

II-VI族化合物半導体 ITO-ZnSe-CdTe セルの電気特性

一番ヶ瀬 剛*

Transport properties of the ITO-ZnSe-CdTe cell

Tsuyoshi Ichibakase

Abstract

In this report, 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. Then, the electrical characteristics of this sample were investigated by means of the electric current transport analysis. The ZnSe-CdTe sample that CdTe layer is prepared on ITO-ZnSe(0.1 μ m) substrate has not high-density level at the junction surface, and the CdTe layer with little lattice imperfection can be prepared. From the analysis, the ZnSe-CdTe junction has the p type bending band structure on the CdTe side, and has the n type bending band structure on the ZnSe side. This ITO-ZnSe(0.1 μ m)-CdTe sample was tested as a photo-cell for visible-light. This ITO-ZnSe(0.1 μ m)-CdTe sample has not sufficient electric current response for the light absorption of CdTe layer. It is presumed that the electric field in the CdTe layer is not enough to drive the cell as a photo sensor.

Keywords: II-VI compounds, CdTe, ZnSe, ITO, transport properties, optical device,

1. はじめに

II-VI族化合物半導体は従来からオプトエレクトロニクス材料として使用されてきた。II-VI族化合物半導体の中で CdTe は禁制帯幅が可視光線の吸収に適しており、その光電変換特性を利用して高感度のセンサーあるいは、簡易の太陽電池としても利用されてきた。化合物半導体を用いてヘテロ接合を有効に形成するには基板材料を適切に選ぶ必要があるが、II-VI族化合物半導体においては ZnSe を最初に形成して基板材料とするのが有効である。ZnSe はII-VI族化合物半導体の中では禁制帯幅が広く、可視光を透過する。このためオプトエレクトロニクスデバイスを構成するための窓材料に適している。さらに高温状態でも組成が安定している。このような理由から ZnSe を基板として使用した場合には後に続くII-VI族化合物半導体の結晶性の改善に役立つ。

本報告では直流スパッタリングによりガラス基板上に透明導電膜として ITO(Indium Tin Oxide) を形成し、さらに真空蒸着で形成された ZnSe を形成して窓材料基板とし、CdTe を同じく真空蒸着により形成して光センサーセルを構成した。このセ

ルについて電気特性を、電流輸送機構の解析を中心に検討した。この解析によりガラス基板上に真空蒸着で形成された ITO-ZnSe-CdTe セルの電流輸送機構の解明を試みた。さらに、この解析結果を通じて ITO-ZnSe のデバイス形成基板としての有効性および、この構造での光センサーとしての有効性を検討した。

2. 半導体ヘテロ接合の電流輸送モデル

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が、大きく分類すると次の4モデルがある。(i) 拡散モデル(diffusion theory)と呼ばれるもので Anderson^{[1][2][3][4]}によって基本モデルが提唱された。(ii) エミッションモデル(emission model)。古典的なこのモデルは Perlman^{[5][6]}によって示された。(iii) 2重ショットキーモデル(double shottky model)。このモデルについては Van Opdrongh と Kanerva^[7]の報告がある。(iv) 再結合-トンネルモデル^{[8][9]}。接合の片方で拡散による電流輸送を生じ、もう片方で界面準位へのトンネル効果による電荷の流れがあるときには、トンネル効果による特性を持つ。このうち拡散とエミッションモデルの電流輸送は、

内部障壁を通した拡散電流であり次の関数形に従う。

e : 電子の電荷、 V : 接合部の電圧、 k : ボルツマン定数、 T : 絶対温度とする。また接合部を流れる全電流を J とすると

$$J \propto \{ \exp(eV/kT) - 1 \} \dots\dots\dots (1)$$

拡散とエミッションモデルでは基本的に (1) 式を含む関数が一義的に決まる。また接合部でトンネル効果を生じる場合、 $J \sim \exp(\beta V)$ に従う (β : 定数)。このほか、接合の片方の半導体が逆方向特性になっており、「なだれ(avalanche)」・ブレークダウンを生じた場合には $J \sim V^m$ に従う (m : 定数)。

3. 電流輸送機構の解析方法

半導体ヘテロ接合の電流輸送機構を電流-電圧特性から解析する場合には、前記のモデル理論を適用して解析する。拡散モデルでは基本的に (1) 式を含む関数が一義的に決まる。ここで試料を通して流れる全電流を J とし、試料自体の抵抗値を R とする。さらに試料へ加える外部電圧を V_{out} とすると次の関係が成立する。

$$V_{out} = V + R \cdot J \dots\dots\dots (2)$$

試料自体の抵抗値: R は試料の製作条件によって変化するため評価する試料自体について決める必要がある。測定で得られた J 、 V_{out} と真値の R が決まれば、 J vs V の関係として唯一の関数が決まる。このため、測定で得られた J vs V の関係は、拡散電流の理論曲線と全部あるいは一部が一致する。

半導体ヘテロ接合では、接合面に結晶の格子定数の違いあるいは熱膨張係数の違いによるストレスから、多くの準位(dangling bond)が発生する。これら接合部に形成される界面準位に蓄積した電荷は接合面での電位を変化させる。ヘテロ接合では、接合面を境として二つの領域の電位は二分される。ヘテロ接合の片方の材料により形成されるバンドベンディングの作る接合に作用する電位 v_1 、さらに残りの接合に作用する電位 v_2 とすると $V = v_1 + v_2$ の関係が成立する。 v_1 と v_2 の電位配分は接合準位に蓄積される電荷の量により決まる。この場合でも接合面を通して流れる全電流: J は試料全体を通して共通である。

測定では試料へ加える外部電圧: V_{out} をゼロから増加させた。初期の双方の接合への電圧配分は、接合面の接合容量の配分比から始まると考えられる。仮に両接合に電圧が等分配されるとすれば、電流-電圧特性関数の電流の大きい側から電荷が

多く流入する。過剰な電荷は接合面に留まり空間電荷を形成する。このためこの接合に作用する正味の電圧: v は外部電位: V を打ち消す方向に作用し、外部電位: V よりも小さくなる。電位バランスが崩れることで電荷の流入は平衡状態へ移行するものと考えられる。さらにこの平衡状態から僅かに外部電圧: V_{out} が上昇した場合を考える。外部電圧: V_{out} の変化分によって生じる各接合部の電圧配分は、接合面の接合容量の配分比によって決まり、平衡状態での電位配分: v/V とは関係ない増加をする。この電位上昇によって増加する電流変化についても電流-電圧特性関数の電荷流入量の多い接合側から多くの電荷が流入する。従って、電流-電圧特性は、あたかも拡散電流関数の電流値: J の大きい接合に支配されるように変化する。すなわち v_1 と v_2 の比率は、二つの接合における電荷輸送の式に従って変化し平衡状態に至るものと考えられる。本報告では、測定により得られた接合の電流-電圧特性に上記の理論計算値を重ね合わせ、特性データが一致するまで変数を変化させていくことで解析を進めた。この他に、接合部でトンネル効果を生じる場合、および接合の片方の半導体が逆方向特性で「なだれ」・ブレークダウンを生じた場合には、いずれも $\ln(J)$ と V の関係、もしくは $\ln(J)$ と $\ln(V)$ の関係において直線性が成立するので容易に判断できる。

4. 実験および実験結果

〈4.1〉 試料の作成と評価方法

試料を形成するためのガラス基板は厚み 2mm、面積 3.14cm² のパイレックスガラス (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。

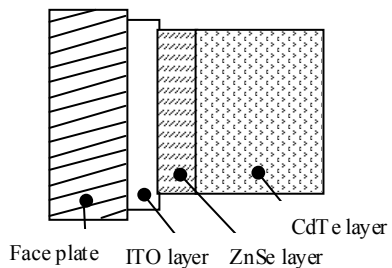


図1 実験セルの構造
Fig.1. Structure of the experiment cell

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 1.33×10^{-4} (Pa) 以下の真空装置内で、基板温度 270°C 蒸発源温度 900°C で蒸着した。CdTe 膜は同じ真空度の装置内で基板温度 270°C 蒸発源温度 650°C で蒸着した。また ZnSe, CdTe の各単一材料からなる蒸着膜をパイレックスガラス上に直接形成し、分光透過率の測定に使用した。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°C 、3.3 分間の熱処理を行った。試料の ZnSe、及び CdTe 側は、面積 7.065mm^2 の金蒸着を行って取り出し電極とした。金電極は ZnSe, CdTe の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^{[10][11]}。金蒸着面および ITO とは銅電極の接触により取り出した。試料は電気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°C の環境で測定を行った。

試料の電気測定には、定電圧電源とナノアンペアーまで測定可能な電流計および電圧計を使用し、電圧を零ボルトから増加させる方法で電圧と試料に流れる電流を測定した。ZnSe, CdTe からなる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。これにより、各波長での吸収係数を算出した。実験に用いた ITO-ZnSe-CdTe セルの構造を図 1 に示す。

〈4.2〉 実験結果

パイレックスガラス上に形成した ITO-ZnSe の 2 層からなる基板層はセンサー材料 CdTe の結晶成長基板であり、ZnSe 層内の結晶欠陥を減らすと同時に、電流取り出し用の電極としての役割とセンサー外部から入射する入射光の透過窓材料としての役割を持つ。しかし、ITO, ZnSe とともに強い n 型の半導体と考えられており、その接合も電気的な接合特性を持つ。実際に ITO-ZnSe ($3.44\mu\text{m}$) 試料について電圧-電流特性を評価すると、接合面を境界として、ITO, ZnSe とともに n 型のバンドベンディングを生じていると考えられる特性を示した。しかし、ZnSe の厚みが $0.1\mu\text{m}$ の場合には、ほとんどオーミックと考えられる特性を示した。図 2 に ITO-ZnSe ($0.1\mu\text{m}$) の試料における、電圧-電流特性を示す。

図 3 に示すのは、パイレックスガラス上に ITO を形成し、これに続けて CdTe を $0.8\mu\text{m}$ の厚みに形成した試料についての電圧-電流特性を示す。電圧は外部電圧であり、試料の内部抵抗補正は行っていない。図から明らかな

ように整流特性を示しており ITO を + とし CdTe を - とする方向に順特性を示している。

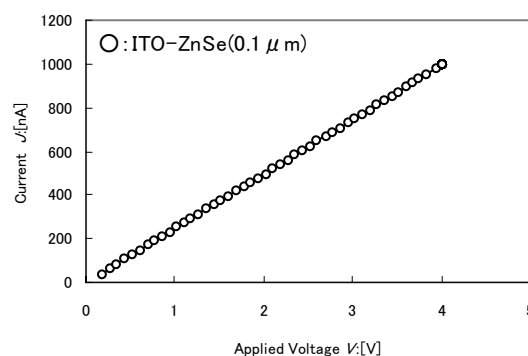


図2 ITO-ZnSe($0.1\mu\text{m}$)接合の電流・電圧特性
Fig.2. Current vs Voltage characteristic of the ITO-ZnSe($0.1\mu\text{m}$) Junction.

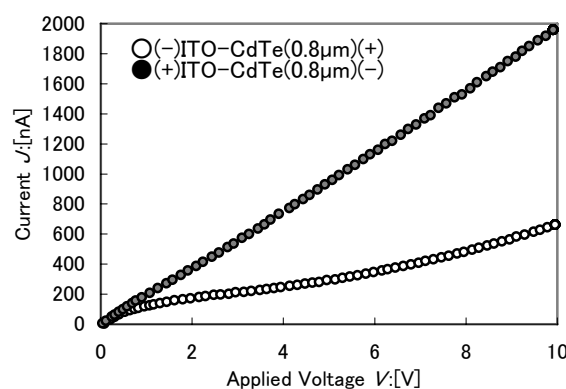


図3 ITO-CdTe($0.8\mu\text{m}$)接合の電流・電圧特性
Fig.3. Current vs Voltage characteristic of the ITO-CdTe($0.8\mu\text{m}$) Junction.

図 4、図 5 に示すのは、試料自体の持つ抵抗値を補正し、接合部分に加わる正味の電圧に対して電流値を対数表示した特性を示す。図 4 は ITO を - とし CdTe を + とする方向に電圧を印加した場合の特性であり、図 5 は ITO を + とし CdTe を - とする方向に電圧を印加した場合の特性を示す。試料自体の抵抗値: R については $R=3.66 \times 10^6$ [Ω] と推定した。図から二つの測定値は V の変化の途中で傾向が変わっており、複数の関数の合成であると考えられる。

図 6 に示すのは、パイレックスガラス上に ITO-ZnSe ($0.1\mu\text{m}$) を形成し、これに続けて CdTe を $0.8\mu\text{m}$ の厚みに形成した試料についての電圧-電流特性を示す。電圧は外部電圧であり、試料の内部抵抗補正は行っていない。図から明らかなように僅かな整流特性を示しており ITO を - とし CdTe を + とする方向に順特性を示している。

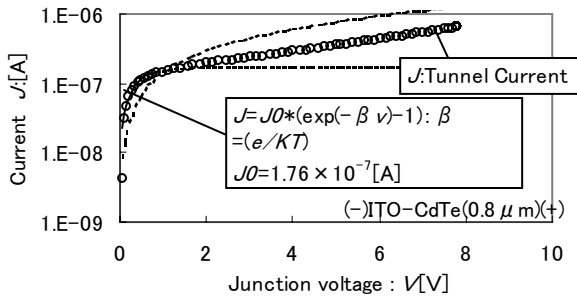


図4 ITO-CdTe(0.8 μm)接合の電流・電圧特性
Fig.4. Current vs Voltage characteristic of the ITO-CdTe(0.8 μm) Junction.

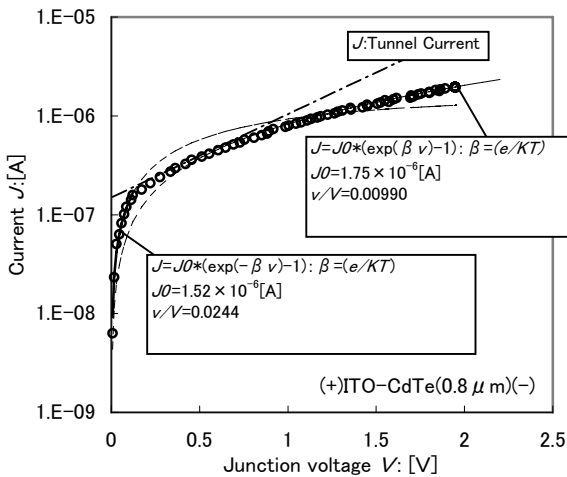


図5 ITO-CdTe(0.8 μm)接合の電流・電圧特性
Fig.5. Current vs Voltage characteristic of the ITO-CdTe(0.8 μm) Junction.

図7、図8に示すのは、試料自体の持つ抵抗値を補正し、接合部分に加わる正味の電圧に対して電流値を対数表示した特性を示す。図7はITOを-としCdTeを+とする方向に電圧を印加した場合の特性であり、図8はITOを+としCdTeを-とする方向に電圧を印加した場合の特性を示す。試料自体の抵抗値： R については $R=1.44 \times 10^6$ [Ω]と推定した。図4、図5とは異なる傾向を示しているが、同じように複数の関数の合成であると考えられる。

ZnSeとCdTeについては個々の材料について、パイレックスガラス上に直接形成し、分光透過率の測定を行った。この測定から試料の各波長での吸収係数を算出した。この吸収係数を使用すると、可視光の代表的な波長R：(700nm), G：(555nm), B：(400nm)について、実験に用いたITO-ZnSe-CdTeセル内での光吸収過程を推定できる。図10に3波長の光の吸収特性を示す。今回実験に用いたITO-ZnSe-CdTeセルについては、光センサーとしての感度特性を測定した。評価はITO側

を+としCdTe側を-とした場合について実施した。測定は図11に最大感度を1として規格化した相対分光感度特性を示す。図11には、上記ZnSe, CdTeの分光吸収係数を用いて、ZnSe透過後のCdTe層の光吸収量を同時に示している。

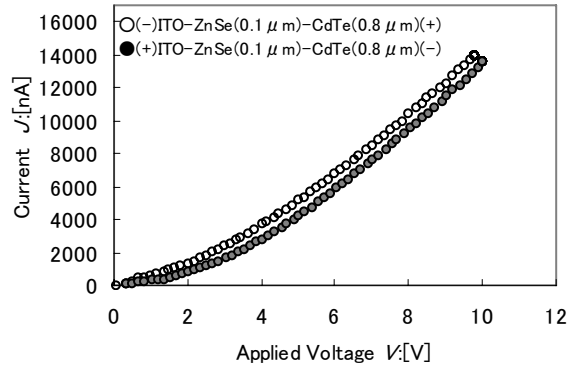


図6 ITO-ZnSe-CdTe接合の電流・電圧特性
Fig.6. Current vs Voltage characteristic of the ITO-ZnSe(0.1 μm)-CdTe(0.8 μm) Junction.

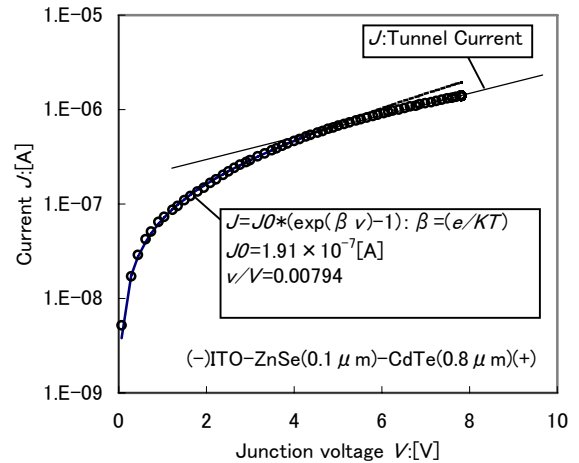


図7 ITO-ZnSe-CdTe接合の電流・電圧特性
Fig.7. Current vs Voltage characteristic of the ITO-ZnSe(0.1 μm)-CdTe(0.8 μm) Junction.

5. 電流-電圧特性の解析と考察

〈5-1〉 ITO-CdTe(0.8 μm)試料の解析

図4にITO-CdTe(0.8 μm)試料について、ITO側を-としCdTe側を+とした場合について、拡散理論を適用し理論関数との比較を行った結果を示す。接合部の電圧で約1.32Vまでは逆方向の拡散理論によく一致する。この場合には電流を支配する接合部の正味の電圧： v は接合部全体の電圧： V に対して $v=0.0557 \times V$ の関係にあり拡散の関数は次の通りである。

e : 電子の電荷の絶対値、 k : ボルツマン定数、 T : 絶対温度そして v [V]を用いて

$$J=1.76 \times 10^{-7} \times \{\exp(-eV/kT)-1\} \quad [A]$$

接合部の電圧で約 1.32V より大きな領域では、順方向の拡散電流へ移行すると思われたが、図 4 から明らかなように $\ln(J)$ と V との間に直線関係が見られ $J \sim \exp(\beta V)$ の関数形に従うトンネル効果生じている。ここで $\beta = 0.210$ と推定した。ITO-CdTe 接合では接合面に密度の大きい準位を発生しており準金属領域を形成しているものと考えられる。そして ITO、CdTe の双方で n 型のバンドベンディングを生じているものと考えられる。接合部の電圧で約 1.32V より小さな電位では、CdTe 側からの逆方向拡散電流が支配的である。約 1.32V より大きな領域では、ITO 側からの順方向の拡散電流へ移行すると同時に ITO 拡散領域でのトンネル効果を生じている。この種類のトンネル効果は、順方向でしか生じない。すなわち、ITO 拡散距離の縮小からトンネル効果へ移行していると考えられる。

図 5 に示すのは ITO-CdTe (0.8 μ m) 試料について、ITO 側を+とし CdTe 側を-とした場合について、拡散理論を適用し理論関数との比較を行った結果である。接合部の電圧で約 0.117V までは逆方向の拡散理論によく一致する。この場合には電流を支配する接合部の正味の電圧： v は接合部全体の電圧： V に対して $v=0.0244 \times V$ の関係にあり拡散の関数は次の通りである。

$$J=1.52 \times 10^{-6} \times \{\exp(-eV/kT)-1\} \quad [A]$$

接合部の電圧で約 0.117V より大きな領域では、トンネル効果と考えられる特性が続いたあと順方向の拡散電流へ移行する。この場合には電流を支配する接合部の正味の電圧： v は接合部全体の電圧： V に対して $v=0.00990 \times V$ の関係にあり拡散の関数は次の通りである。

$$J=1.75 \times 10^{-6} \times \{\exp(-eV/kT)-1\} \quad [A]$$

接合部の電圧で約 0.117V より小さな電位では、ITO 側からの逆方向拡散電流が支配的である。この間は CdTe 接合部には、接合の残りの電位が全て分配されており、この電位で CdTe 領域でのトンネル電流へ移行する。この後で CdTe 側からの順方向の拡散電流へ移行する。これらの一連の現象は電流関数の電流値： J の大きい関数に支配されるように変化している。

図 7 に ITO-ZnSe (0.1 μ m)-CdTe (0.8 μ m) 試料について、ITO 側を-とし CdTe 側を+とした場合について、拡散理論を適用し理論関数との比較を行った結果を示す。

接合部の電圧で約 5.22V までは順方向の拡散理論によく一致する。この場合には電流を支配する接合部の正味の電圧： v は接合部全体の電圧： V に対して $v=0.0794 \times V$ の関係にあり拡散の関数は次の通りである。

$$J=1.91 \times 10^{-7} \times \{\exp(eV/kT)-1\} \quad [A]$$

接合部の電圧で約 5.22V より大きな領域では、トンネル効果による電流へ移行する。ZnSe-CdTe 接合では接合面に準位があるものの、ZnSe 側で n 型 CdTe 側で p 型のバンドベンディングを生じているものと考えられ、逆方向の拡散電流は現れない。接合部では ZnSe の禁制帯幅が CdTe よりも大きいことから ZnSe の作る障壁高さが大きく、接合特性を支配していると考えられる。接合電圧の上昇とともに ZnSe 側の拡散距離が収縮することで、接合部分の準位へ向かってトンネル効果を生じているものと考えられる。図 8 に ITO 側を+とし CdTe 側を-とした場合について、拡散理論を適用し理論関数との比較を行った結果を示す。接合部の電圧で約 1.16V までは逆方向の拡散理論によく一致する。この場合には電流を支配する接合部の正味の電圧： v は接合部全体の電圧： V に対して $v=0.00999 \times V$ の関係にあり拡散の関数は次の通りである。

$$J=8.28 \times 10^{-7} \times \{\exp(-eV/kT)-1\} \quad [A]$$

この評価では順方向拡散電流特性が現れない。

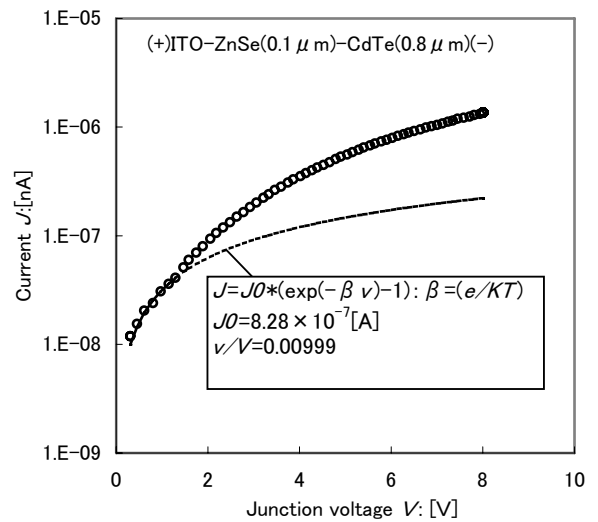


図8 ITO-ZnSe-CdTe接合の電流・電圧特性
Fig.8. Current vs Voltage characteristic of the ITO-ZnSe(0.1 μ m)-CdTe(0.8 μ m) Junction.

図 9 に示すのは、図 8 での特性を電流、電圧値とも対数表示した特性を示す。図から電圧 V の大きい、約 1.16V 以上の領域で $\ln(J)$

と $\ln(J)$ は直線関係にあることがわかる。これは「なだれ機構」(avalanche)タイプのブレークダウンを起こしている事を示しており $J \sim V^\beta$: $\beta=1.93$ の関係を示している。

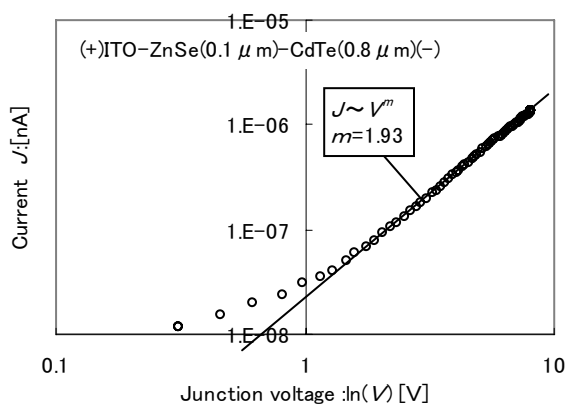


図9 ITO-ZnSe-CdTe接合の電流・電圧特性
Fig.9. Current vs Voltage characteristic of the ITO-ZnSe(0.1 μm) -CdTe(0.8 μm) Junction.

この逆方向拡散電流の障壁の主体は先の場合と同じく ZnSe であろうと考えられる。接合部の電圧で約 1.16V までは、空間電荷より ZnSe 接合の電位が抑えられている間 CdTe に残りの電位が作用する。この過程で接合電圧の増加により「なだれ機構」によるブレークダウンに移行する。この現象を生じるには、キャリアを加速するための逆方向の電位と「なだれ機構」を起こすに十分な障壁の幅(空乏層)とが必要である。この領域として ZnSe と CdTe の両方が考えられるが、ZnSe の厚みは 0.1 μm と薄すぎる。また「なだれ機構」を起こすまで空間電荷で電位が低く抑えられている。このことから「なだれ機構」は CdTe の領域で発生していると考えられる。CdTe で「なだれ機構」を起こすためには、接合面の準位があまり高密度でない必要がある。また CdTe 結晶内の欠陥も少ないことが必要である。結晶格子の不整合などで接合面の準位が多すぎ、また欠陥が多い場合には、前記の「なだれ機構」を起こす条件を満たさなくなる。事実、ITO に直接 CdTe を形成した場合には「なだれ機構」が観測されなかった。すなわち、ZnSe 層は 0.1 μm であっても、CdTe 内に欠陥の少ない結晶形成に寄与しているものと考えられる。

〈5・2〉 ITO-ZnSe-CdTe セルの分光特性評価

図1の構成で光センサーとして使用する場合に

は、CdTe 層が光感度領域となる。

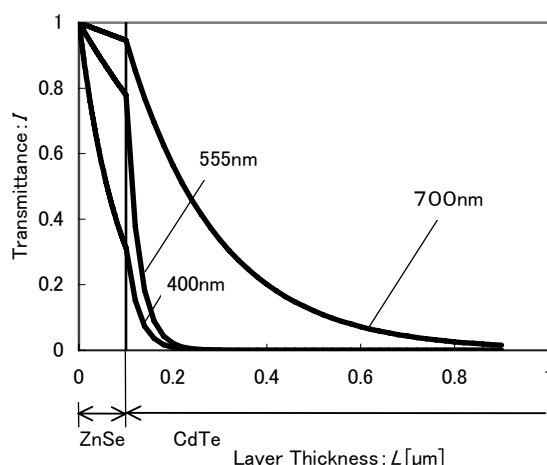


図10 ZnSe-CdTe 試料内における3波長の吸収特性
Fig.10. Transmittance of 3 waves on the ZnSe -CdTe cell.

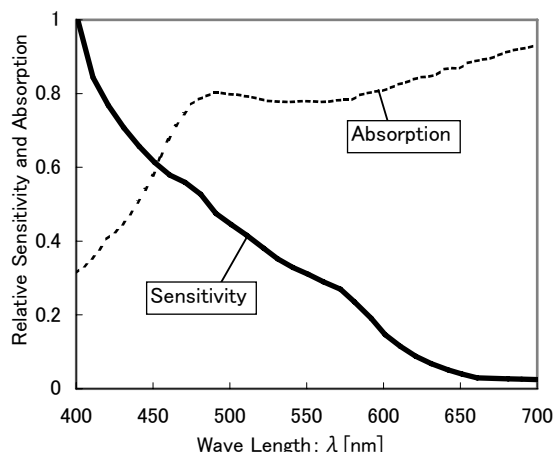


図11 ZnSe-CdTeセルの相対分光感度と分光吸収
Fig.11. Relative sensitivity and absorption of the ZnSe -CdTe cell.

図10から可視光のうち 400nm 以下の波長は 1/3 程度しか CdTe 層に達しない。しかし 700nm の光は 0.8 μm までに大半が CdTe 層に吸収される。吸収された光が全て CdTe 層で光電変換されるとすると、図11に示す2つのデータは一致するはずであるが、異なる特性を示している。これはセル内の電位分布に依存しているものと考えられる。図1のセルを光センサーとして使用する場合には、CdTe 層に大半の電界が作用することが理想である。この構造のセルは ZnSe 層を使用することで、CdTe 層に効果的に電界が作用するための接合部分の改善、CdTe 結晶性の改善が成されていることが電気特性から確認できている。そして効果的に電界が作用するためには CdTe 側を一電位にすることが必要である。しかしながら、電気特性の解析から、CdTe に十分な電界を配分しようとすると「なだれ機構」(avalanche)タイプのブレークダ

ウンに移行している。分光感度の評価はブレイクダウンの生じない領域でしか測定できない。従ってこの構造では CdTe 層に効果的に電界が作用できない。この構成で光センサーとして使用する場合には更なる改善が必要である。

6. むすび

直流スパッタリングによりガラス基板上に透明導電膜として ITO(Indium Tin Oxide)を形成し、さらに真空蒸着で形成された ZnSe を形成して窓材料基板とし、CdTe を同じく真空蒸着により形成して光センサーセルを構成した。このセルについて電気特性を、電流輸送機構の解析を中心に検討した。この解析によりガラス基板上に真空蒸着で形成された ITO-ZnSe-CdTe セルの電流輸送機構の解明を試みた。この結果、ZnSe を基板材料として使用することで、CdTe の形成する接合部の準位密度が減少し、CdTe が p 型のバンドベンディングになっていることが推定できた。さらに CdTe 結晶内部の欠陥も減少していることが推定できた。この ITO-ZnSe-CdTe セルを光センサーとして使用し、接合部に逆方向特性の電位を印加して分光感度特性を評価した。この結果、主たる感度領域の CdTe 層は可視光線の吸収が十分あるにも関わらず、吸収した光の光導電電流が十分取り出せなかった。この構造では、CdTe 層に電界が十分作用していないものと推定される。

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] DeNobel, D. (1958). Method of Marking Electrical Connection to Semi-Conductive Selenide or Telluride. U.S. Patent 2,865,793.

