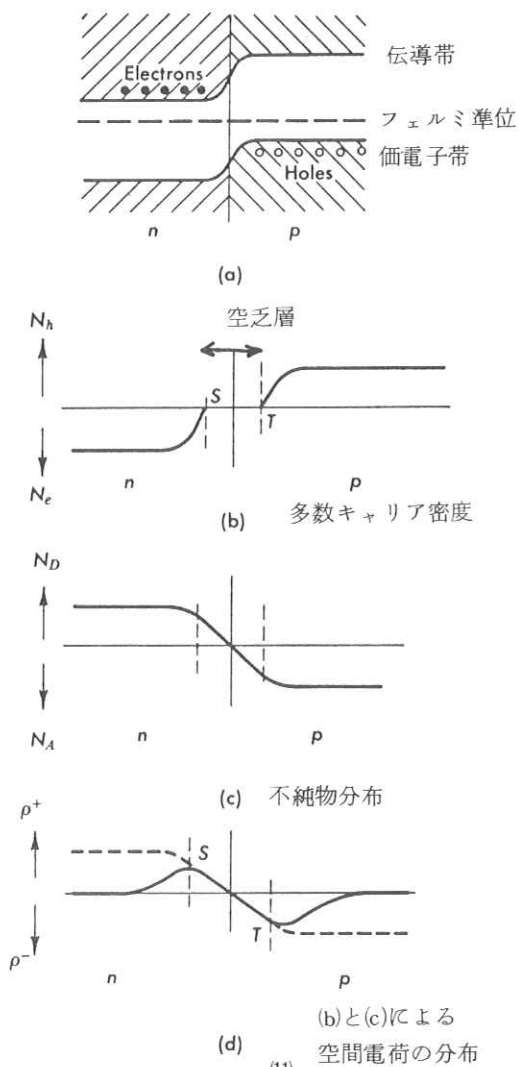


図 1 0. pn 接合

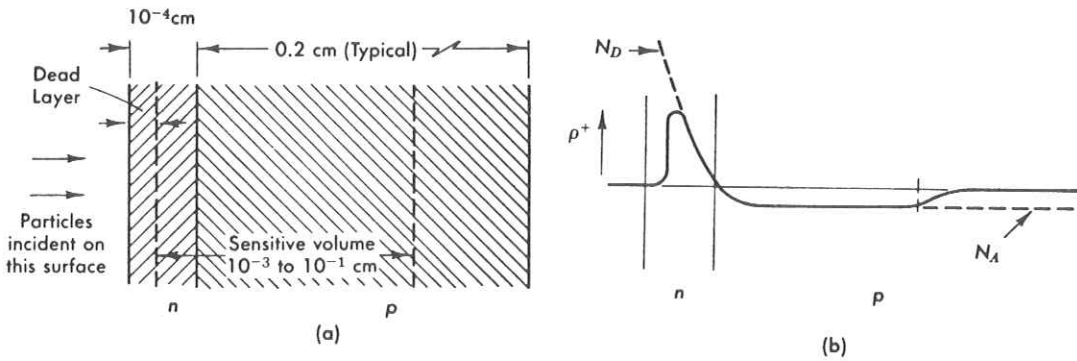


図 1 1. pn 接合型検出器の実例とその空間電荷分布<sup>(11)</sup>

の表面から P 等の不純物を拡散させ  $n^+$  (普通の  $n$  型よりも電子密度が大きい) 型層を作ったものである。

Li イオン・ドリフト接合型の検出器は表 1 のように Li が原子半径が小さく、格子間に位置してドナーとして働くことを用いたもので図 1 2. に示すように pi  $n$  構造をもつ。i は固有半導体の状態を示す。図の(a)に示すように、p 型半導体の表面の Li イオンを  $100 \sim 400^\circ\text{C}$  程の温度で電界に

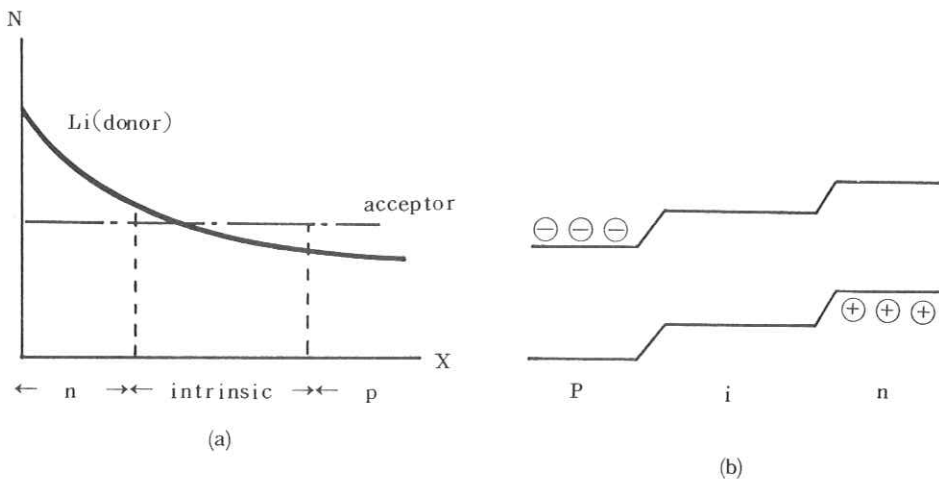


図 1 2. Li イオン・ドリフト接合型検出器の模型図<sup>(9)</sup>

よりドリフトさせることにより  $p-i-n$  構造を作る。この場合  $i$  領域は空乏層として働き、その厚さは印加電圧に依存しない。この方法により厚さ  $1\text{ cm}$  を越える空乏層が出来る。

3-c. 半導体検出器の 2, 3 の特徴について

放射線による電子-正孔対生成の統計的変動によって、分解能を半値巾  $W$  で表わすと

$$W = 2.36\sqrt{N} \cdot \epsilon = 2.36\sqrt{E \epsilon} \dots\dots\dots (4)$$

ここで  $\epsilon$  は 1 電子-正孔対を生成するに要する平均エネルギー (eV)、 $N$  は入射粒子によって生ずる電子-正孔対の平均数、 $E$  は入射粒子エネルギー (eV) である。

半導体検出器では  $\epsilon$  が 3 eV 程度であり、例えば気体電離箱でイオン対を 1 つ作るのに約 30 eV 必要で、半導体検出器が分解能の点で気体電離箱、シンチレーション検出器よりもはるかにすぐれているのがわかる。

図 13 に種々の粒子に対する粒子エネルギーと半導体検出器の相対パルス波高値の関係を示す。ここで特徴的なことは、広い範囲で直線性が保たれていることと、その直線が種々の粒子について一致していることである。直線からはずれているところは、粒子エネルギーが増加すると、粒子が検出器の有効領域を通過してしまうためである。

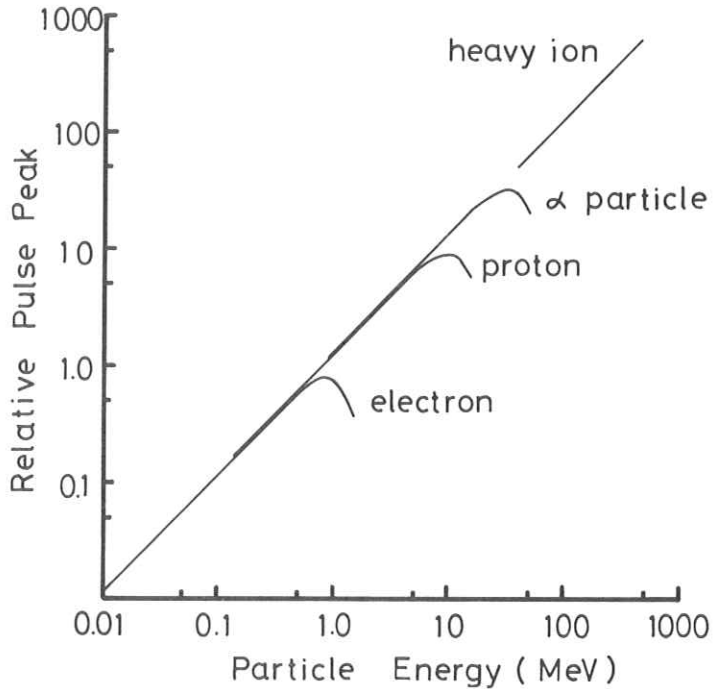


図 13. The relation between Particle Energy and Relative Pulse Peak<sup>(9)</sup>

3-d. 半導体検出器材料とその発展

材料的観点から検出器に必要な性質についてのべ、それにもとづいて材料を検討してみよう。<sup>(12)</sup>

(a) 移動度およびライフタイムの大きいこと：

これは、放射線により生成された電子-正孔対を効率よく集めるために必要で、また、エネルギー

一分解能を上げるのにも都合がよい。結局は、トラップの長さ  $L = \mu\tau E$  を大きくすることである。この点から現在では Ge, Si では  $L$  をメートル程度にすることが出来て最も良く、ついで CdTe、GaAs、HgI<sub>2</sub> では  $L \sim \text{mm}$  程度で良い。GaP、InP、PbO、PbI<sub>2</sub> では  $L \lesssim \mu\text{m}$  で良くない。

(b) エネルギー間隔  $E_g$  の大きなこと：

これは室温動作が出来る ( $E_g 2.14 \text{ eV}$ ) ために必要である。また母材の最高比抵抗値を大きくし、空乏層を大きくするにも都合がよい。表 2 に示すように、周期表で、たとえば IV 属に注目すると上

表 2. 周期律表の内、半導体によく用いられる材料とその原子番号

II	III	IV	V	VI	VII
		6 C	7 N	8 O	9 F
	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl
30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br
48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I
80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi		

の方がエネルギー間隔  $E_g$  が大きく、下へゆくに従って  $E_g$  が小さくなり、金属へ移る。しかし IV 属を中心に III-V 化合物から II-VI 化合物へ移るにつれ、イオン性が大きくなる。(1)式から明らかのように、このために周期表で下の方にある元素でもイオン性が増加すると、 $E_g$  の大きなものを得ることができる。

$E_g$  の点からは、 $E_g(\text{SiC}) \approx 2.2 \sim 2.3 \text{ eV}$ 、 $E_g(\text{HgI}_2) \sim 2.1 \text{ eV}$  で大きく、 $E_g(\text{CdTe}) \sim 1.4 \text{ eV}$ 、 $E_g(\text{GaAs}) \sim 1.4 \text{ eV}$ 、 $E_g(\text{Si}) = 1.1 \text{ eV}$  である。Ge は  $0.66 \text{ eV}$  と比較的小さく、室温動作は出来

ない。

(c) 原子番号  $Z$  の大きいこと：

これは放射線との相互作用を大きくするのに必要である。 $\gamma$  線の吸収は  $Z^5$  に比例する。これは  $Z$  が大きいと質量が大きく、また核の電荷と核外電子数が多いためである。また  $Z$  が大きいと核反応の起る可能性が少なく、background を小さくすることができる。

大きな  $Z$  という点では HgI<sub>2</sub> (80, 53) が現在までに試みられている内で最も大きく、CdTe (48, 52) も大きい。GaAs (31, 33) と Ge (32) もその点から小さくはない。Si (14)、SiC (14, 6) は小さい。

(d) 不純物密度が小さいこと：

大きな空乏層を作るのに必要である (3)式を参照)。最も良い Ge で  $\sim 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 、Li で補償した Si と Ge で  $\sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  である。CdTe で  $10^{13} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  のものが得られ、さらに補償したもので  $10^{11} \text{ cm}^{-3}$  程度のものも得られている。GaAs のエピタキシャル層で  $\sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 、HgI<sub>2</sub> で、半絶縁体のものが得られている。



(e) 結晶成長と電極付けについて：

Ge と Si はこの点、トランジスタ工業の進展とともに大発展している。GaAs と CdTe も電子工業、とくに光エレクトロニクスと関係し、これら結晶成長と材料処理について種々の方法で試みられ発展している。HgI<sub>2</sub> は以上でみてきたように、検出器用半導体としてすばらしい特徴をもつばかりでなく、結晶成長の容易な点もみのがせない特徴である。HgI<sub>2</sub> をアセトンと 4% の水の中に飽和させ、溶媒を蒸発させるという簡単な方法で  $3 \times 5 \times 7 \text{ mm}^3$  程で、検出器として使うことが出来る結晶が作られている。<sup>(12)</sup>

(f) その他：

その他、検出器を改良するために、種々の材料処理技術が用いられている。<sup>(14)</sup>

より高度の Ge についての研究は、いぜんとして盛んである。

雑音が少ない Si 検出器を作るために B イオン注入技術が試みられている。

CdTe  $\gamma$  線検出器にハロゲンをドーブすることによって、分極効果をおこさせないようにすることができ、分解能が上げられている。

また、Ge 検出器をカプセルに入れるとき、真空にすると、表面に H<sub>2</sub> が吸着され P<sup>+</sup> 反転層を作り劣化が早い、水素がまじっていない Ge 結晶を作って問題が解決されている。

また半導体検出器として C, InSb, PbI<sub>2</sub> 等も最近試みられている。

これらは、半導体の他の分野への応用と関連して発展している。HgI<sub>2</sub> は放射線検出器として注目されているが、逆にこの技術が光エレクトロニクスに応用される可能性もある。

#### 4. その他の検出法

以上で基本的な半導体検出器について述べたが、他の検出法およびその可能性について 2.3 をながめてみよう。

##### 4-a. Position Sensitive Detector (PSD)<sup>(15)~(17)</sup>

放射線の空間分布測定のため、初期には小型半導体検出器を並べて用いられたが、製作上読み出し、素子間の不感領域等、問題点があった。現在、使われているのは大別すると電荷分割方式とチェッカーボード方式の 2 種である。電荷分割方式は、半導体表面につけた抵抗性電極により電荷を分割し、位置信号を得る。チェッカーボード方式は板状の半導体の両面に、互いに直交するように非常に狭い間隔で細長い縞状に蒸着された電極で X Y 座標の位置を検出する方式である。同方式で両面を p<sup>+</sup> 層および n<sup>+</sup> 層にしみぞをつけて検出するものもある。

4-b. PC-EL型X線映像変換装置<sup>(18)(19)</sup>

半導体の蛍光等を使ってX線像を得るのにX線蛍光板、イメージ・インテンシファイヤ、X線ビジコン等があるが、半導体の光(X線)伝導(photoconduction)と、半導体の電界発光(Electroluminescence)を組み合わせた、PC-EL型X線映像変換装置は、きわめて興味深いものである。現在、工業用としては実用化されているが、医学用には未だ実用化されていない。

図14にその原理を示す。<sup>(18)</sup>X線が当たってPC層に電子-正孔対が形成され、抵抗値が下がった所のEL層に大きな電圧が印加されEL層が発光する。1954年にR.K. OrthuberとL.R.

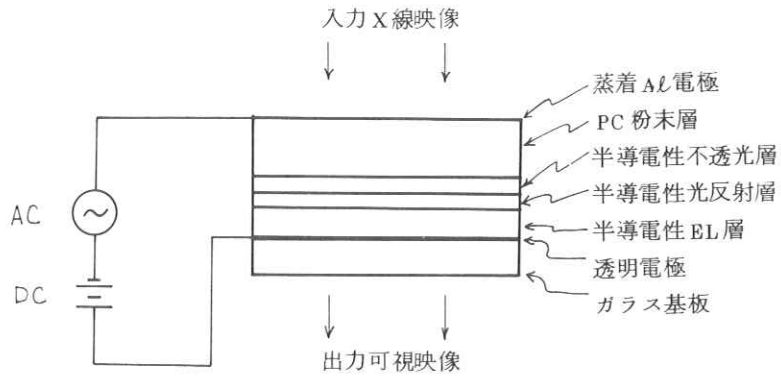


図14. 直流制御形X線パネルの構造と給電方式

Ulleryによって初め<sup>(20)</sup>て発表された。この装

置の実用化には、材料的問題から長時間を要したが、工業用として現在実用化されるに至った。松下電産・無線研から生み出されたExicon<sup>(19)</sup>と、ウェスティングハウス社のR. A. S. (Radiographic Amplifier Screen)がある。

4-c. 非晶質半導体の光構造変化(光黒化)の応用<sup>(21)(22)</sup>

1925年の量子力学の誕生以来、物性論は急速に進歩したが、それは主に周期的格子をもつ結晶についてのものである。物性論の進歩とともに、その応用も進み、トランジスタ、IC技術は全世界に技術革命を行なった。周期系の物性論は現在精密科学になっている。非晶質半導体は基礎的な面からも、応用の面からも大変面白いものであるが、まだ科学的にも技術的にも初期の段階である。

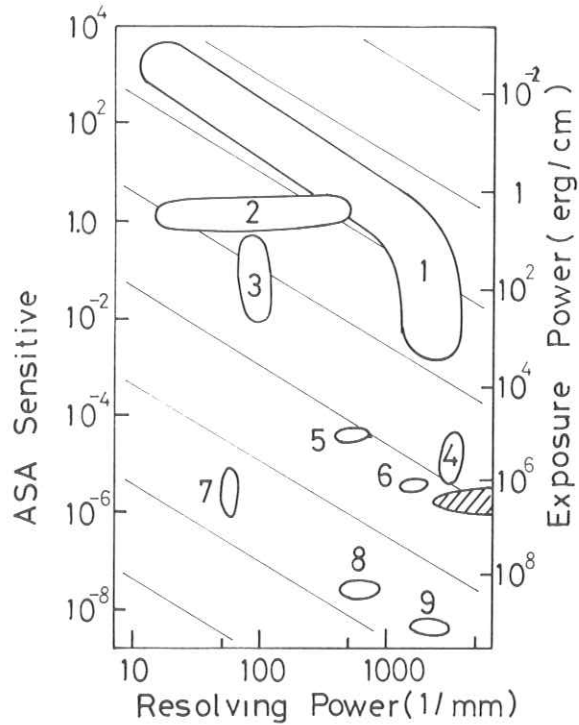
1970年に井郷氏<sup>(23)</sup>によって見出されたカルコゲナイド系非晶質半導体の、結晶化をとみなさない光黒化現象は特に有力なものの一つである。

材料はAs-Se-Ge系非晶質半導体で、光照射によって光学吸収端が移動する(光黒化)。光黒化とともに屈折率が増加する。加熱によって像を消去できる。図15にAs-Se-S-Ge系非晶質半導体の光感度と分解能を他のものと比較して示す。<sup>(22)</sup>特に分解能が今まで得られているもの

では一番大きく、その上限はまだ明らかではないが、図に示されたより、2桁程上る可能性がある。現在のところX線には直接感光しないが、医用X線フィルムのように増感用蛍光紙を用いるとX線等にも実用化出来る可能性がある。

この関係は、日本は世界的にリードしており、通研、日立、電総研等で研究がなされている。最近の進歩については、昨年と今年行なわれた国際会議の(24)(25) Abstracts と近く刊行される予定のその Proceedings を参照されたい。

以上をまとめるにあたって、あたたかく御教示いただいた岐阜大学教授内田 勝博士に深謝いたします。また日頃お世話になっている岐阜大学講師嶋川晃一博士、同助手田中嘉津夫博士同院生坂口鋼一氏（現三重大学助手）、小寺吉衛氏に、この場から感謝いたします。またPC-EL型装置について種々お教えいただいた松下電産無線研究所 山下一郎氏にも感謝の意を表わしたいと思います。



- |   |                     |   |                    |
|---|---------------------|---|--------------------|
| ▨ | As-Se-S-Ge          | 6 | Photochromism      |
| 1 | Silver salt film    | 5 | MnBi               |
| 2 | Electra-photography | 7 | Liquid crystal     |
| 3 | Photographic paper  | 8 | SBN                |
| 4 | Photoresist         | 9 | LiNbO <sub>3</sub> |

図15. 非晶質半導体As-Se-S-Ge系の光感度、分解能と他との比較(22)

## 参 考 文 献

- 1) J.C. Phillips : "Covalent Bonding in Crystals, Molecules and Polymers"  
(1969), The University of Chicago Press, "Bonds and Bands in Semiconductors,"  
(1973) Academic Press
- 2) M. Kastner : "Bonding Bands, Lone-Pair Bands, and Impurity States in  
Chalcogenide Semiconductors" Phys. Rev. Letters 28 (1972) 355
- 3) D.R. Penn : "Wave Number Dependent Dielectric Function of Semiconductors"  
Phys. Rev. 128 (1962) 2093
- 4) J.C. Phillips : "Ionicity of the Chemical Bond in Crystals" Rev. Mod. Phys.  
42 (1970) 317
- 5) L. Pauling : "The Nature of the Chemical Bond" 3rd ed. (1960) Cornell  
Univ. Press
- 6) S. Wang : "Solid State Electronics" (1966) McGraw-Hill
- 7) D. Long : "Energy Bands in Semiconductors" (1968) Interscience
- 8) W. Kohn : "Shallow Impurity States in Si and Ge" in "Solid State Physics"  
Vol. 15. (1957) edited by F. Seitz and D. Turnbull
- 9) W. J. Price : 放射線計測 (コロナ社) 昭和41年
- 10) D. E. Watt and D. Ramsden : 微弱放射能測定技術 (コロナ社) 昭和43年
- 11) A. C. Melissinos : Experiments in Modern Physics (Academic Press) 1966  
Chap. 5
- 12) G. L. Miller : "A Brief Review of Recent Advances in Compound Semiconductors  
for Radiation Detectors" IEEE NS-19 (1972) 251
- 13) 例えば、IEEE NS-23 (1976) 76, 81, 92
- 14) 例えば、IEEE NS-21, NS-22, NS-23 (1974~1976) のシンポジウムの報告書を参  
照
- 15) 坂井英治 : "半導体ガンマ線検出器" 応用物理 42 (1973) 97
- 16) 小林哲二 : "最近の医用半導体放射線検出器" 応用物理 43 (1974) 845
- 17) 中本, 永田, 菊地, 道家 : "半導体を用いた Position Sensitive Detector" ibid  
44 (1975) 1215

- 18) 主に松下電産無線研究所山下一郎氏からの Private communication による。
- 19) 大島, 姫野, 谷, 榎 : 固体X線映像変換装置“EXICON” National Technical Report 17 (1971) 660
- 20) R.K. Orthuber and L.R. Ullery : “A Solid State Image Intensifier” J. Opt. Soc. Amer. 44 (1954) 297
- 21) H. Fritzsche : “Photostructural Effects and the Use of Amorphous Semiconductor for Holography and Imaging” in “Electronic and Structural Properties of Amorphous Semiconductors” Chap. 9 edited by P.G. LeComber and J. Mort (1973) Academic Press
- 22) 水島, 前仏 : “非晶質半導体の光応用” 第2回アモルファス物質の物性と応用セミナーテキスト (1975) P. 5.1
- 23) T. Igo and Y. Toyoshima : Proc 3rd Conference on Solid State Devices (1971) 61
- 24) The 6th International Conference on Amorphous and Liquid Semiconductors, Program and Abstracts (Nov. 18-24 1975) Leningrad
- 25) The International Topical Conference on Structure and Excitations of Amorphous Solids (Williamsburg, March 25-27, 1976) Bulletin of the American Phys. Soc. II-21 (1976) 457-470

## 光子計数法による微弱光の測定

小島克之・金森仁志

京都工芸繊維大学電気工学教室

京都市左京区松ヶ崎 (〒606 )

### § 1. ま え が き

著者等はすでに<sup>1,2)</sup>、ロックイン法と雑音電圧法による微弱光測定について報告した。今回は同期光子計数法による微弱光測定について報告し、これら3つの方法による測定結果を比較する。光子計数法は光電子増倍管への入射光が極めて微弱な場合 ( $10^{-11} \sim 10^{-12}$  W以下) 出力電流がパルス状となり、単位時間当りのパルス数が入射光子数に比例することから、このパルスを計数する方法である。この場合、雑音も同時に計数されるので、ロックイン法の場合と同様に、信号成分のみを計数するのが、同期光子計数法である。

### § 2. 測定系の構成

測定するためのブロック・ダイアグラムを図1に示す。タングステンよう素電球からカソードホロ増幅器までの装置は、ロックイン法および雑音電圧法で使用したのと同ーのものである。測定する微弱光はチョッパで960 Hz の方形波に切断され、モノクロメータで分光され、光電子増倍管(P. M.) (浜松テレビ製HTV-R118) に入射する。P. M. からのパルス出力はインピーダンスを変換するためのカソードホロ増幅器を通り、パルス用前置増幅器で200倍に増幅されて、光子計数器に入る。参照信号も同じチョッパの別の穴で960 Hz の方形波に切断し、

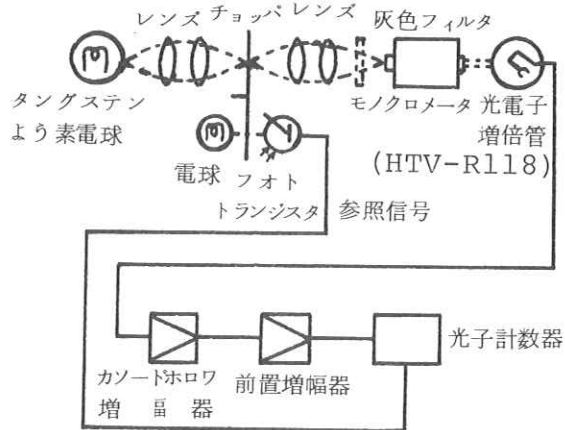


図1. 同期光子計数法ブロック・ダイアグラム

トランジスタで受光して、光子計数器に入れた。測定光の強度変化は灰色フィルタを用いて行った。

### § 3. 測定結果

測定した分光放射束感度を図2に示す。P.M. に印加した陽極供給電圧は1000Vと830Vである。

縦軸は1W当りの入射放射束に対する等価パルス数である。すなわち、光子計数器で計数したパルス数に、灰色フィルタの透過率の逆数を乗じ、これをモノクロメータからの絶対放射束で除した。図3は放射束より光束を求め、光束感度に直したものである。P.M. の陽極供給電圧が1000Vの場合、最大感度の波長400nm付近で、1個のパルスまで測定して $10^{-14}W$  ( $3 \times 10^{-15} \text{Lm}$ )程度の微弱光の測定が可能である。ロックイン法および雑音電圧法との比較を表1に示す。同じP.M. を使い同一の条件で測定した場合、光子計数法が最も微弱な光まで測定できた。

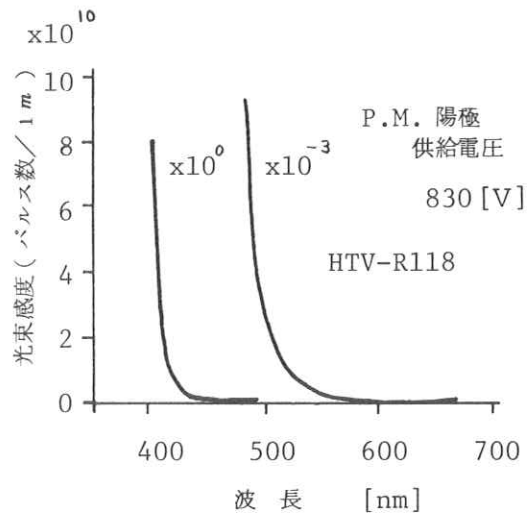
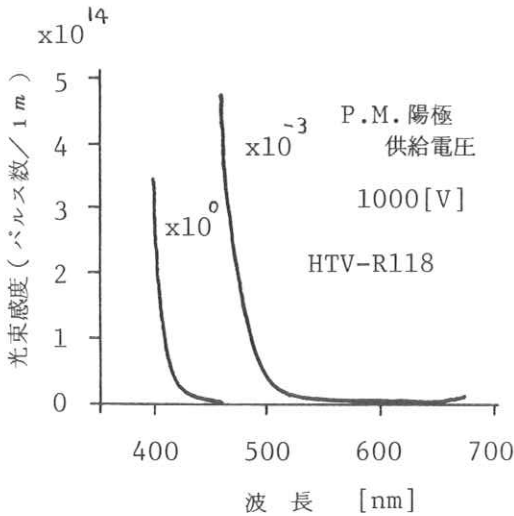
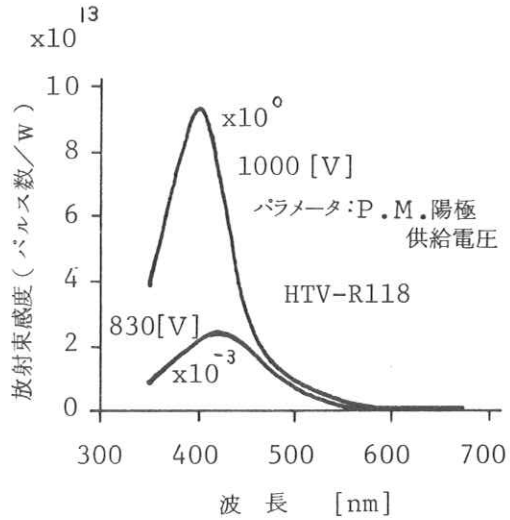


図3. 分光光束感度

表1. ロックイン法, 雑音電圧法および光子計数法の比較

方法 比較事項	ロックイン法	雑音電圧法	光子計数法
放射束感度	$1.2 \times 10^{-13}$ 〔V/W〕	$6.4 \times 10^{-12}$ 〔V/W〕	$9.3 \times 10^{-13}$ 〔パルス数/W〕
測定可能放射束 〔W〕	$8 \times 10^{-14}$	$2 \times 10^{-13}$	$1 \times 10^{-14}$

\* ロックイン法および雑音電圧法は電圧を1Vまで測定, 光子計数法はパルスを1個まで測定。

#### § 4. あとがき

以上の測定においてはP.M. を冷却していないが, P.M. を冷却し暗電流雑音パルスを減少することにより, さらに微弱な放射束の測定が可能になるものと思われる。

#### 文 献

- 1) 金森, 小島 : 放射線像研究 3 (1973) 43。
- 2) 金森, 小島 : 放射線像研究 3 (1973) 81。



## 各種フィルターによる X 線特性の変化

京都大学原子炉実験所 佐藤孝司

診療に用いる X 線は一般に X 線管から放射される X 線を直接患者に照射するのではなく、途中でアルミ、銅等の附加フィルターを挿入し、X 線束のエネルギー分布を調整して使用する。

この附加フィルターを用いる目的は

1. もとの X 線束に含まれている不要のエネルギー成分を取除き患者の被曝線量を減少させる。
2. X 線のスペクトル分布を変化させ、X 線写真のコントラスト、深部線量率を調整する。
3. 造影剤診断において、造影像に最適な X 線スペクトルを作る。

が考えられる。

しかし、X 線診断に有効な X 線のエネルギー領域、エネルギー分布は、診断の部位、厚さそれに使用する増感紙、フィルム等の感度レスポンスにより個々に違いため多目的に使用する X 線装置では基準をきめられない。

更に、フィルターにより起る X 線特性の変化は、フィルターに入射する X 線スペクトルと密接な関連がありこれを定める管電圧、管電流及びこれらの波形と切り離して考えることは出来ない。

ここでは診療用の X 線について、フィルターの材質厚さで起る透過 X 線の特性変化を解析した。

### 1. フィルターによる X 線スペクトルの変化

解析を簡単にするため、フィルターに入射する X 線の強度スペクトル  $\Psi_{in}(E)$  の narrow beam とし、フィルター質量減弱係数を  $\mu_{tot}(E)$ 、密度を  $\rho$ 、厚さを  $x$  とすれば、このフィルターを通過する X 線の強度スペクトル  $\Psi_{out}(E)$  は

$$\Psi_{out}(E) = \Psi_{in}(E) e(-\mu_{tot}(E) \cdot x \cdot \rho) \dots\dots\dots (1)$$

で表わされる。

一方、入射する X 線の強度スペクトルは X 線管の動作条件、X 線管の構造、V-i 特性により複雑に変化するので、この解析では標準 X 線管 ( タングステン陽極、管球ガラス壁 1.5 mm、油層 7 mm 放射窓 3 mm、V-i 特性は比例 ) を考え、これを直流管電圧で動作させるものとした。解析の方

法は文献1を参照。

フィルターは、アルミ、銅、モリブデン、錫、よう素、鉛の6種で、数値計算の質量減弱係数は<sup>2)</sup>NBS-29を用いた。管電圧60, 100, 150KVにおけるX線強度スペクトル変化をFig 1に示す。

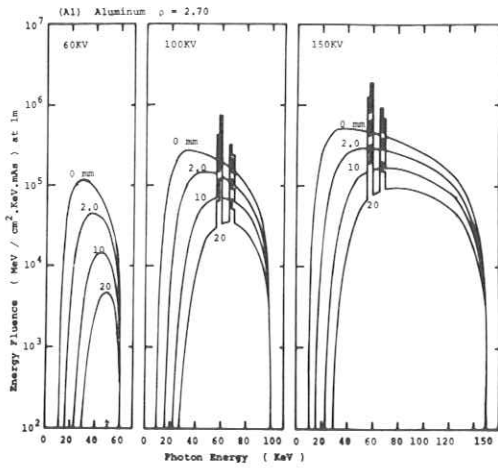


Fig 1-1

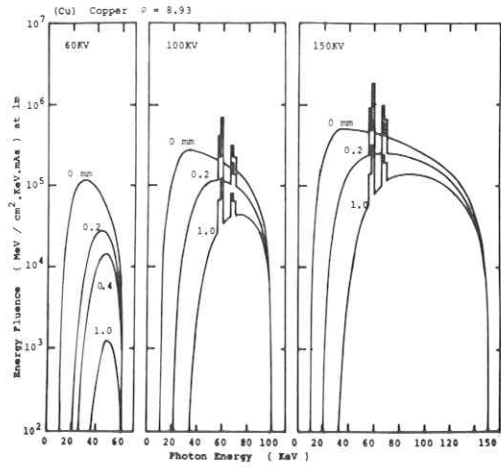


Fig 1-2

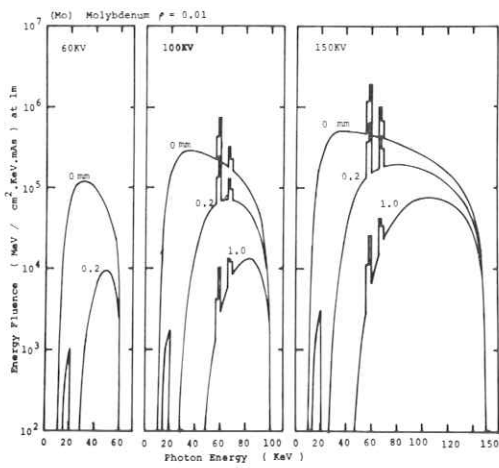


Fig 1-3

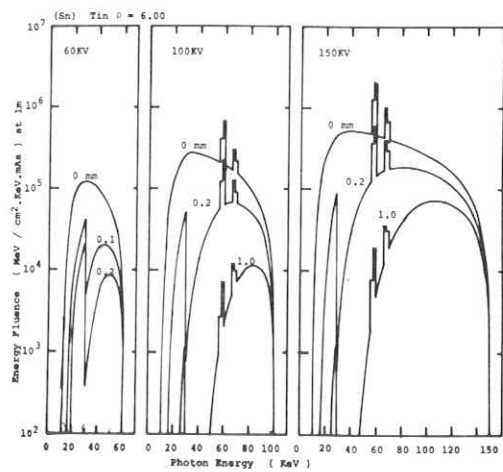


Fig 1-4

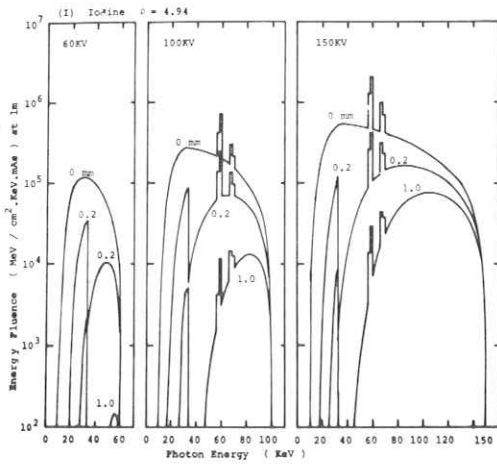


Fig 1-5

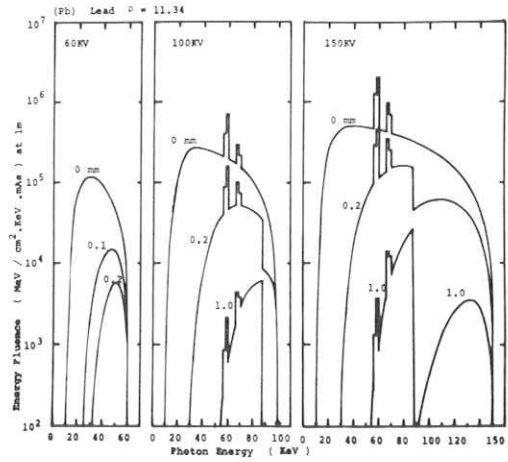


Fig 1-6

Fig 1 各種フィルターによる一次X線(管電圧60,100,150KV直流)のスペクトル変化

この図でX線エネルギー56, 58, 66, 68 keVに見られる線スペクトルはタングステン陽極からの特性X線である。

一般には、フィルターを厚くすればX線の減弱が大きくなり、特に低エネルギーで著しく、X線スペクトルは最強部が高エネルギー側にシフトするのが見られる。しかし、個々の元素ではかなり差があり、中高原子番号のモリブデン、錫、よう素、鉛では入射X線のエネルギー領域にX線の吸収端があり、このエネルギー部分が選択的に吸収されるため透過後のX線スペクトルは2分されてくる。

## 2. フィルターによるX線質の変化

フィルターによりX線スペクトルに変化が起これば、そのX線は物質の透過能力に差を生じる。

ここで、X線の線質を光子の持つ平均エネルギー $\bar{E}$ で表わせば、

$$\bar{E} = \int \Psi(E) dE / \int \phi(E) dE \dots\dots\dots (2)$$

(但し、 $\Psi$ は光子の強度フルエンス、 $\phi$ は光子束フルエンス)

となる。

標準X線管に各直流管電圧を印加した場合、フィルターの種類、厚さと透過X線の平均エネルギー

—の関係を Fig 2 に示す。

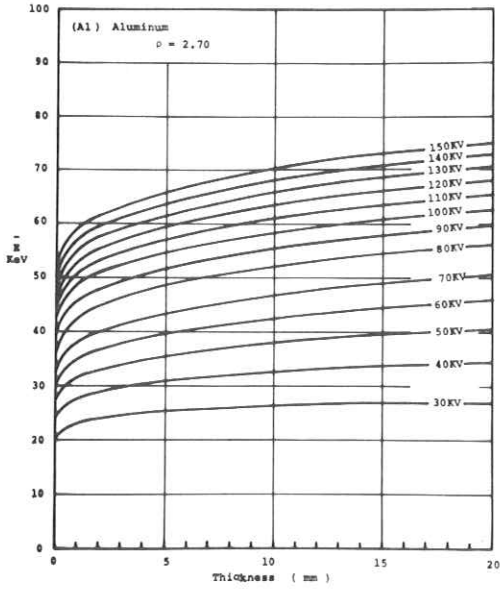


Fig 2-1

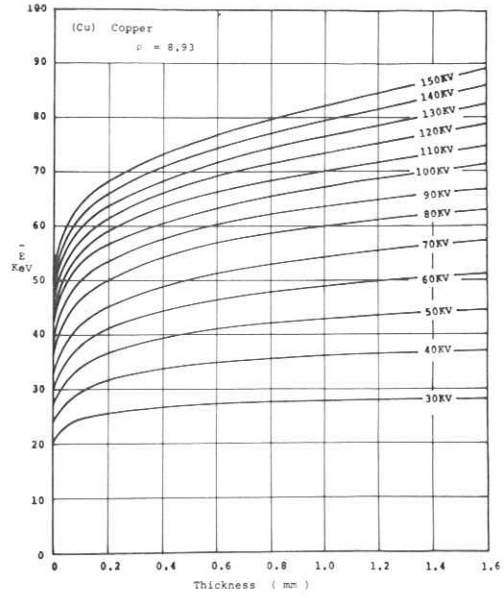


Fig 2-2

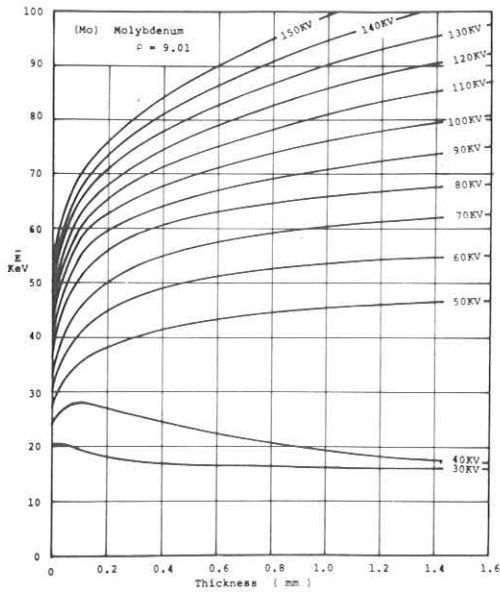


Fig 2-3

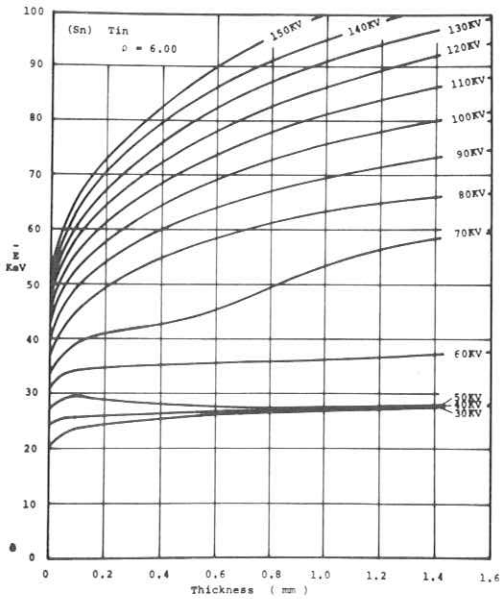


Fig 2-4

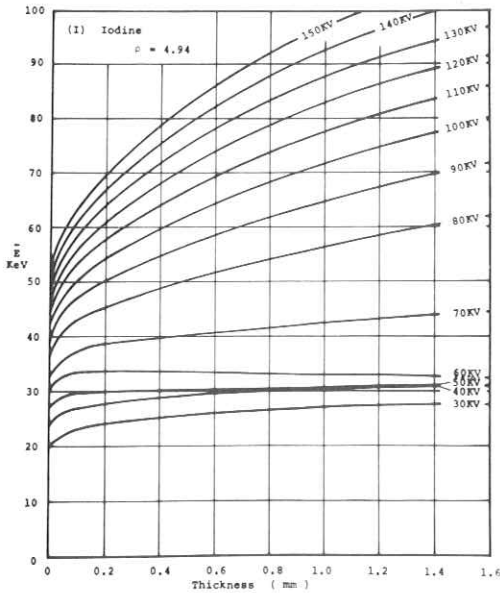


Fig 2-5

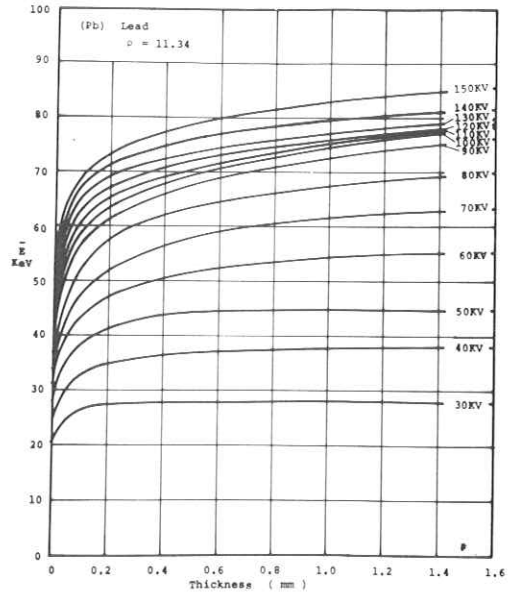


Fig 2-6

Fig 2 管電圧，フィルターによるX線平均エネルギーの変化

これらの図で、フィルターが厚くなれば透過後のX線平均エネルギーが高くなるのは、スペクトル変化から見て明らかだが、その様子はフィルターの種類によりかなりの差が生じる。即ち、アルミ、銅ではフィルターの厚さと共にどの管電圧でも同じ傾向で平均エネルギーが上昇するが、モリブデン、錫、よう素、鉛では管電圧が少々変化しても平均エネルギーは各元素のX線吸収端附近に集中する。これは一次X線に含まれる高エネルギー成分がフィルターにより選択吸収されるためでフィルターを厚くしてもX線の透過能力は良くなり、逆に低下する場合も起こる。

### 3. フィルターによる散乱X線の附与

フィルターはX線の減弱と同時にその一部は、二次X線として外に放出する。フィルターに入射するX線が narrow beam の時は二次発生したX線と少なく問題にならないが、診療時には広い照射野でX線がフィルターに入射するため二次X線附与で患者の被曝線量を増加させ、またX線写真の質を低下させる。この二次X線は蛍光X線と散乱X線に分けられるが、その強度はフィルターに入射する全X線光子数、エネルギースペクトル、フィルターの光電、散乱係数、厚さ等の函数となり実際には照射野の大きさに関連するため解析は難かしくなる。しかし、管球附加フィルターは原則としてX線管に近接して置かれるので、普通のX線撮影では距離による発散が大きく、影響はアルミ、銅で数%を超えない。

#### 4. むすび

X線管の附加フィルターはX線スペクトルに変化を与える。しかし、この効果はX線強度の減弱につながり、X線管球の許容負荷と合せて考慮せねばならない。

物理的に考えれば、診療の目的に応じたX線質を管電圧とフィルターの組合せで作るのは可能だが、X線管負荷、多目的の診療を考えれば現在広く使用されているアルミ、銅は無難な材質と云える。最後にこの解析を進めるにあたり種々討論を願った当実験所、小野光一氏に感謝します。

#### 文 献

- 1) 佐藤孝司 診療用X線管の管電圧、管電流と波形による放射X線の特性変化I, II, 日放技術会誌, Vol 29-5, (1974) Vol 30-3, (1975)
- 2) J.H. Hubbell, Photon Cross Section, NSRDS-NBS-29 (1969)

## ROC 曲線によるフィルム - 増感紙系の評価

大阪大学医短大 山下一也  
 大阪大学病院中放 若松孝司・長畑 弘  
 岐阜大学工学部 内田 勝・田中嘉津夫・小寺吉衛

### 1. はじめに

X線像の特性を評価するには、MTFなどの物理的評価が広く用いられているが、実際に像を観視するとき、その見易さ、見難さなどとは相関しないことが多い。私たちは、視知覚と、観察者の能力を評価するのに、すぐれた方法の一つであるROC (Receiver Operating Characteristics) 曲線により、増感紙 - フィルム系の評価をしようとするものである。

ROC曲線は、受信者動作特性といわれ、信号検出理論 (PETERSOR, BIRDSALL ら1954) にもとづいたもので、雑音の中から弱い信号を検出するための理論をその背景としている。

### 2. 刺激 - 反応行列と観察基準

雑音  $n$  が与えられて、観察値  $x$  が得られる確率を  $P(x|n)$  とすれば、この2つの条件確率の比を尤度比 (likelihood ratio) といひ、 $\ell(x)$  で表わす。

$$\ell(x) = P(x|s) / P(x|n) \dots\dots\dots (1)$$

$\ell(x) < 1$  であれば、観察値は雑音だけの確率分布  $f(x|n)$  から得られるとする方が、信号だけの確率分布  $f(x|s)$  から得られるとするより確からしい。といえる。

今、観察者が雑音  $n$  のもとでの確率分布と信号  $s$  のもとでの確率分布、および図1に示す刺激 - 反応行列 (利得行列) を前もって知

表1. 増感紙・フィルムの組合せ

図1. 刺激 - 反応行列

		〔反 応〕	
		S	N
〔刺 戟〕	s	P ( S   s )	P ( N   s )
	n	P ( S   n )	P ( N   n )

っていたとすれば、観察値  $x$  が得られたとき、信号が示されたか (yes)、雑音のみであったか (no) のどちらかを答えねばならぬとすれば、次のようになる。

$P(S|s)$  : 信号が示されて正しく yes と答える確率 (Hit, true positive)

$P(N|s)$  : 信号が示されて誤って no と答える確率 (Miss, false negative)

$P(S|n)$  : 信号なし (雑音) が示されて誤って yes と答えるときの確率 (False alarm, false positive)

$P(N|n)$  : 信号なし (雑音) が示されて正しく no と答えるときの確率 (Correct rejection, true negative)

今、尤度比  $\ell(x)$  を観察者の観察基準に対応する指標とするならば、その基準のとり方によって  $P(S|s)$  と  $P(S|n)$  が増加したり、減少したりする。したがって一対の  $P(S|s)$  と  $P(S|n)$  を、心理的に観察基準を変えて、それぞれに求めておけば、ROC 曲線が得られる。

### 3. yes と no 実験

$T$  を全観察試料数、 $T(s)$  を信号  $s$  のある試料数、 $T(n)$  を信号のない (雑音のみの) 試料数とすると

$T(S|s)$  : 信号試料が示されて、yes という数

$T(N|s)$  : 信号試料が示されて、no という数

$T(S|n)$  : 信号なしの試料が示されて、yes という数

$T(N|n)$  : 信号なしの試料が示されて、no という数

となる。

$$P(s) = T(s)/T, P(n) = T(n)/T, \dots\dots\dots (2)$$

であるから

$$P(S|s) = T(S|s)/T(s)$$

$$P(N|s) = T(N|s)/T(s)$$

$$P(S|n) = T(S|n)/T(n)$$

$$P(N|n) = T(N|n)/T(n)$$

..... (3)

で示され、したがって、

$$T(s) = T(S|s) + T(N|s)$$

$$T(n) = T(S|n) + T(N|n)$$

..... (4)

故に



$$P(S|s) + P(N|s) = 1 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$P(S|n) + P(N|n) = 1$$

以上の結果から、(3)式の4つの変数は、 $P(S|s)$ 、 $P(S|n)$ がわかれば、他の2つもわかることになる。 $P(S|s)$ と $P(S|n)$ を実験的に求める。

#### 4. 実験の方法

- (1) 微小信号 : アクリル樹脂製の  $2\text{mm}$   $\phi$  のビーズ数個 (X線像としては不透過像) と、アクリル樹脂板  $2.1\text{mm}$  厚に、適当な位置に  $2\text{mm}$   $\phi$  の空洞を数個 (X線像としては透過像) を用いる。
- (2) X線装置 : RF-500-150, DRX-90A (2.0×2.0)
- (3) 現像処理 : M5-AN X-Omat
- (4) 増感紙・フィルム : 表1
- (5) 実験の条件 : 80kV, 150cm (FFD), 黒化度は  $0.65 \pm 0.03$ , 付加フィルターは  $0.5\text{mm}$  Cu +  $1.0\text{mm}$  Al

表1. 増感紙・フィルムの組合せ

- (6) 試料画像 : ビーズ信号像20枚と信号なし像20枚, 計40枚。空洞信号像20枚と信号なし像20枚, 計40枚。以上, 増感紙とフィルムの組合せごとに80枚の試料画像によって, yes-noの実験をする。

screen-film	signs		mAs	rel. sensitivity	rel.MTF (integral vol.)	W.S. $\sigma^2$
	bead	cavity				
FS + Y	a	a'	10	100	100	28.71
FS + QS	b	b'	8	125	97.5	42.04
HS + Y	c	c'	3.5	290	89.7	29.12
HS + QS	d	d'	2.3	435	77.8	58.92
LHII* Y	e	e'	3.3	300	98.9	16.88
LHII* QS	f	f'	2.3	435	87.3	15.91
GTS* QSO	g	g'	1.3	770	89.4	52.13
GTH* QSO	h	h'	0.67	1500	80.2	26.32

- (7) 試料画像の観察者と観

察基準: 観察者としては, 放射線専門医 (経験15年以上) A, 放射線技師 (20年) C, 放射線技師 (15年) D, 放射線技師 (5年) E, 学生 F, の5名とする。観察の方法としては, 同シヤウカステン (8000 rlx) で明視距離で観察し, 疲労すれば随時休息する。また試料画像の周囲は黒紙で覆い不用な光をカットする。観察基準としては, (i)ゆるい, 甘い基準, (ii) やゝ注意深くみる, 中間の基準, (iii) 十分に, きびしい基準, の3段階に変化して yes-no 実験を行なう。

## 5. 結果と考察

ROC曲線での評価は、 $P(S|s) = 1.0$ 、 $P(S|n) = 0.0$  に近い点を通るとき、その系の性能が良いとする。実験の結果を図2(observer A)、図3(observer C)、図4(observer D)、図5(observer E)、図6(observer F)に示す。また、 $a \sim h$ は実線で、ビーズ像の場合。 $a' \sim h'$ は点線で、空洞像の場合である。

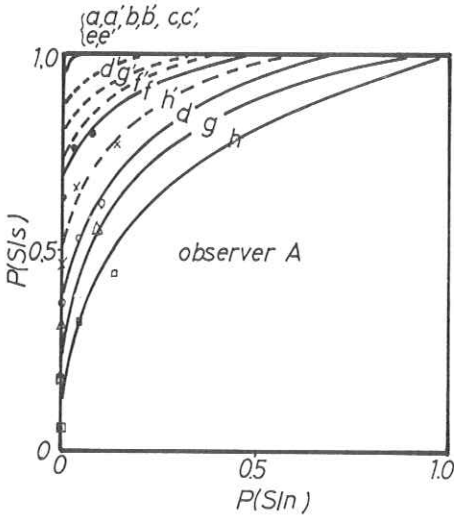


図2. 観察者 A

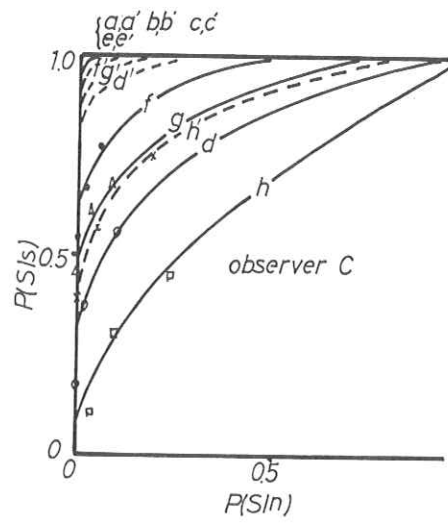


図3. 観察者 C

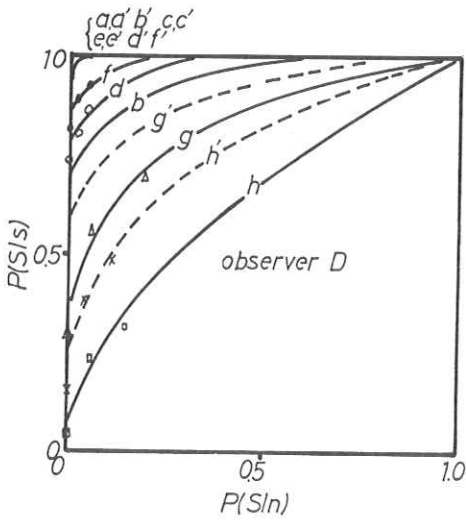


図4. 観察者 D

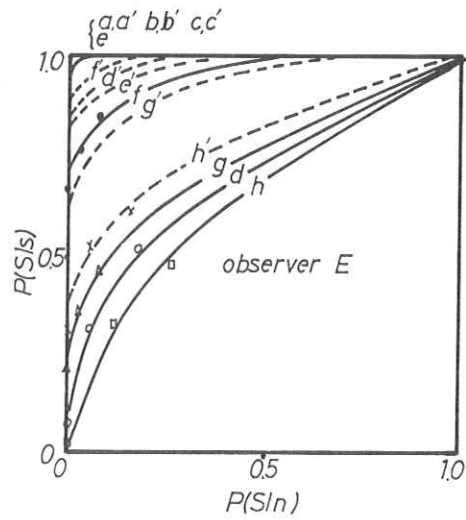


図5. 観察者 E

(1) 各観察者とも、各組合せにおいて、空洞像の方が、検出能がよい。とくに、Yタイプフィルムとの組合せはすぐれている。それは、信号が透過像であり、周辺の黒化度より高い黒化度をもつため、見易くなるためであろう。

(2) ビーズ像は、反対に視標が背景より明るいいため見難い。もちろん、これは濃度領域が0.65の場合であって、基礎濃度のとり方によっては、検出能は変化する。

(3) FS+Y, FS+QS, HS+Y, LHII+Y, の組合せでは、ほとんど $P(S|s) = 1.0$ ,  $P(S|m) = 0.0$  で、ビーズ像、空洞像いずれの場合も信号の認知は最高であった。

(4) HS+QSの組合せは、ビーズ像、空洞像ともに悪い。とくにビーズ像の場合には、GTS, GTH, など希土類蛍光体増感紙の場合に近い検出能であった。

(5) GTH, GTS, とオルソ・タイプフィルムQSDとの組合

せは、予想した通りかなり検出能が低下している。MTFの比較では他の組合と大きな差がないにもかかわらず、性能が極端に悪いのは量子モトルによる粒状性の影響と思われる。図7.に示すWiener Spectrumからもそれがわかる。しかし、W.SではGTSの方がGTHより悪いが、ROC曲線ではその逆の結果がでている。これは、GTHの方が、写真をみたとき、ざらつきが強いため、ここに視覚と粒状性の関係がうかがわれよう。

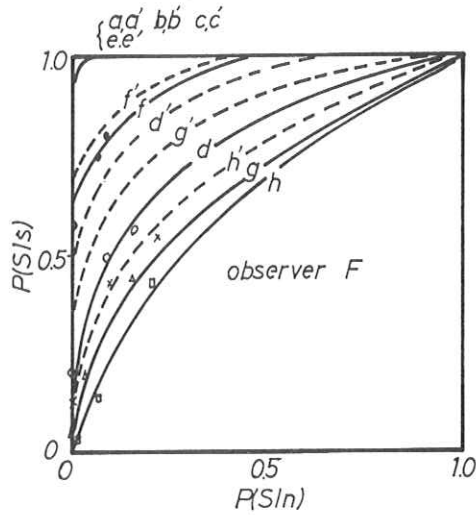


図6. 観察者 F

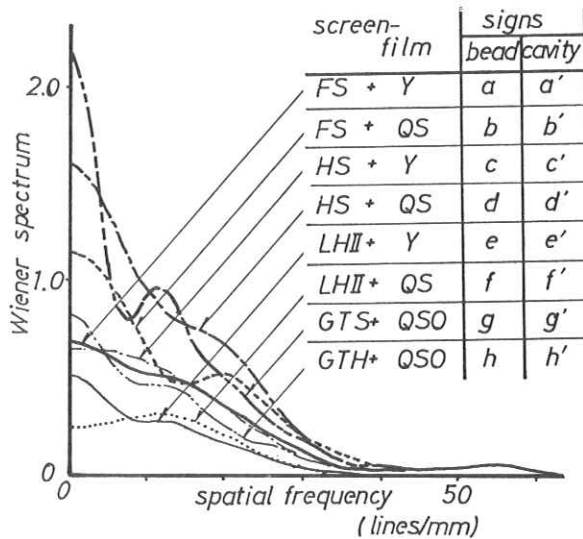


図7. Wiener Spectrum

(6) LH-II+QSとHS+Yの組合せにおいて、ビーズ像、空洞像いずれもが、LH-II+QSの組合せの方が検出能が悪い。この結果はGOODENOUGHらの結果によくあう。また、ビーズ像と空洞像では、ビーズ像の方が検出能が悪い。ただし、空洞像の場合には、その差が接近している。それには、(1),(2)のべた理由のためであろう。

(7) 観察者の違いによる検出能の傾向は、(A),(C),(D),(E),(F)の順に低下していくが全体の傾向には著変はない。とくに、相当経験のある専門医(A)と、学生(F)の場合では、各組合せの性能のあり方が共通しているが、学生(F)の場合の方が平均して検出能が悪い。そして、各組合せの性能の順位が、ほぼ妥当であることを示すものであると考える。

(8) 増感紙とフィルムの組合せで、増感紙の感度が高かろうが、低かろうが、フィルムの感度の高い方が検出能が悪い。これは、高感度増感紙と低感度フィルムの組合せの方が粒状性がすぐれているという日常の臨床経験にもよく合致する。

ROC曲線は、微小信号を検出するという観察系の性能と観察者の感受性の指向を示すすぐれた方法の一つである。今回は、いわゆる $d'$ についてはふれなかった。また、情報容量の算出についても、別の機会に報告したい。

## 文 献

- 1) COOMES, C. H., DEWES, R. M., TVERSKY, A., : 小野 茂(監訳)「数理心理学序説」新曜社 1973
- 2) GREEN, D. M., SWETS, J. A., : Signal Detection Theory and Psychophysics. New York, Wiley, 1966
- 3) GOODENOUGH, D. J., et al : Radiographic Application of Signal Detection Theory. Radiology 105 : 199-200 Oct. 1972
- 4) METZ, C. E., et al : Evaluation of Receiver Operating Characteristic Curve Data in Terms of Information Theory. with Applications in Radiography Radiology 109 : 297-304 Nov. 1973
- 5) GOODENOUGH, D. J. et al : Radiographic Application of Receiver Operating Characteristic (ROC) Curves. Radiology 110 : 89-95. Jan. 1974

# R. I. I. 研 究 会

会 長	高 橋 信 次							
顧 問	立 入 弘							
常任委員	佐々木 常雄	竹 中 栄 一	津 田 元 久	長谷川 伸				
委 員	飯 沼 武 一	岡 芳 樹	内 田 勝	高 野 正 雄				
	金 森 仁 志	木 下 幸次郎	竹 中 栄 一	長谷川 伸				
	佐 柳 和 男	佐々木 常雄	恒 岡 卓 二					
	滝 沢 正 臣	津 田 元 久	矢 仲 重 信					
	松 田 一	三 浦 典 夫	梅 垣 洋 一 郎					

## 編 集 後 記

放射線像研究第6巻第1号一名古屋研究会の雑誌をおとどけします。特別講演は岐阜大仁田先生の半導体による放射線検出——むづかしい内容の判り易い解説と、金森先生の南米の印象——珍しい風景のスライドなどをおりませた楽しい話を聞き、研究発表では7件の最近の成果をうかがいました。定例の名大放射線科図書室が手ぜまとなるほどの盛況でした。

石油ショック以来雑誌の発行がおくれていましたが、できるだけとり戻そうと考えています。筆者各位には原稿期日をお願いします。

郵便代値上げに基き、前号から職場別集中発送をしております。代表の方には御苦勞様ですが宜しくをお願いします。今後はさらに雑誌に演題伺いを刷りこむなどの方法で郵送代手数料を省くことを考えています。 告らん(色ページ)に御注意下さい。(S. H.)

## 放 射 線 像 研 究

発行日

昭和五十一年二月

編 者 集

長 谷 川 伸

〒 182

調布市調布ヶ丘一―五―一  
電気通信大学電子工学科内  
電話〇四二四―八三一―二一六一  
内線 四二〇

発行所

R I I 研 究 会

発行所

竹 中 栄 一

〒 113

東京都文京区本郷七―三―一  
東京大学医学部放射線  
医学教室内  
電話 〇三一八一―五五四―一  
内線 八六七六

印刷所

東京都文京区湯島二―一―七  
株式会社 コスモス  
電話 〇三一八三一―〇九五五