

# 光応答測定による半導体内部構造解析方法

一番ヶ瀬 剛\*

## Analytic method of the optical response mode for semiconductor materials

Tsuyoshi Ichibakase

### Abstract

In this report, the analytic method of the optical response mode for semiconductor materials is given an explanation, and the two samples of electrical characteristics were investigated by means of this analytic method. This analysis is carried out by means of the photoconduction characteristic measurement depend on the electric field strength in the material. The material has different absorption coefficients each wave lengths, and has different complete light absorption lengths. Then, it is possible to select the analysis area at the material. First sample, ITO(Indium Tin Oxide) was used on the glass substrates as the transparent electrode, and ZnSe and CdTe layer was prepared by the vacuum deposition on this ITO. Next sample, ITO was used on the glass substrates as the transparent electrode too, and ZnSe, CdTe and ZnTe layers were prepared by the vacuum deposition on this ITO. From the analytical result of this analytic method, the electric field and potential distribution of two samples became clear.

Keywords: analytic method, optical device, II – VI compounds, CdTe, ZnSe, ITO

### 1. はじめに

半導体ヘテロ接合を解析する場合、最も直接的な方法としては電流－電圧特性を解析する方法がある。半導体のヘテロ接合における電流輸送機構に関するモデルは数多く報告されているので、これらのモデルに当てはめることで電流輸送機構の解析が可能である<sup>(1)～(9)</sup>。しかしながら、接合部分のさらに詳細な構造を解析するにはこの方法だけでは不足な場合が多い。II – VI族化合物半導体などは、デバイスとして利用される場合が多く、純粋な単結晶としてのデータでは実際に使用される状況と食い違う場合もありうる。実デバイスの接合構造を解析するには、デバイスとして作成した試料そのものを用いた解析が不可欠である。

化合物半導体のうちII – VI族化合物半導体などは、光デバイスとして使用される場合が多く、デバイスそのものが光導電性を持つ場合が多い。試料材料が可視光線にたいして吸収特性を持ち、かつ光導電性を持つ場合には、この特性を利用した解析が可能である。試料材料の吸収係数は光の波長により異なる値を持つ。従って、試料に入射する光の波長に対応する吸収特性を持つ。このことから、光の波長ごとに吸収がほぼ完了する距離が異なる。この性質を利用することで、試料材料内

の光電変換の領域を選択することが出来る。さらに、吸収した光は導電キャリアに変換されるので、光電電流として外部へ取り出すことが出来る。接合部の導電キャリアは、再結合が無ければ全て取り出せるが、再結合の確率は試料材料内部に作用する電界強度に直接依存している。従って、この二つの性質を利用することで試料内部の電界強度の解析が可能となる。本論文では、分光感度測定(光波長を変えながら、光導電電流を測定)することで、材料内部の電界強度を解析する方法を提示するとともに二種類の接合試料の内部電界強度を解析した。

### 2. 半導体ヘテロ接合の分光感度特性を用いた解析方法

光導電材料に吸収された光は次の順に光導電電流に変換される。

(光吸収)⇒(キャリア電荷発生)→(再結合による減少)⇒(キャリアによる光導電電流)

光導電電流は、光導電材料の内部に電界を印加することで分離されて光導電電流として取り出される。電界がない状態ではキャリア電荷の一部がトラップされるものなどを除き大半の電荷は消滅するものと考えられる。すなわち、光導電電流は直接内部電界強度を反映している。このことから、光導電材料の光吸収量と光導電電流を比較するこ

とで、電界強度を推定することができる。他方、光導電材料は一般に光波長に対応した吸収係数をもつ。従って、吸収される光波長に応じた吸収特性を持つ。一般にⅡ-Ⅵ族化合物半導体は短波長ほど吸収係数が大きく、長波長にたいして短い領域で吸収を完了する。この性質を利用することで、光導電材料に吸収させる光の波長を変えながら光導電電流を測定することで、材料内部の電界強度を推定することが可能となる。

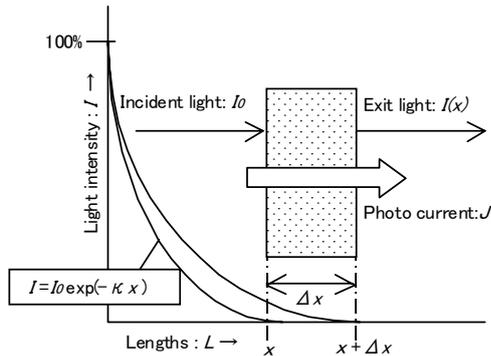


図1 材料中の光吸収と光導電電流  
Fig.1 Light absorbance of the experiment material.

## 2. 1 試料の光吸収と解析の方法

ここで光吸収総量:  $Ab$ 、光導電電流:  $J$  とする。さらに光吸収総量に対する光導電電流への変換割合を  $Tr$  とする。以後  $Tr$  を光電変換係数と呼ぶ。光の吸収過程については、入射する光量:  $I_0$  と透過する光量:  $I(x)$  さらに光吸収係数:  $\kappa$ 、試料の厚み(距離):  $x$  を用いると次の式で表される。

$$I(x) = I_0 \cdot \exp(-\kappa x) \dots\dots\dots (1)$$

図1に示すように、試料内の距離:  $x$  に対して微小な距離:  $\Delta x$  について考える。距離:  $x$  までにはほぼ吸収を終える光の波長:  $\lambda_1$  に対応する吸収係数:  $\kappa_1$  とし距離:  $x + \Delta x$  までにはほぼ吸収を終える光の波長:  $\lambda_2$  に対応する吸収係数:  $\kappa_2$  とする。この微小な距離:  $\Delta x$  に対する光吸収量は次の式で与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta Ab &= I_0 \cdot \exp(-\kappa x) - I_0 \cdot \exp[-\kappa(x + \Delta x)] \\ &= I_0 \cdot \{ \exp(-\kappa x) - \exp[-\kappa(x + \Delta x)] \} \dots\dots (2) \end{aligned}$$

ここで光吸収総量:  $Ab$ 、と光導電電流:  $J$  との間には次の関係が成立する。

$$J = Tr \cdot Ab \dots\dots\dots (3)$$

試料内の距離:  $x$  に対して微小な距離:  $\Delta x$  については(2)式と同様に次の関係が成立する。

$$\begin{aligned} \Delta J &= J(x) - J(x + \Delta x) \\ &= Tr(x) \cdot [Ab(x) - Ab(x + \Delta x)] \dots\dots (4) \end{aligned}$$

(2)、(4)式から次の関係が成立する。

$$\begin{aligned} Tr(x) &= (\Delta J) / (\Delta Ab) \\ &= d(J) / d(Ab) = (dJ/dx) / (dAb/dx) \dots\dots (5) \end{aligned}$$

(5)式から、光電変換係数:  $Tr$  が光導電電流:  $J$  と光吸収総量:  $Ab$  の試料内の解析点である  $x$  の数値微分値によって決定できる。 $x$  は図1で示したように任意の光波長の吸収完了距離に対応している。解析にあたっては、 $x$  に対応する光波長を決定する必要がある。

(1)式から任意の光波長が完全に吸収する距離は無窮大であるが、実際にはほぼ数%となる値を選べば十分である。実験的には、測定誤差の限界値に選ぶのが妥当であると考えられる。すなわち  $(I(x)) / (I_0) = 0.01$  と設定して解析する。

$$x = (-1/\kappa) \ln(0.01) \dots\dots\dots (6)$$

(6)式から  $x$  に対応する  $\kappa$  が決まり、 $\kappa$  に対応する光波長  $\lambda$  が決まる。

(5)式の分母については、(2)式から直接微分できて次の式となる。

$$dAb/dx = I_0 \cdot \kappa \cdot \exp(-\kappa x) \dots\dots (7)$$

解析にあたっては、解析する材料の各光波長に対する吸収係数:  $\kappa$  を測定しておく必要がある。距離:  $x$  が決まるとそれに対応する光波長:  $\lambda$  を決定し、 $\lambda$  に対応する  $\kappa$  を使用して数値計算を実施する。

(5)式の分子についても同様に計算する。すなわち光導電電流:  $J$  は試料の入射光波長に対する分光感度として測定する。各測定波長に対して、対応する  $\kappa$  と  $x$  値が(6)式から決まる。以上の解析方法の手順をまとめると次の通りである。

- ① 解析する試料材料の分光透過率を測定し各波長ごとの吸収係数:  $\kappa$  を決定する。
- ② 解析する試料材料を含むデバイスの分光感度(各波長ごとの光導電電流:  $J$ )を測定する。
- ③ 各波長に相当する完全に吸収する距離:  $x$  を計算する。

計算した  $x$  を用いて、 $J$  及び  $Ab$  を  $x$  で数値微分を行い  $Tr(x)$  を決定する。

## 2. 2 光変換係数 $Tr$ の考察

半導体内のキャリアの連続方程式は、キャリア数:  $n$ 、時間:  $t$ 、拡散係数:  $D$ 、キャリアの移動度:  $\mu$ 、電界の強度:  $F$ 、キャリアの平均寿命時間:  $\tau$ 、そして単位時間に光の入射で発生するキャリア数:  $g$  とすると次の式で表される。

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \mu F \frac{\partial n}{\partial x} - \frac{n}{\tau} + g \dots\dots\dots (8)$$

取り扱いを簡単にするために、中性条件にある半導体内の多数キャリアを無視し、半導体内に光の入射で発生するキャリアにのみに注目する。平衡状態にあり時間微分した  $n$  はゼロになるから (8) 式は全体がゼロになる。光の入射で発生するキャリア発生と電界： $F$ によるキャリア取り出しを考察しており、電界によるキャリアの移動が電流として取り出されると考える。電界によりキャリアが移動する量は  $(n \cdot \mu \cdot F)$ であるから、光導電電流： $J$ とし電子の素電荷： $e$ を用いると次の関係が成立する。

$$J = e \cdot n \cdot \mu \cdot F \dots\dots\dots (9)$$

半導体内部の任意の位置： $x$ にキャリア数： $n$ が発生すると拡散により広がる。このため  $(dn/dx) \propto n$ の関係が成立する。

ここで正の係数： $\alpha$ を用いるとこの関係は比例の関係で表すことができる。また  $n$ は移動中に増加することはないので、 $\alpha$ は  $0 \leq \alpha \leq 1$ の値であり  $n$ の  $x$ による微分値は負である必要がある。従って次の式で表すことができる。

$$\frac{\partial n}{\partial x} = -\alpha n \dots\dots\dots (10)$$

この関係を用いると次の関係式が得られる。

$$\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} = \frac{\partial(-\alpha n)}{\partial x} = -\alpha \frac{\partial n}{\partial x} = \alpha^2 n \dots\dots\dots (11)$$

以上の関係から、(8)式で示される半導体内部のキャリアの連続方程式を変形すると次の関係式になる。

$$0 = D \cdot \alpha^2 \cdot n - \mu \cdot F \cdot \alpha \cdot n - \frac{n}{\tau} + g \quad \text{を变形して}$$

$$n = \frac{g}{\frac{1}{\tau} + \mu \cdot F \cdot \alpha - D \cdot \alpha^2} \dots\dots\dots (12)$$

ここで吸収された全ての光： $Ab$ がキャリア電荷： $g$ に変換されるとすると  $g \propto Ab$ の関係が成立する。(3)式の関係を用いると次の関係が成立する。

$J = Tr \cdot Ab \propto Tr \cdot g$  従って次の関係が成立する。

$$Tr \propto J/g = e \cdot n \cdot \mu \cdot F/g \dots\dots\dots (13)$$

(12)、(13)式から

$$Tr \propto \frac{\mu \cdot F}{\frac{1}{\tau} - D \cdot \alpha^2 + \mu \cdot F \cdot \alpha} \dots\dots\dots (14)$$

(14)式で  $(1/\tau) - D \cdot \alpha^2$ は測定中、定数であれば、次の式に変換できる。

$$F \propto \frac{(1/\tau) - D \cdot \alpha^2}{\mu} \cdot \frac{1}{(1/Tr) - \alpha} \dots\dots (15)$$

ここで  $[(1/\tau) - D \cdot \alpha^2]/\mu$ も測定中は定数であるとするので次の式を得る。

$$F \propto \frac{1}{(1/Tr) - \alpha} \dots\dots\dots (16)$$

(16)式は電界： $F$ を光電変換係数： $Tr$ で表す式であり、比例定数を選ぶ事で定量値を決定できる。また、この解析方法では、移動度、再結合確率などのパラメータは比例定数にまとめられてしまう。 $Tr$ は0から1の間の値を持つと定義すると、 $Tr=0$ では  $F=0$ であり  $Tr=1$ で  $\alpha=1$ のときに  $F=\infty$ の値をもつ。 $\alpha$ については、 $\alpha < 1$ すると  $F$ を有限な値にできる。 $\alpha$ 値はキャリア電荷の生存割合と考えることができる。実際の試料では試料内での電荷トラップなどで失われるロス成分が考えられるので  $\alpha$ 値は  $0 \leq \alpha < 1$ と考えられる。電界強度： $F$ は素子に印加する外部電圧で決まる。従って定数は外部印加電圧で決定できる。この解析方法を使用することで、異種接合内部の電位分布そして拡散距離などの解析が可能である。

解析層が1層あるいは、2層であっても1層目が非常に薄いか、解析に使用する光波長(ここでは可視光)の吸収が無視できる場合には、前記の手法を基本として解析が可能である。

次に、本質的な光吸収層が多層構成での解析法については、以下の手法を使用する。前層である第1層の厚みに対してほぼ光吸収を完了する波長は第2層に到達しない。従って、①第2層の解析には第2層に到達する光波長を使用する。②第2層に到達する光も前層である第1層の吸収を受けている。従って前層を光フィルタと考える。第2層の光解析波長の初期入射光量として、前層(第1層)の光吸収係数と厚みで補正した光量値を使用する。第2層に入射した光解析波長が完全に吸収する距離が解析点である  $x$ となる。③解析する第2層の解析には第2層での光吸収係数を使用する。以上の3点に留意して解析することで、第2層の相対電界強度： $F$ が(16)式から得られる。

解析から、前層である第1層および第2層内部の電界強度分布の相対値が、それぞれ得られる。二つの領域の電界強度分布は結合して一つにする必要があるが、二つの領域の境

界部分は次の条件を満たす必要がある。①境界面の電界強度は連続している②境界面で電界強度の傾き(この傾きは電荷密度を示す)、が連続している③境界面での電位は連続している。これらの連続性の条件を二つの解析データをグラフ上に適用すると、ほぼ妥当な連続関数としての結合された電界強度分布が得られる。

### 3. 実験および解析評価の例1: ZnSe 単層のセル

#### 3.1 試料の製作

試料を形成するためのガラス基板は厚み2mm、面積3.14cm<sup>2</sup>のピアレックスガラス(PYREX: Pyrex glass, Corning Incorporated)を使用した。このガラス基板の上に、透明導電膜として、ITO(Indium Tin Oxide)を直流スパッタリング法で形成した。ITOの比抵抗値は平均値で $2.0 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}$ である。

ZnSe膜は、真空蒸着法により上記ガラス基板とITO膜の上に形成した。製作条件は、真空度 $1.33 \times 10^{-4} \text{ (Pa)}$ 以下の真空装置内で、基板温度270℃蒸発源温度900℃で蒸着した。製作した試料は蒸着後、結晶性の改善のために、真空装置内においてヒーターによる輻射過熱で560℃、3.3分間の熱処理を行った。試料のZnSe側は、面積7.065mm<sup>2</sup>の金蒸着を行って取り出し電極とした。金電極はZnSe材料とオーミックコンタクトを形成する事が知られている<sup>(10)</sup>。金蒸着面およびITOとは銅電極の接触により取り出した。試料は電氣的なノイズ混入を防ぎ、また光導電の影響を防ぐために密閉可能な金属製の容器内に設置し、23℃の環境で測定を行った。

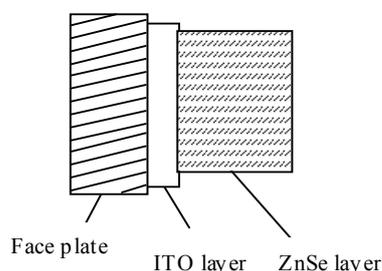


図2 実験セルの構造  
Fig.2 Structure of the experiment cell.

ZnSe膜の分光透過率測定用の試料は、蒸着膜厚を段差計で測定し、同時に分光光度計を用いて分光透過率を測定した。このとき、上記ガラス基板とITO膜を比較用のレファレン

スとして使用することでZnSe膜のみの分光透過率をより正確に評価できる。また上記ITO-ZnSe試料セルを用いて分光感度特性を評価した。評価の際、外部電圧として10Vを印加した。実験に用いたITO-ZnSeセルの構造を図2に示す。

#### 3.2 実験結果

実験に用いたZnSe試料の可視光線(波長:400nm~700nm)での吸収係数: $\kappa$ を図3に示す。吸収係数: $\kappa$ は距離:1 $\mu\text{m}$ に対して示している。また実験に用いたITO-ZnSe(3.44 $\mu\text{m}$ )セルの分光感度特性を図4に示す。感度は最大値を100%となるように規格化して示している。

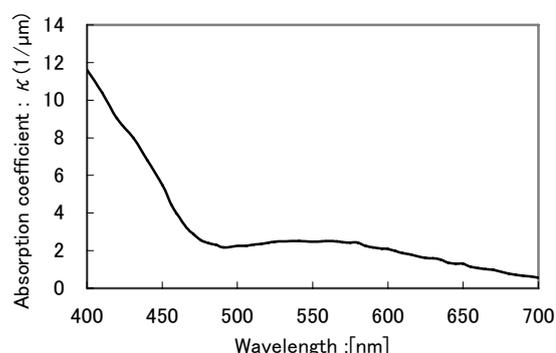


図3 ZnSeの分光吸収係数  
Fig.3 Spectral absorption coefficient of the ZnSe.

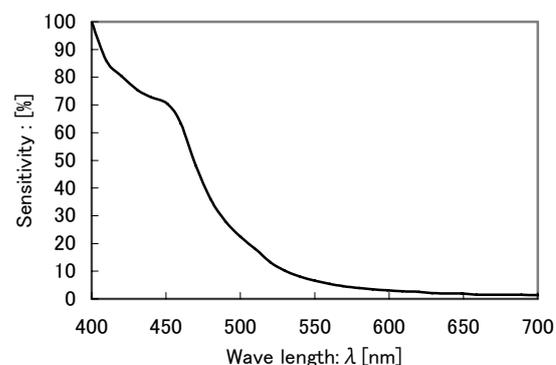


図4 ITO-ZnSe(3.44  $\mu\text{m}$ )の分光感度特性  
Fig.4 Spectral sensitivity of the ITO-ZnSe(3.44  $\mu\text{m}$ )

#### 3.3 試料セルの光電変換係数: $T_r$ 解析

前述2.1で示した方法で試料セルの光電変換係数: $T_r$ をZnSeの厚み方向へ解析した結果を図5に示す。測定に用いた光波長:700nmの光はZnSe内部で約0.39 $\mu\text{m}$ までは吸収が完了しない。従って評価はこの距離から始まる。図中では $T_r$ の最大値が1となるように規格化した値を示す。 $\alpha$ 値としては $\alpha \sim 1$ を使用した。光電変換係数: $T_r$ はITOとの境界近くで最大となっていることを示している。 $T_r$ 値

は距離に対して単調減少を示さずに極小、極大を持った結果となっている。また約 1.85 $\mu\text{m}$  以内ではほぼゼロとなっている。

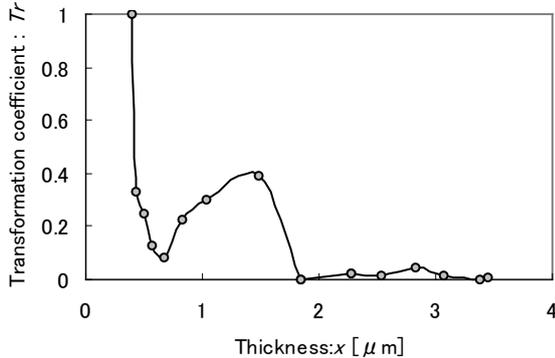


図5 規格化した厚み方向の電流変換係数  
Fig.5 Normalized transformation coefficient vs thickness.

### 3. 4 Tr 値を用いた ZnSe 試料内部の接合構造の解析

Tr 値を用いると (15) 式から試料内部の電界強度を導くことができる。比例定数を選べば試料内部の電界強度を具体的に推定が可能である。電界強度を ZnSe の厚み方向へ解析した結果を図 6 に示す。図中では電界強度の最大値が 1 となるように規格化した値で示す。電界の強度:  $F$ 、電位(ポテンシャル):  $V$ 、電子の電荷量:  $e$ 、電荷の密度:  $N$ 、真空の誘電率:  $\epsilon_0$ 、試料材料の誘電率:  $\epsilon_s$ 。そして試料材料内の距離:  $x$  とすると、ポアソンの方程式からこれらの諸量の関係は次の式で表される。

$$-\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{eN}{\epsilon_0\epsilon_s} = \frac{dF}{dx} \dots\dots\dots (17)$$

すなわち電界の強度:  $F$  の距離に対する微分値は ZnSe 内の電荷量を表している。ZnSe は n 型にしかならない半導体であると考えられている。したがって接合部の空乏層電荷は+電荷のみであり、電界の強度:  $F$  の  $x$  に対する微分値はマイナスであると考えられ、 $x$  方向に対して単調減少となると考えられる。しかしながら図 6 から  $x=0.668\mu\text{m} \sim x=1.476\mu\text{m}$  までの間で  $F$  の微分値は増加傾向を示している。これは負の電荷が存在することを示唆している。この領域に何かの準位にトラップされた空間電荷が存在しているものと推測される。

(16) 式から、電界の強度:  $F$  を  $x$  に対して積分すると電位(ポテンシャル):  $V$  の関係が得られる。電位は外部から印加される電位と関連している。このことから接合部の電位分布の推定が可能である。

図 6 は ZnSe の接合部からの距離:  $x$  にたい

して電位(ポテンシャル)を推定した分布を示している。これは同時に ZnSe のバンドベンディングを表している。ZnSe の接合部の空乏層幅は 1.48 $\mu\text{m}$  程度であろうと推定される。すなわち残りの 1.96 $\mu\text{m}$  程度の領域にはほとんど電界が作用していない。ZnSe に入射した光は電界が作用していない領域では光導電電流として取り出されない。すなわち、発生した大多数のキャリア電荷は再結合していくと考えられる。

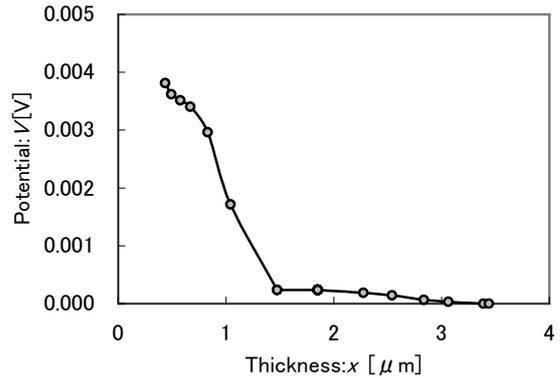


図6 厚み方向の推定電位  
Fig.6 Potential vs thickness.

## 4. 実験および解析評価の例 2 : IT0-ZnSe-CdTe-ZnTe 構成のセル

### 4. 1 試料の製作

試料の製作方法は基本的に前記 3. 1 と同じである。ZnSe 膜は、真空蒸着法により上記ガラス基板と IT0 膜の上に形成した。製作条件は、真空度  $1.33 \times 10^{-4}$  (Pa) 以下の真空装置内で、基板温度 270 $^{\circ}\text{C}$  蒸発源温度 900 $^{\circ}\text{C}$  で 0.1 $\mu\text{m}$  の厚みに蒸着した。CdTe 膜は同じ真空度の装置内で基板温度 270 $^{\circ}\text{C}$  蒸発源温度 650 $^{\circ}\text{C}$  で 1 $\mu\text{m}$  の厚みに蒸着した。3 層目である ZnTe 層は、同じ真空度の装置内で基板温度 225 $^{\circ}\text{C}$  蒸発源温度 775 $^{\circ}\text{C}$  で 1.7 $\mu\text{m}$  の厚みに蒸着した。製作した試料は蒸着後、結晶性の改善のために、真空装置内においてヒータによる輻射過熱で 560 $^{\circ}\text{C}$ 、3 分 18 秒間の熱処理を行った。また CdTe および ZnTe 膜の分光透過率測定用の試料も前記、セル作製条件と同じ条件で製作した。

実験で使用した IT0-ZnSe-CdTe-ZnTe 構成のセル構成図を図 7 に示す。図 8 に、実験セルの分光感度特性を示す。図 8 から明らかなように、実験セルは可視領域から近赤外に及ぶ広い分光感度特性を有することが分かる。図 9 に今回の解析で使用する CdTe および ZnTe 材料の分光透過率から決定した分光

吸収係数を示す。

#### 4. 2 試料の解析

本論文で提示する「分光感度応答電流を使用した接合特性解析の方法」では光吸収を使用するために使用する光の波長によって厚み方向の解析最小距離が制限される。今回の実験に使用したガラス基板は可視光領域しか透過しないので、波長400nmが最小波長となる。CdTe膜で波長400nmの光が吸収を完了するのは約0.132 $\mu\text{m}$ である。この間は解析が出来ない領域となる。この間のデータがないと、定量的な推定が出来ないので以下の方法で推定した。

半導体のp-n接合において遷移領域の幅を計算する方法として、ポアソンの式を積分して電界強度を計算する方法が使用される<sup>(11)</sup>。接合面から距離： $x$ までの領域で空間電荷密度分布を一定と仮定すると、 $x$ 位置の電界強度： $E$ は $x$ の一次関数となる。この関数を $x$ で積分すると $x$ の二次関数となるが、これは電位をあらわす。この電位推定関数： $V(x)$ については、以下の条件を満たす必要がある。① $x=0$ (接合面)では $V(x)=0$ とする。②接合面から離れた、推定開始点で電界強度は連続している③推定開始点で電界強度の傾き(この傾きは電荷密度を示す)、が連続している④推定開始点での電位は連続している。

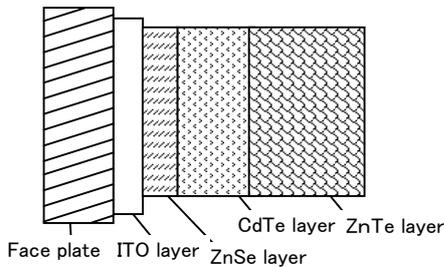


図7 ITO-ZnSe-CdTe-ZnTeセルの構造  
Fig.7 Structure of the ITO-ZnSe-CdTe-ZnTe cell.

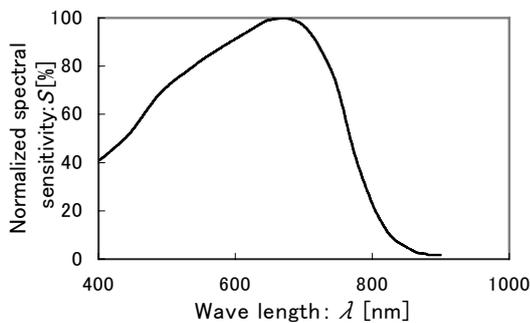


図8 ITO-ZnSe-CdTe-ZnTeセルの分光感度特性  
Fig.8 Normalized spectral sensitivity of the ITO-ZnSe-CdTe-ZnTe cell.

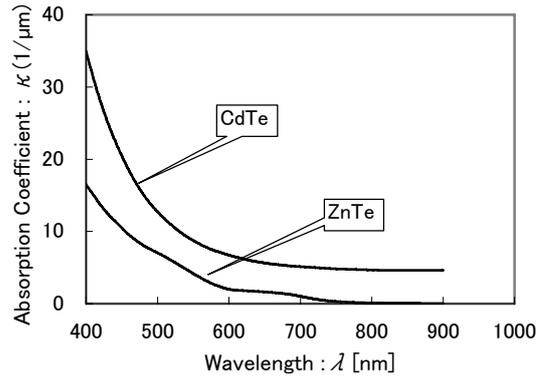


図9 CdTe、ZnTeの分光吸収係数  
Fig.9 Spectral absorption coefficient of the CdTe & ZnTe.

これらの連続性の条件を解析データと、接合面から距離： $x$ までの領域で空間密度分布を一定と仮定した関数にグラフ上で適用すると、ほぼ妥当な推定が可能である。特に、解析から得られる推定開始点近くの電界強度は直線に近いので、無理の無い推定が可能である。

前記の方法を使用するとCdTe層の接合部分からCdTe層の終端部分、さらにCdTe層に続くZnTe層の領域について、相対値としての電界強度分布が得られる。内部電界強度をCdTe層の膜厚方向に積分するとCdTe層内部の電位が計算できる。ここで基板ガラス上の透明導電膜からZnSe層までの電位は、ZnSe層の厚みが0.1 $\mu\text{m}$ の場合、ほとんど無視できる<sup>(12)</sup>。従って実験セルに印加する外部印加電圧と実験セル終端の電位はほぼ一致する。ほぼ一致するとは、外部印加電圧がゼロでも接合部には拡散電位が発生しているため、正確には拡散電位を考慮する必要がある。拡散電位は接合を形成する材料の禁止帯幅合計値を超えることはない。そのほかに、同一材料内部でも欠陥準位密度の差による、拡散電位の発生も考えられる。この場合も半導体材料の特性から禁止帯幅の1/2を超えることはないと推定される。これらの内部電位の存在は、電界強度の解析結果からある程度推定できる。拡散電位は外部印加電圧に比べると比較的小さいが、考慮して加算する。最終的に、解析結果から得られる電界強度を距離で積分することで得られる実験セル終端の電位と、内部拡散電位を考慮した外部印加電圧は一致するとして、解析を行う。以上の計算から、実験セル層内部の電界と電位が推定できる。

#### 4. 3 解析結果

実験セルは真空装置内において熱処理を行うために試料の厚みがやや減少する。実験セル最終のCdTe層厚みは0.787 $\mu\text{m}$ である。またZnTe終端の

厚みは  $2.43\mu\text{m}$  である。解析条件として、外部印加電圧  $23\text{V}$  を IT0-ZnSe 側に (+)、ZnTe 側に (-) を印加して解析を行った。解析時の暗電流は約  $0.03\text{nA}$  である。

図 10 に IT0-ZnSe-CdTe-ZnTe セル構成でのセル内部電界強度の推定を示す。図中には CdTe 層と ZnTe 層の区分を示す。

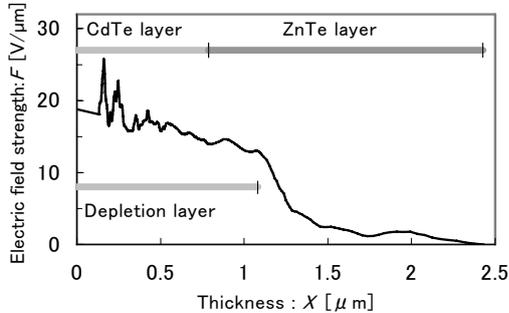


図10 CdTe-ZnTe層の厚み方向の電界強度  
Fig.10 Electric field strength vs thickness of the CdTe-ZnTe layer.

解析結果から CdTe 層開始面から約  $1.08\mu\text{m}$  までは膜厚に沿った電界強度の増減が見られるが、平均すると内部電界強度が低下を続ける。接合部から電界強度が距離に比例して変化する現象は、半導体 p-n 接合の接合部の空乏層領域に見られる現象である。この構成での約  $1.08\mu\text{m}$  までは、ほぼこれと同じくこの領域が空乏層領域となっているものと推定される。この領域は ZnTe 層まで達しており、この構成での主要な空乏層領域と考えられる。図中ではこの区間を表示して示す。

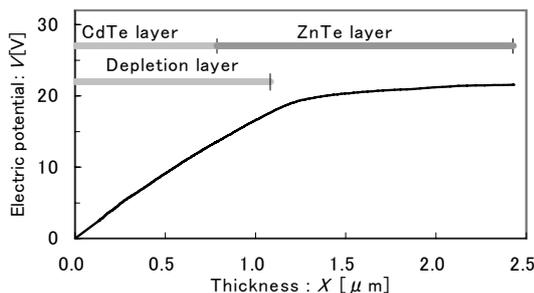


図 11 CdTe-ZnTe層の厚み方向の内部電位  
Fig.11 Electric potential vs thickness of the CdTe-ZnTe layer.

図 11 に前記、電界強度を厚み方向に積分することで得られる内部電位の推定を示す。電位の推定には、前述のように外部印加電圧がゼロでも接合部には拡散電位が発生するため、この拡散電位を考慮して推定した。拡散電位の推定には CdTe の禁止帯幅:  $1.44[\text{eV}]$ 、ZnTe の禁止帯幅:  $2.26[\text{eV}]$  を用いた<sup>(13)</sup>。電界分布の傾向から試料内部は、大まかに数領域に区分できる。この領域には

CdTe-ZnTe 接合と ZnTe 内部で欠陥準位密度の差によると考えられる拡散電位の発生が考えられる。

内部電位は約  $1.3\mu\text{m}$  まで膜厚方向へ増加を続け、その後増加傾向は減少する。

#### 4. 4 本解析方法の限界と発展性について

本解析方法の最大のメリットは実デバイスを非破壊で評価できる点にある。例えば、工場生産でまれに少数発生する不良品の解析など、単品の固有の不良試料についても原因解析が可能となる。その一方で限界も考えられる。まず考えられるのはこの方法では吸収係数が試料膜内で一様であると仮定している点にある。結晶膜は成長の初期に欠陥、不均一を発生しやすいので欠陥の少ない試料で求めた吸収係数をそのまま適用することには無理がある。また実試料内部で想定外のキャリア電荷のロスを含む場合にも評価を誤る可能性がある。

本解析方法のもう一つの限界として、光吸収を使用するため使用する光の波長によって厚み方向の解析最小距離が制限されることである。この制限をできるだけ最小にするにはより短波長の光、すなわち紫外線を使用することになるが、これにはデバイス上の別の制限がでてくる。例えば基板光透過窓材料の紫外線吸収が問題となる。これらの限界を補完する方法として C-V 法、すなわち空乏層容量の電圧依存性による解析を併用することが考えられる。C-V 法では電極の自由度が大きいため完全結晶に近い試料との比較分析も可能となる。C-V 法では実デバイスの評価ができない場合、例えばデバイスが撮像管ターゲットのような他方の電極が電子線走査になる場合などには本解析方法が相互に補完できる評価方法になると考えられる。なお C-V 法では測定周波数を変化させて詳細な分析を行うが、本解析方法でも入射する光の光量をパルス状に入射する、あるいは外部電圧を変化させるなどの方法を導入すれば更に解析方法として向上するものと考えられる。

#### 5. むすび

本報告では、分光感度測定することで、材料内部の電界強度を解析する方法を提示した。この方法では II-VI 族化合物半導体などの光デバイスで光導電性が測定できる材料・構成であれば実デバイスの接合構造を解析することが可能である。従って製作条件や構造の違いによるデバイス内の微妙な違いや、特異な特性の解析に応用することが可能である。この解析方法を IT0-ZnSe ( $3.44\mu\text{m}$ ) 接合試料の内部電界強度の解析に応用して ZnSe

側の接合部の解析を行った。さらに多層構成である IT0-ZnSe-CdTe-ZnTe セルについても同様の解析を行った。この解析から、セル内部の電界強度分布を推定することができた。電界強度分布が明らかになると、動作中のセル内部の電荷分布などを推定できる。

以上のようにこの解析方法では、電流-電圧特性だけでは把握できない詳細な構造の解析が可能である。

## 参考文献

- [1] Anderson, R.L. (1960a). Germanium Gallium Arsenide Contacts. Ph.D. Thesis, Syracuse Univ., Syracuse, New York.
- [2] Anderson, R.L. (1960b). Junctions between Ge and GaAs. *Proc. Int. Conf. Semicond., Prague, 1960 (Czech. Acad. Sci.)*, p. 563.
- [3] Anderson, R.L. (1960c). Germanium-Gallium arsenide heterojunctions. *IBM J. Res. Develop.* **4**, 283
- [4] Anderson, R.L. (1962). Experiments on Ge-GaAs heterojunctions. *Solid-State Electron.* **5**, 341.
- [5] Perlman, S.S. (1964). Heterojunction photovoltaic cells. *Advan. Energy Convers.* **4**, 184.
- [6] Perlman, S. S., and Feucht, D. L. (1964). p-n heterojunctions. *Solid-State Electron.* **7**, 911.
- [7] Van Opdrop, C., Kanerva, H. K. J. (1967). Current-Voltage characteristics and capacitance of isotype heterojunctions. *Solid-State Electron.* **10**, 401
- [8] Donnelly, J. P. (1965). Studies of Ge-GeAs and Ge-Si Heterojunctions. Ph.D. Thesis, Carnegie Inst. of Technol., Pittsburgh, Pennsylvania.
- [9] Donnelly, J. P., and Milnes, A. G. (1965). The capacitance of double saturation nGe-nSi heterojunctions. *Proc. IEEE* **53**, 2109.
- [10] Nojima, K., and Ibuki, S. (1966). Preparation and some properties of ZnSe diodes. *Jap. J. Appl. Phys.* **5**, 253.
- [11] 原留美吉: 半導体物性工学の基礎 (工業調査会 1980) p.213~214.
- [12] 一番ヶ瀬 剛: 「II-VI族化合物半導体 ZnSe 基板の IT0 との電気特性」, 電学論 E, **127**, 4, pp. 234-240 (2007-4)
- [13] 高橋 清: 半導体工学-半導体物性の基礎- (森北出版, 1982)