

ICTS法による半導体材料の評価技術

半導体中の深い準位は、真性点欠陥や遷移金属不純物原子などをその起源とし、接合リーク電流の増大や少数キャリア寿命の低下など、半導体デバイスの性能に大きな影響を与えるため、その評価はきわめて重要である。本稿では、半導体中の深い準位の評価方法であるICTS(Isothermal Capacitance Transient Spectroscopy)法の原理、および近年注目を集めているワイドギャップ半導体材料を対象とした解析例を紹介する。



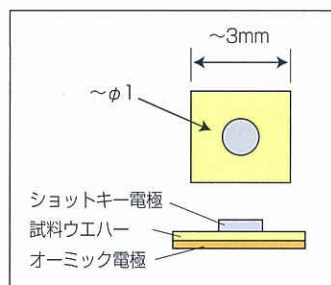
ICTS法の測定原理

1974年にLangによって考案されたDLTS(Deep Level Transient Spectroscopy)法¹⁾は比較的簡便かつ高感度に深い局在準位の情報が得られる優れた方法であり、現在にいたるまで広くもちいられてきた。しかしながら測定には試料温度の連続掃引が不可欠なため、温度情報の不確定性などの問題点もある。一方、ICTS法²⁾は一定温度下で局在準位の情報をスペクトロスコピックに得る方法であり、DLTS法の改良法として位置付けられる。

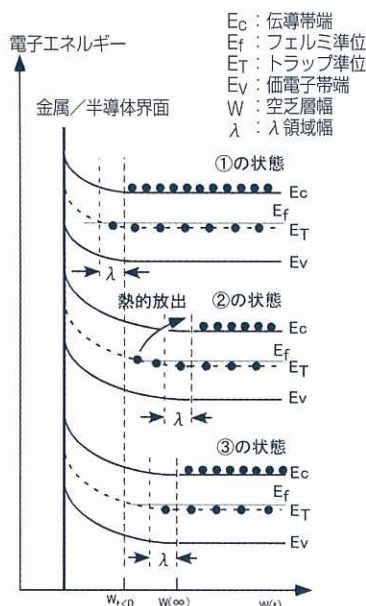
第1図にICTS法における測定原理を示した。ICTS法で用いられる試料では、一般にショットキー接合あるいはpn接合を有することが必要である。ここでは、n型ショットキー接合を仮定しており、試料形状を第1図(a)に例示した。

第1図(b)に示したように逆バイアス電圧を印加した状態のショットキー接合③に順方向のパルス(フィリングパルス)を重畳①し、再び逆バイアス状態に戻った時点②からの接合容量の変化を高速過渡容量計で測定する。この間の変化を第1図(c)にエネルギーバンド図で示した。順方向パルス印加時に試料中の電子トラップには電子が捕獲され、その後の逆バイアス状態において、フェルミレベル以上のトラップ準位から電子が伝導帯に放出される。第1図(d)はこの間の接合容量の変化を示したものであり、②における測定開始点から電子放出にともなって空乏層幅は減少し、接合容量は増加していく。

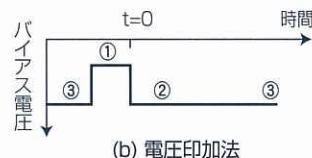
上記接合容量の時間変化C(t)に



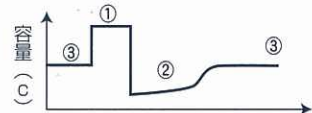
(a) 測定試料構造



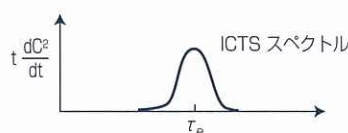
(c) 接合部における空乏層幅の変化



(b) 電圧印加法



(d) 接合容量の時間変化



(e) ICTSスペクトル

第1図 ICTS法の原理

対して、ICTSスペクトルは以下の(1)式で定義され、第1図(e)に示したように、準位の熱的放出時定数(τ_e)に対応する時間： $t = \tau_e$ で極値を持つ。

$$S(t) = t \frac{dC^2(t)}{dt} \dots\dots\dots (1)$$

半導体が複数のトラップ準位を含み、かつi番目の準位の熱的放出時定数を τ_{ei} とすると、S(t)は(2)式で表される。

$$S(t) = \frac{q\epsilon_r\epsilon_0 A^2}{2(V_d - V_b)} \sum_i N_i^+ (t/\tau_{ei}) \exp(-t/\tau_{ei}) \dots\dots (2)$$

ここで、 q ：電子の素電荷、 ϵ_r ：半導体の誘電率、 ϵ_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_i^+ ：i番目の深い準位の密度

各 τ_{ei} が十分離散的な場合、S(t)は $t = \tau_{ei}$ で極値を持つため、ICTSスペクトルから、各準位の熱的放出時定数 τ_{ei} が求まる。また、(2)式において、 $t = \tau_{ei}$ と置くことにより、深い不純物濃度 N_i^+ が得られる。また、熱的放出時定数は、SRH(Schottky-Read-Hall)統計により (3)式で表される。

$$\frac{1}{\tau_e} = N_c \sigma_n \nu_{th} g \exp(-\Delta E/kT) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 N_c ：伝導帯の実効状態密度、 σ_n ：捕獲断面積、 ν_{th} ：熱速度、 g ：準位の縮退度、 ΔE ：深い準位の活性化エネルギー（正確にはエンタルピー）

1) D.V. Lang: J. Appl. Phys., Vol.45, No.7 (1974) p.3023.

2) H. Okushi et al.: Jpn. J. Appl. Phys., Vol.19, No.6 (1980) p.L335.

いくつかの異なる温度条件下でICTS測定を行い、 $\tau_c T^2$ の $1/T$ に対するアレニウスプロットの傾きから活性化エネルギー、切片から有効捕獲断面積($g\sigma_c$)が得られる。

また、縮退度因子を含まない捕獲断面積をアレニウスプロット以外から独立に求めることも可能である。通常のICTSスペクトル測定では、フィリングパルス印加はトラップがキャリアですべて満たされるに十分な時間幅で行なわなければならない。一方、パルス幅と捕獲量との間には(4)式のような関係が成り立つため、種々のパルス幅で測定した捕獲量($\propto$ ICTSスペクトルピーク強度: $S_{\max}(t_p)$)から、トラップの捕獲断面積が求められる。

$$S(t_p) = S(\infty) \left[1 - \exp(-t_p/\tau_c) \right] \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、捕獲時定数 τ_c は、次式(5)で与えられる。

$$\tau_c = \frac{1}{N_D \sigma_n V_{th}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 N_D : 浅いドナー濃度、 σ_n : 捕獲断面積、 V_{th} : 電子の熱速度

さらに、上記のアレニウスプロットから求めた活性化エネルギー値は、実際は真のトラップ深さと捕獲バリアの和からなっている。捕獲バリアの

大きさを E_b とすると捕獲断面積は、

$$\sigma_n = \sigma_{\infty} \exp(-E_b/kT) \quad \dots\dots\dots (6)$$

と表され、ここで σ_{∞} は高温における捕獲断面積である。したがって、捕獲断面積の温度依存性を求めることにより捕獲バリアの大きさを見積もることができ、真のトラップ深さが得られる。

以上のようにICTS法によって、単位の代表的なパラメータである活性化エネルギー、捕獲断面積およびその単位濃度などを評価することができる。

実際には(3)式から求める単位濃度にはいわゆる λ 効果などによって、数倍程度の誤差が含まれる場合がある。 λ 効果とは、第1図において示した λ 領域(深い準位がフェルミレベル以下にある空乏層中の半導体に接した領域であり、電子が放出されずに準位が占有状態にある)に起因して深い準位濃度の見積りに誤差を与える現象である。ここでは紙面の関係で詳細は省略するが、当社ではこれに対してTDS(Trap Density Spectroscopy)法³⁾として報告されている単位濃度の定量化解析法を採用している。

3) T. Okumura: Jpn. J. Appl. Phys., Vol.24, No.6 (1985), p.L437

C-2

ICTS法による深い準位の解析例

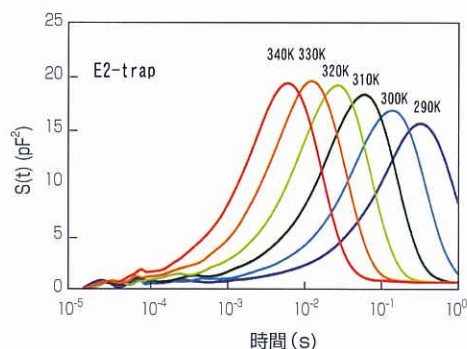
基本的トラップパラメータの解析 GaNエピタキシャル成長層

ワイドギャップ半導体であるGaNは、青色LED、レーザダイオードなどの発光デバイスおよび高周波デバイス用途において重要な材料である。ここではサファイヤ基板上にMOCVD法によってエピタキシャル成長したn-GaN層中の深い準位の解析例を紹介する。

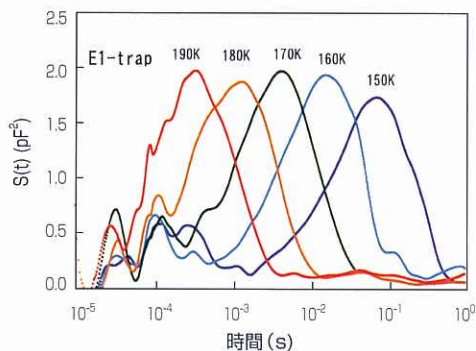
第2図(a)および(b)は、それぞれ試料中に検出された2個の電子トラップ(E1およびE2)の各温度でのICTSスペクトルである。

また、これらの各スペクトルのピーク位置から求める熱的放出時定数(T^2 補正後)をアレニウス

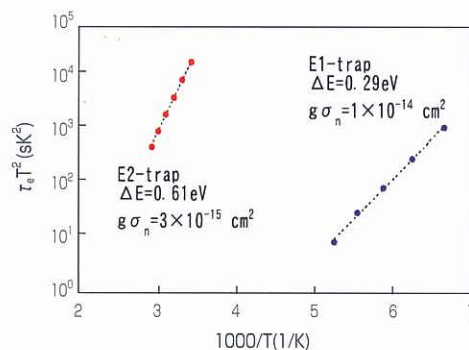
プロットし、両準位の活性化エネルギーと捕獲断面積を求めた(第2図(c))。



(b) 各温度におけるE2-trapのICTSスペクトル



(a) 各温度におけるE1-trapのICTSスペクトル



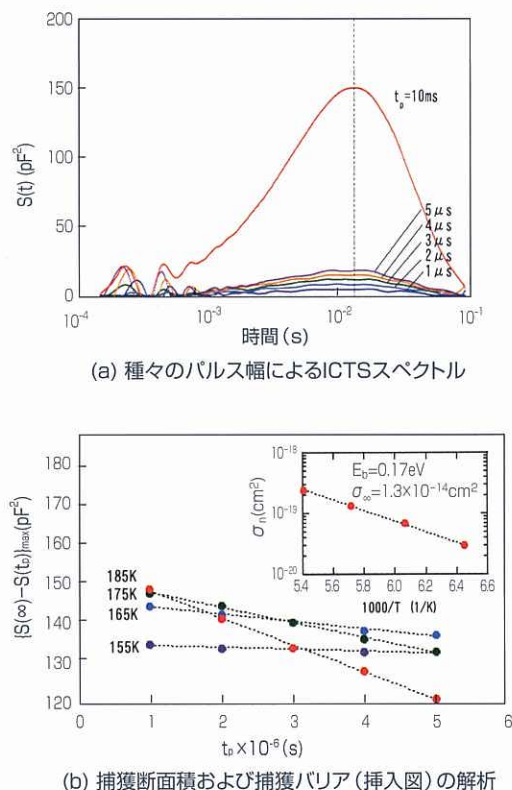
(c) 熱的放出時定数(T^2 補正)のアレニウスプロット

第2図 GaN中の電子トラップの評価例

ICTS法の応用例：欠陥の詳細評価

①捕獲バリア

n-ZnSe中に存在する伝導帯端下0.31eVの電子トラップにおける捕獲バリアの解析例を紹介する⁴⁾。第3図(a)は、175Kにおける種々のフィリングパルス幅(1~5 μ sおよび10ms)でのICTSスペクトルである。第3図(b)に示したようにパルス幅に対してプロットした $|S(\infty)-S(t_p)|_{\max}$ の直線の傾きから、(4)式、(5)式にしたがって捕獲断面積が得られ、さらに捕獲断面積の温度依存性を評価することで、挿入図に示したようにトラップ単位の捕獲バリアの値が求まる。このトラップでは、0.17eVの捕獲バリアの存在が明らかとなり、真のトラップ深さは0.31-0.17=0.14(eV)であると考えられる。このような捕獲バリアの存在は、トラップからのキャリア放出にともなって欠陥が大きな格子緩和を起こす場合などに見られる現象である。



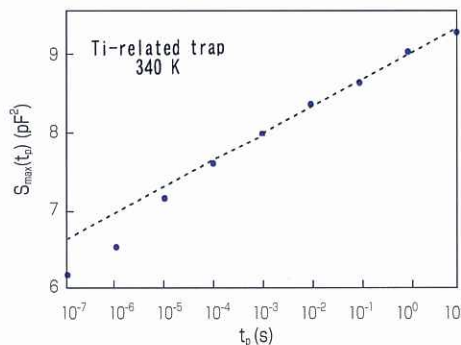
第3図 ZnSe中の電子トラップにおける捕獲バリアの評価例

②拡張欠陥

第4図は、n-ZnSe中のTi不純物に起因する電子トラップにおける $S_{\max}(t_p)$ とフィリングパルス幅との関係を示したものである。(4)式の関係に反して $S_{\max}(t_p)$ は $\log(t_p)$ に比例している。このような挙動は、通常の局在準位(=孤立した欠陥)に起因するものでなく、転位などの拡張欠陥に関係したものと考えられている^{4,5)}。つまり、Ti不純物はZnSe単結晶中では高密度に存在する転位に固着した状態にあるものと推定できる。

以上の例のように、ICTS法による情報はトラッ

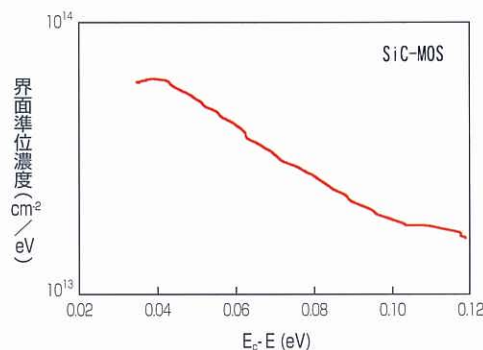
プパラメータの測定だけにとどまらず、その起源を解明する場合にも有力であるといえる。



第4図 拡張欠陥が関係するトラップにおける捕獲挙動

③SiC-MOS界面準位

ICTS法は、上記のような半導体バルク中の局在準位のみでなく、MOS界面準位やアモルファスSi中のgap stateのような連続準位の解析も可能である⁶⁾。第5図は、近年、パワーデバイス用材料として注目されているSiCにおけるMOS界面準位の評価例である。チャネル移動度に重要な影響を与える伝導帯近傍の比較的浅いエネルギー領域の界面準位濃度の評価にも有効であることが判明した。



第5図 SiC-MOSにおける界面準位濃度の評価例

上記のようなショットキー接合試料によるICTS測定では、原理的に多数キャリアトラップの評価のみ可能である。少数キャリアトラップの評価を行なう場合は、pn接合試料を用いるか、ショットキー接合試料の場合は光照射を利用した少数キャリア注入が必要である。当社では、より汎用性の高いレーザ光パルスを用いた「光ICTS法」による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を行なっている。

さらにICTS法は接合容量変化をモニターする原理上、導電性の半導体材料にしか適用できない。これに対しては、半絶縁性半導体材料におけるトラップ評価に有効なTSC(熱刺激電流測定)などへの技術展開をはかっており、今後、種々の化合物半導体材料、デバイスの欠陥評価ニーズに幅広く対応したいと考えている。これらの詳細については、次回に紹介したい。

[エレクトロニクス事業部 技術部 岡田 廣]

- 4) H. Okada: J. Appl. Phys., Vol.80, No.12 (1996) p.6740.
5) T. Wosinski: J. Appl. Phys., Vol.65, No.4 (1989) p.1566.

- 6) H. Okushi: Phil. Mag. B, Vol.52, No.1 (1985) p.33.