



# 光ICTS法およびTSC法による半導体材料の評価技術

本稿では、半導体デバイスの性能に大きな影響を与える「深い準位」の評価・解析法に関して、前報のICTS(Isothermal Capacitance Transient Spectroscopy)法に引き続き光ICTS法、およびTSC(Thermally Stimulated Current)法について紹介する。

光ICTS法は、ショットキー接合試料での少数キャリアトラップの評価や光イオン化断面積などの光学的特性評価が可能で、またTSC法では半絶縁性半導体中のトラップの評価が可能で、これらの特長を有し、半導体材料における適用対象を拡大することができる。

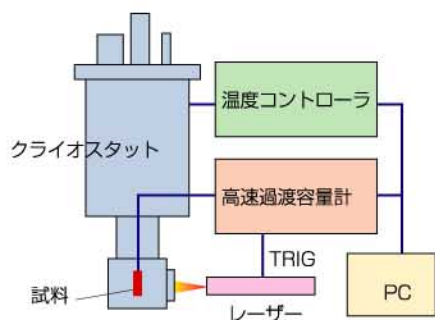
## 光ICTS法の測定原理

C-1

ICTS法による深い準位の評価は、逆バイアス状態にあるショットキー接合あるいはpn接合試料に摂動としての順方向のパルス電圧を印加した後、系が定常状態に戻る過程を、接合容量変化から検出することを測定原理とするものであった。光ICTS法は、電圧パルスに換えて(あるいは同時に)光を用いる方法であり、modified-DLTS(Deep Level Transient Spectroscopy)法の一つとして位置付けられる。光ICTS法に関するまとまった記述はほとんど見当たらないが、基本原理に関しては、光DLTS法を参考とすることができる<sup>1-3)</sup>。

第1図に光ICTS法の測定系を示した。

第2図は光ICTS法における過程の例を、通常の(Dark) ICTS法と対照して示したものである。Dark-ICTS法では、多数キャリアトラップである電子トラップの評価は可能であるが、正孔トラップは測定にかからない。これに対して、光ICTS



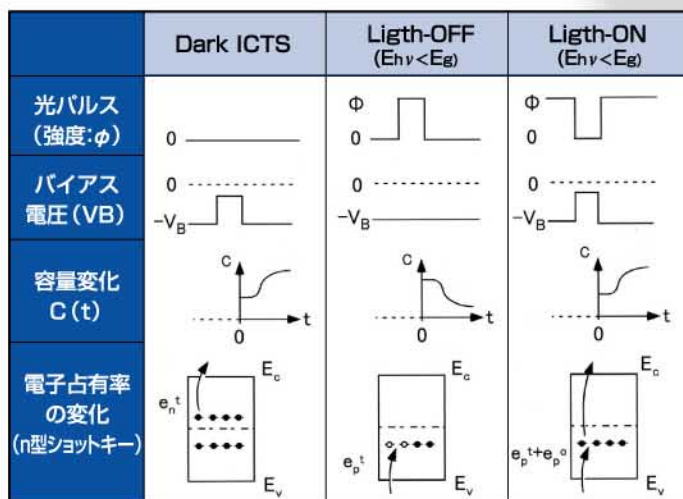
第1図 光ICTS測定系

法では、少数キャリアトラップの評価が可能である点が大きなメリットと云える。例えば光OFFモードICTS法では、光パルスによって導入された正孔が、光パルスが切れた時点(t=0)から熱的に価電子帯へ放出(価電子帯から電子が励起)され、これにともなう容量変化から以下のように少数キャリアトラップの評価ができる。(第2図では簡単のため、光ICTS法における多数キャリアトラップは省略してある。)

光OFFモードにおけるICTSスペクトル： $S_{opt}$ は次のように表される。

$$S_{opt}(t) = P(T, \Phi) S(t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$S(t) = \frac{q\epsilon_0\epsilon_r A^2}{2(V_d - V_b)} N_T (t/\tau_D) \exp(-t/\tau_D) \quad \dots\dots (2)$$



$E_{hv}$ :光エネルギー、 $E_g$ :バンドギャップエネルギー、 $E_c$ :伝導帯端、 $E_v$ :価電子帯端

第2図 光ICTS法における過程

$$P(T, \Phi) \equiv (e_n^i e_p^o - e_p^i e_n^o) \tau_L \tau_D \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $q$ :電子の素電荷、 $\epsilon_r$ :半導体の誘電率、 $\epsilon_0$ :真空の誘電率、 $V_d$ :拡散電位、 $V_b$ :バイアス電圧、 $A$ :接合面積、 $N_t$ :深い準位の密度、 $e_n^i e_p^o$ :電子、正孔の熱的放出割合、 $e_n^o e_p^i$ :電子、正孔の光学的放出割合、 $\tau_L, \tau_D$ :光照射時および暗時における過渡応答の時定数。

$S(t)$ は前報<sup>4)</sup>でのDark-ICTSスペクトルである。したがって、光ICTSスペクトルでは、通常のICTSスペクトルが包絡関数  $P(T, \Phi)$  で変調されたものになっている。一方、(1)、(2)式より光ICTSスペクトルにおいても通常のICTS法の場合と同様に、スペクトルのピーク位置が熱的放出時定数を与えることがわかる。

光OFFモードの場合は、 $\tau_D = (e_n^i + e_p^o)^{-1}$  が求まり、 $e_n^i \ll e_p^o$  を仮定すれば、 $\tau_D \approx (e_p^o)^{-1}$  であるので正孔トラップの熱的放出時定数とみなせる。各温度での正孔トラップの熱的放出時定数を測定することにより、正孔トラップの活性化エネルギーが求められる。

光ICTS法では、光での摂動の与え方によって種々の測定モードが可能であり、上記①光OFFモードの他、②光ONモード、③Under Illuminationモードに大別できる。さらに、光のエネルギー( $E_{hv}$ )がバンドギャップ( $E_g$ )よりも大きい(above-gap)か、小さい(below-gap)か、さらにはバンドギャップ中

- 1) A. Mitonneau et al.: Inst. Phys. Conf. Ser., No.33a (1977) Chapter 2, p.73.
- 2) 滝川正彦ほか: 電子通信学会論文誌, Vol.J64-C (1981) p. 32.
- 3) H. Okushi: Semicond. Sci. Technol., Vol.7 (1992) p. A196.
- 4) こべるにくす: Vol. 15, APR (2006), p. 7.

のトラップの活性化エネルギーとの大小関係によって観測される現象が異なり、言い換えればそれぞれに対応してトラップに関する詳細な情報がえられることになる。たとえば、熱的放出過程が無視できる低温でのbelow-gap光ONモード測定では、光学的放出過程のみが支配的であり、トラップの光イオン化断面積などの光学的特性を評価できる

ことも光ICTS法の特長である。

一方、光ICTS測定では、捕獲断面積、トラップの濃度を定量的に求めることは一般に困難である。これは、(3)式における光学的放出割合が、光強度に依存する量であり、初期状態におけるトラップの占有率および光照射時における空間的な注入領域などを正確に決定できないためである。

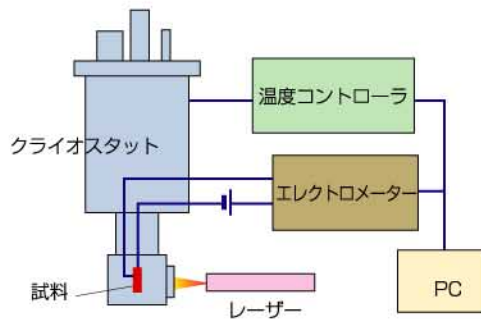
## C-2

### TSC法の測定原理

TSC法は、試料の温度上昇（熱刺激）によって試料内に生じる分極の緩和、トラップからの熱的放出などの電荷現象を、外部回路を流れる電流として取り出すものである。ICTS法と同様の過渡測定法の一種であり、1960年代から研究が活発に行なわれた古い歴史を持つ<sup>5)</sup>。

半導体中のトラップ準位の評価では、低温に保持した試料に光を照射するなどの方法でキャリアをトラップさせ、試料を一定速度で昇温し、特定温度において熱的に放出されるキャリアを外部回路に流れる微小電流として検出する。

第3図にTSC測定系の概要を示した。



第3図 TSC測定系

第1表 各種の深い準位評価方法の特徴

評価方法	試料構造	評価対象トラップ		高抵抗材料	濃度定量性
		多数キャリア	少数キャリア		
Dark-ICTS	ショットキー	○	×	×	○
	pn接合	○	○		
光ICTS	ショットキー	(○)	○	×	×
TSC	オーミック	(○)	(○)	○	△
		(種類判別不可)			
TEES	オーミック	○	○	○	×

(○): 条件付き可

5) R.R. Haering et al.: Phys. Rev., Vol. 117 (1960) p. 451.

6) B. Šantić et al.: Appl. Phys. Lett., Vol. 56 (1990) p. 2636.

TSC法による半導体中の深いトラップ準位の評価におけるメリットの一つは、半絶縁性材料への適用が可能という点にある。ICTS法においては、接合容量の変化をモニターするという測定原理上、キャリア濃度の低い半絶縁性材料での測定には無力である。

これに対して、TSC法では、半絶縁性材料のように抵抗の高い材料の方がむしろノイズとなる暗電流が小さいため、トラップから熱的に放出されるキャリアによる微小電流の測定精度が向上する。半絶縁性材料に2個のオーミック性電極を形成し、ここに電圧を印加した測定系においては、熱刺激電流  $I(T)$  は、(4)式で表される<sup>5)</sup>。

$$I(T) = A \exp \left[ -\frac{\Delta E}{kT} - \frac{B}{\beta} \int_{T_0}^T \exp \left( -\frac{\Delta E}{kT'} \right) dT' \right] \quad (4)$$

ここで、 $T$ : 温度、 $T_0$ : 測定開始温度、 $\Delta E$ : トラップの活性化エネルギー、 $k$ : ボルツマン定数、 $\beta$ : 昇温速度、 $A$ 、 $B$ はそれぞれ定数

トラップパラメータの解析は、実験結果から(4)式の $\Delta E$ 、 $A$ 、 $B$ を求めることから始まるが、これには曲線の立ち上がり部分を利用する方法やピーク位置の $\beta$ 依存性を使う方法などがある。

また、通常のTSC測定では、トラップ準位が多数キャリアトラップであるか少数キャリアトラップであるかの区別はつかないが、近年、これを判別するための改良法としてTEES (Thermoelectric Effect Spectroscopy) 法が報告されている<sup>6)</sup>。TEES法では、TSC測定における試料電極間にわずかな温度差を設け、これによって発生する熱起電力の極性を、外部回路に流れるTSCの符号から判別し、キャリアの種類を特定することができる。

以上に述べた各種評価方法の特徴を前報のICTS法とともに第1表にまとめて示した。

## C-3

### 光ICTS法による深い準位の評価例

#### n-GaNショットキーダイオードにおける正孔トラップ

光OFFモードICTS法で少数キャリアトラップである正孔トラップの評価を行なった例を紹介する。試料は、前報においてICTS法で多数キャリアトラップ（電子トラップ）を測定したn-GaNショット

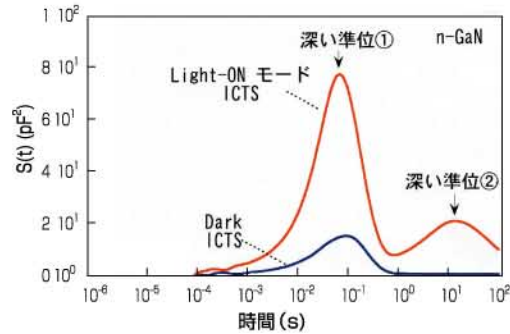
キーダイオードである。光源にはGaInに対してbelow-gap光となる波長473nmの半導体レーザーを用いた。第4図は、各温度における光ICTSスペクトルを示したものであり、2個の正孔トラップ（下向きのピーク）の存在が明らかである。各トラップのピーク位置に対応する熱的放出時定数のアレニウスプロットから各トラップ準位の活性化エネルギーが求められた（第5図）。

## 光ONモードICTSスペクトル

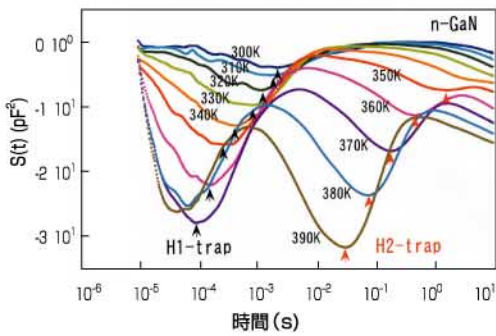
n-GaNショットキー試料における光ONモードICTSスペクトルを第6図に示した。

Dark ICTSでは検出されない深い準位の存在が認められ、GaNのようなワイドギャップ半導体材料の評価に対して有効であることがわかる。

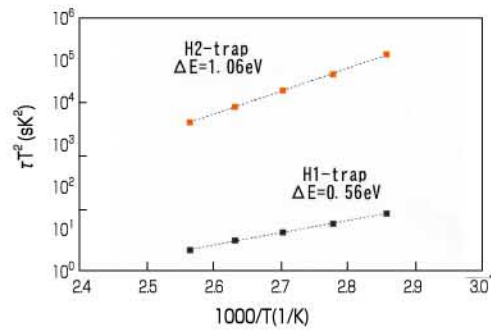
しかしながら光ONモード測定のみでは、トラップの存在を定性的には確認できるが、活性化エネルギーのような準位のパラメータを知ることはできない。詳細評価には、上述の光OFFモード測定および光エネルギーを可変した測定などの結果を総合的に組み合わせて考察することが必要となる。



第6図 光ONモードICTSスペクトル



第4図 各温度における光OFFモードICTSスペクトル



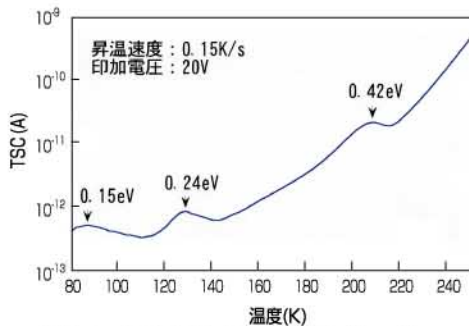
第5図 熱的放出時定数 (T<sup>2</sup>補正) のアレニウスプロット

## TSC法による深い準位の評価例

### Feドープ半絶縁性InPウエハー中の深い準位

第7図は、Feドープ半絶縁性InPウエハーのTSCスペクトルを示したものである。

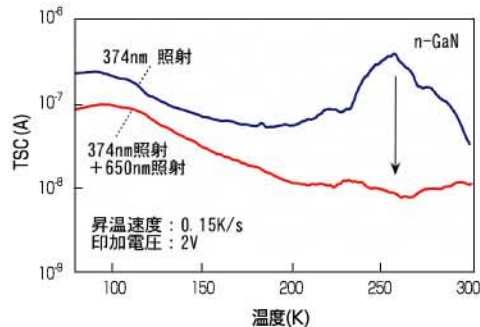
TSCピークから、試料中には少なくとも3個のトラップ準位が存在することがわかる。図中に示した各トラップ準位に対する活性化エネルギー値は、近似式<sup>7)</sup>  $\Delta E = kT_m \ln(T_m / \beta)$ 、(T<sub>m</sub>: TSCピーク温度) から求めたものである。



第7図 半絶縁性InPのTSCスペクトル

### GaNにおけるフォトクエンチング

第8図は、78Kにおいて374nm光を照射し、キャリアをトラップさせたn-GaN試料のTSCスペクトルであり、250K近傍にトラップからのキャリア放出ともなうピークが観測されている。一方、この試料を再度、78Kに冷却後、374nm光照射に加



第8図 TSCによるフォトクエンチング現象の評価

えて650nm光を照射、TSC測定した結果、最初に見られたピークが消失することが判明した。これは650nm光照射により、準位の起源となる欠陥が他の状態に変化したためと考えられ、いわゆるフォトクエンチングと呼ばれる興味深い現象をとらえたものである<sup>8)</sup>。

近年、Si、GaAs系半導体デバイスに加えて、GaN、SiCなどのいわゆるワイドギャップ半導体材料を使ったデバイスの開発が進められている。半導体中の深い準位は、デバイス特性に対して非常に大きな影響をおよぼすため、その評価は材料の変遷にかかわらず普遍的な重要性を有している。一方、半導体中の深い準位の起源となる欠陥の同定は、単一の測定法だけでは困難であり、これまでに開発された種々の手段を組み合わせるはじめて可能となる。本稿もその一助となれば幸いである。

[エレクトロニクス事業部 技術部 岡田 廣]

7) D.C. Look: Semiconductors and Semimetals, Vol. 19 (1983) p.75.

8) H. Witte et al.: Phys. Rev., Vol. B 71 (2005) p. 125213.