

Readout

HORIBA Technical Reports

特集 半導体をはかる

January 1991 ■ No.2

ICTS / DLTS法による 半導体中不純物・欠陥評価

Semiconductor Impurities and Defects
Evaluation by ICTS and DLTS

松田耕一郎
Koichiro MATSUDA

(Pages 15-26)

株式会社 堀場製作所

ICTS/ DLTS 法による半導体中不純物・欠陥評価

Semiconductor Impurities and Defects Evaluation
by ICTS and DLTS

松田 耕一郎

Koichiro Matsuda

要 旨

等温容量過渡分光 (ICTS) / 深い準位過渡分光 (DLTS) 法は、半導体中の不純物・欠陥を高感度 (10^{11} atoms/cm³) で測定可能な手法である。とくに最近、デバイスの高集積化や効率向上にともない、不純物・欠陥の測定制御が不可欠となってきた。当社では超高感度、一定温度、かつ短時間で測定可能な半導体中不純物測定装置 (DA-1500) およびウエハ状態での測定を可能にするウエハクライオスタット (DA-250) などを開発・製品化した。本稿では、ICTS/ DLTS の測定原理の概要、DA-1500 のシステム構成を述べ、さらに、GaAs の表面処理条件といった ICTS 法により明らかとなった応用例などを紹介する。最後に、ICTS 法の今後の展開についても言及する。

Abstract

Semiconductor impurities and defects can be evaluated at a level of 10^{11} atoms/cm³ by ICTS/ DLTS. Along with the high density integration and high operation efficiency being required year by year, accurate evaluation becomes indispensable for these impurities and defects at the level. Horiba has developed and are manufacturing analyzers for these semiconductor applications. Among them are the Model DA-1500 permitting a supper sensitive evaluation at a period of short time, and the Model DA-250 allowing the same evaluation for the wafer states. In this abstract, the ICTS/ DLTS measuring principle is outlined first, then introducing the DA-1500 system set-up and applications availables with the ICTS such as GaAs surface treating conditions with ICTS prospect possibilities being referred to the end.

1. はじめに

半導体デバイスの高集積化やエネルギー変換効率の向上にとって、バルク結晶中の不純物・欠陥や接合界面における欠陥の原因である深い不純物準位の測定・制御がますます重要になってきた。これらの深い不純物準位を高感度に測定する手法として、1974年に米国のベル研究所のD.V.Langによって深い準位過渡分光（Deep Level Transient Spectroscopy：DLTS）法¹⁾が考案された。DLTS法は、アナログ技術と温度掃引技術を組み合わせた簡単な装置により、深い不純物準位の情報を分光学的に得られる有力な手法の一つである。また1980年には、通産省工業技術院電子技術総合研究所の大串秀世、徳丸洋三両氏により、温度掃引を必要とせず、かつ短時間で測定可能な等温容量過渡分光（Isothermal Capacitance Transient Spectroscopy：ICTS）法²⁾が考案された。ICTS法は、一定温度による測定が可能のため、測定時間の短縮はもちろんのこと、アモルファスシリコンなどの温度により構造が顕著に変化する試料の物性量の正確な温度特性の把握を可能にした。さらに1985年には、東京都立大学の奥村次徳氏により、フェルミレベル以下の電荷を帯びていない深い不純物準位をも考慮した解析手法、トラップ密度分光（Trap Density Spectroscopy：TDS）-ICTS法³⁾が考案され、不純物が多量に入った試料の正確な解析が容易になった。

当社では、ICTS法およびTDS-ICTS法を主な測定原理とした半導体中の不純物・欠陥を高感度、短時間、正確に測定する装置（DAシリーズ）を開発・製品化した。本稿では、本装置の測定原理、装置構成および実測例などについても報告する。

2. 容量過渡分光（ICTS／DLTS）法の測定原理

2.1 半導体中の深い不純物準位とその検出

半導体中に存在する不純物は、半導体産業の発展にともしないデバイスの品質、寿命や導電率を左右する重要な因子となっている。半導体に積極的に導入されるドナーおよびアクセプタ不純物は、半導体中の伝導帯や価電子帯に極めて近いエネルギー準位を形成するために浅い準位（shallow level）と呼ばれ、十分な制御のもとに有効的に用いられてきた。一方、エネルギー禁制帯の中央付近、すなわち伝導帯や価電子帯から遠い所に存在する深い準位（deep level）は、応用として、デバイスの応答速度の向上を目的に用いられるライフタイムキラー（シリコン中の金や白金など）や発光素子の発光中心として積極的に用いられている。反面、シリコン中の微量の重金属は、リーク電流やノイズの発生源として作用したり、化合物半導体中の欠陥は、発光素子中で非発光中心として作用するため、それらの測定・制御がますます重要な課題となってきている。

これらの深い不純物準位によるキャリア（電子または正孔）の捕獲や放出過程にともなう極微小の電荷は、容量変化として検出することができる。容量過渡分光（ICTS／DLTS）法は、深い不純物準位の性質を容量の時間変化から求める有効な手法の一つである。

2.2 ICTS／DLTS法の基本原理

図1に、深い不純物準位による容量過渡応答を示す。

まず、試料ダイオードに逆バイアス電圧を印加し空乏層を広げ、空乏層中の深

い不純物準位にトラップされた電子または正孔が放出されるまで待つ (図 1 (1)).

次に, 図 1 (2) のように, バイアス電圧を矩形パルス状に印加すると, いったん深い不純物準位にキャリアが捕獲され, バイアス電圧が復帰すると再び深い不純物準位からキャリアが放出される (図 1 (4)). これら一連の状態の遷移が, 図 1 に示すように接合部の微小容量変化として測定される. それゆえ, 本図の中央の太い線に示す容量の時間変化 (過渡応答) の中に, 深い不純物に関する全ての情報が含まれることになる.

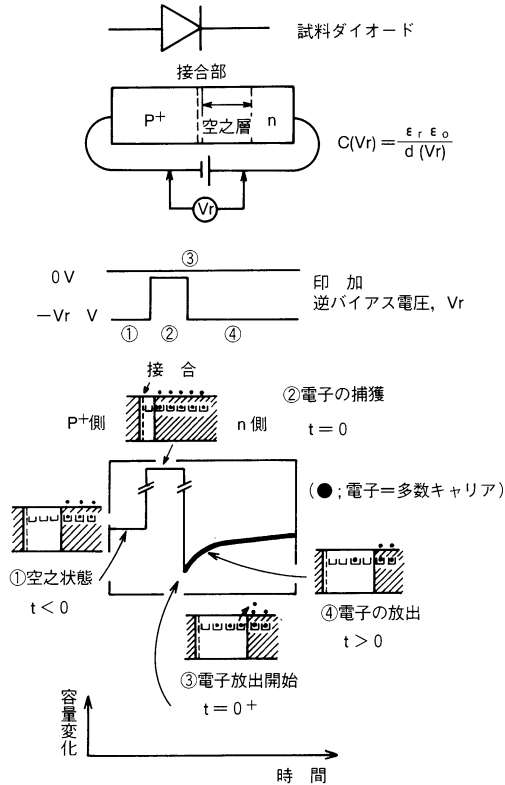
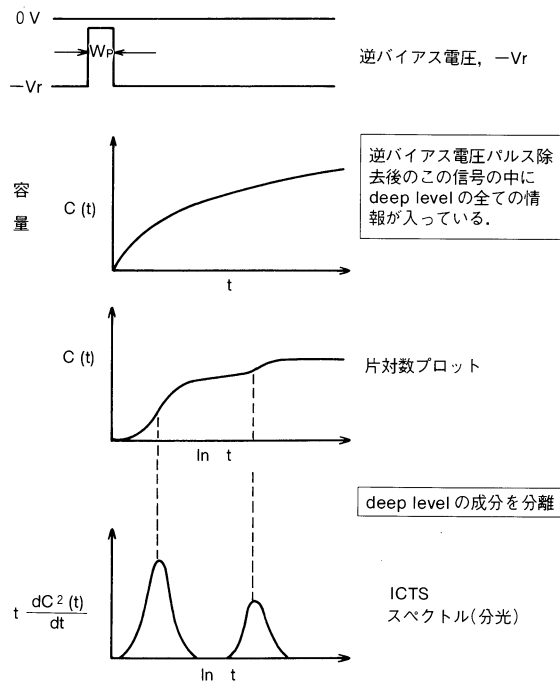


図 1 深い不純物による容量過渡応答
Capacitance transient response to deep-level impurities



深い準位が 2 個あることがわかる.

図 2 容量過渡応答と ICTS 信号
Capacitance transient response and ICTS signal

図 2 に, 容量過渡応答と ICTS 信号の関係を示す. ICTS 法では, ICTS 信号すなわち $t \cdot dC^2(t)/dt$ を時間の対数に対してプロットする. スペクトルの山の数より深い不純物準位の「数」, ピーク値より「濃度」, ピークが生じる時間より「エネルギー単位」に関するそれぞれ情報を得ることができる. また, 「エネルギー単位」の情報は不純物の同定に使用することができる. 図 3 に, ICTS 法で得られるパラメータを示す.

ICTS 測定装置を実現する上で, とくに大切な事は次の点である.

- ①種々の不純物準位のトラップを一度に検出するために, 広い時間領域 (通常 10 桁は欲しい) での容量の過渡応答の測定.
- ②検出感度を向上するために, 容量の微小変化のみを取り出し, 拡大するヌルバランス機構.
- ③高速から低速まで安定した信号が得られる高感度容量計.
- ④単一現象 (パルスを一回印加) の場合でも, 数 μs から 10,000s におよぶ広範囲の時間領域データ取得.

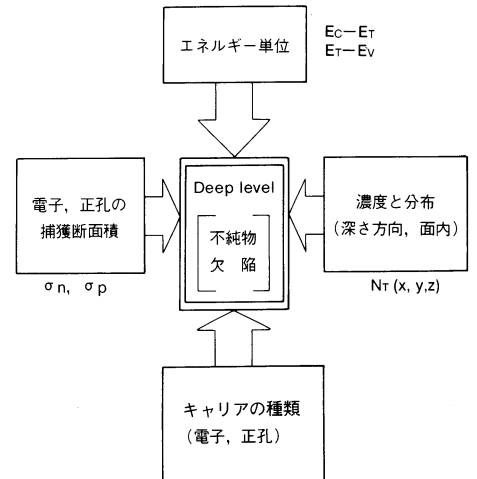


図 3 ICTS で評価できるパラメータ
Parameters evaluated by ICTS signal

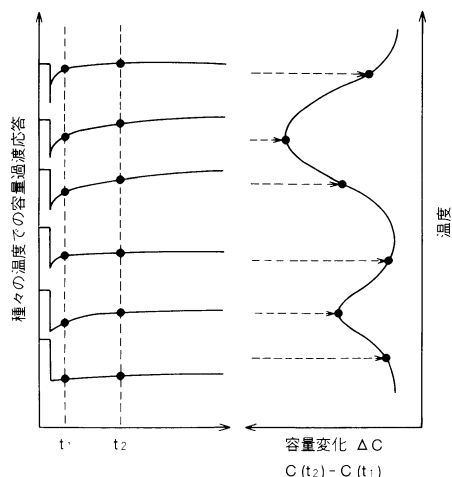


図4 容量過渡応答の温度依存と DLTS 信号
Temperature dependence of capacitance response and DLTS signal

図4に、DLTS法の測定原理を示す。DLTS法もICTS法と同様、容量の過渡変化を測定する。ただしDLTS法は、レイトウインドと呼ばれる時間 t_1 と t_2 における容量変化を温度を掃引しながら測定し、スペクトルを得る。このスペクトルを解析することによりICTS法と同様の情報が得られる。

DLTS法は、温度掃引が不可欠であるが、汎用の容量計などを用いた比較的簡単な装置でも、不純物に関する情報を得ることができる長所がある。反面、次のような短所がある。

- ① 単一単位であっても、低温側と高温側とで得られるスペクトルの半値巾が異なる(図5)。前者の方が後者に比べて半値巾が狭い。そのため、一見してスペクトルから不純物エネルギー準位の数や判定することが困難な場合が多い。
- ② 温度掃引をとまなうため、温度変化により構造が大きく変化する試料や、熱エネルギーにより励起されない試料に対しては、測定が困難となる。

図6に、半導体中不純物測定装置における、ICTS法およびDLTS法の測定時間領域の相違を示す。

DLTS法の測定時間(レイトウインド設定時間)範囲は、容量計の応答速度とデータ積算回数によって制約を受けるため、非常に狭い時間領域に制限される。DLTS法の場合、温度掃引を行いながら積算処理を行わねばならず、1秒以上に測定時間を設定することは、実質的にできないことに起因している。そのためDLTS法では、温度を広い範囲に変化させることによりスペクトル信号を得ている。

一方、ICTS法は、温度を固定した測定が可能である反面、広範囲の時間領域での測定が必要となる。さらに高感度測定を行う場合には、容量信号の高S/N化が重要となる。短時間領域においては積算処理が有効であるが、10,000秒にもおよぶ領域にはこの手法は適用できない。しかし、データサンプリング法を工夫することによりこの問題を解決し、信号の高S/N化が可能となった。この解決手法についてDA-1500を用いて簡単に説明する。

DA-1500は、測定中たえず500nsでデータ取得を行っている。その結果、測定開始後10,000s付近では約 10^{10} 個のデータが、また、1,000s付近には約 10^9 個のデータが得られることになる。これらのデータを捨てずに束ねることにより、データの平滑化と圧縮とを同時に行った。このことにより、広範囲の時間領域での信号の高S/N化が可能となった。

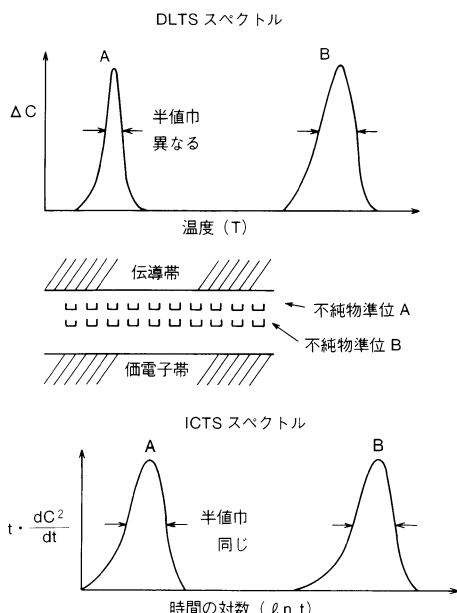


図5 ICTSスペクトルとDLTSスペクトルの相異
Difference between ICTS and DLTS spectrum

3. ICTS/DLTS 測定装置 (DA-1500)⁴⁾

3.1 システム構成

本装置の外観を図7に、構成を図8に、仕様を表1にそれぞれ示す。

本装置は、試料ホルダ部(DA-100, DA-220)、測定処理部(DA-1500本体)、データ解析(パーソナルコンピュータ)・出力部より構成される。

DA-100には、電子冷却方式を採用しているために、液体ヘリウムや液体窒素などの冷媒が不要である。

一方DA-220には、100meV以下の非常に浅い不純物準位の測定が可能のように、液体ヘリウム蒸発方式を採用した。これにより、チップ試料を6Kから400Kと広範囲の温度領域でICTS/DLTS法の測定が可能となった。ヘリウム

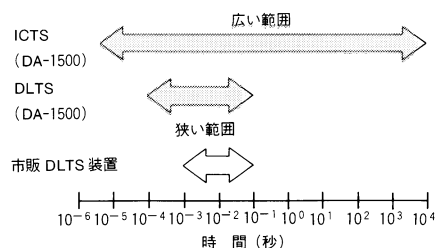


図6 ICTS法とDLTS法の容量過渡測定時間領域による相異
Measuring time difference between ICTS and DLTS methods

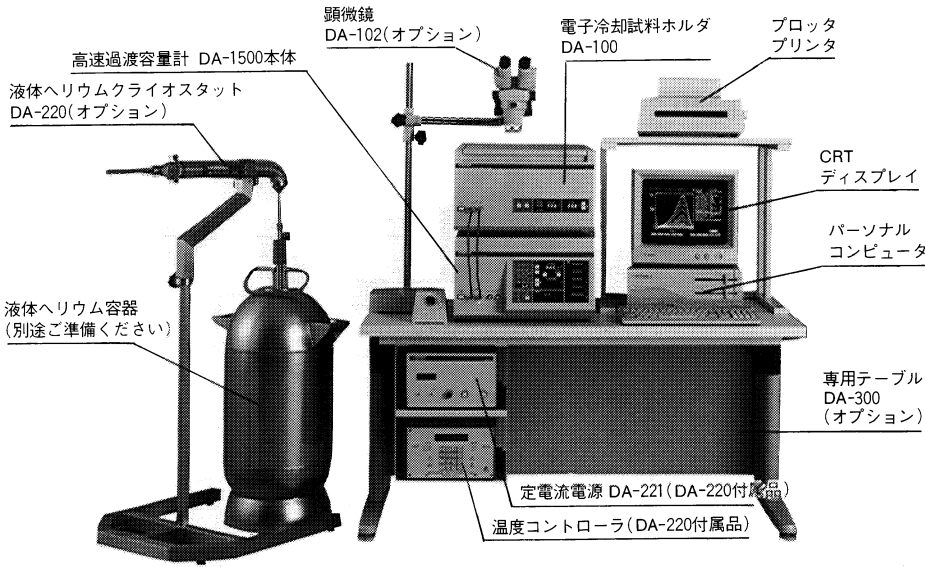


図7 装置外観
System appearance

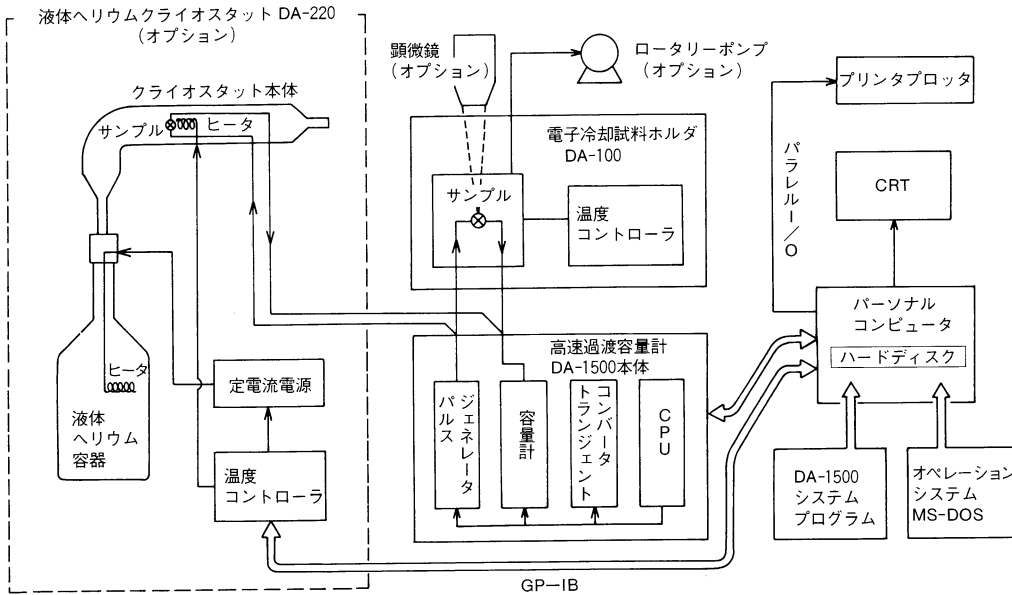


図8 装置構成
Set-up

高速過渡容量計 DA-1500本体 測定原理 ICTS法、DLTS法 測定モード C、C-V、C-t、順方向電流、逆方向電流 基準周波数 1MHz 容量測定範囲 1fF~2000pF 容量分解能 2、20、200、2000pF(オートレンジ機能付) 0.001pF(2pFレンジ)、0.01pF(20pFレンジ)、 0.1pF(200pFレンジ)、1pF(2000pFレンジ) サンプルング範囲 5μs~10000s 1ms、10ms、100ms、1s、10s、100s、1000s、 2000s、4000s、8000s、10000s サンプルング方法 5μs~100μs：線形サンプルング 100μs~10000s：対数等間隔サンプルング 積算回路数 1~10000回 応答速度 1μs、3μs、10μs、30μs、100μs ノイズレベル 0.5~20pF(2pFレンジ)、0.5~200pF(20pFレンジ)	電子冷却試料ホルダ DA-100 サンプル 温度コントローラ	高速過渡容量計 DA-1500本体 バジェネレータ 容量計 トランジェント CPU	液体ヘリウムクライオスタット DA-220(オプション) クライオスタット本体 ヒータ 液体ヘリウム容器 定電流電源 温度コントローラ	電子冷却試料ホルダ DA-100 サンプル 温度コントローラ	高速過渡容量計 DA-1500本体 バジェネレータ 容量計 トランジェント CPU	プリンタプロッタ パーソナルコンピュータ ハードディスク CRT DA-1500 システム プログラム オペレーション システム MS-DOS		
バイアス電圧 -30~+5V(C測定時) -30~0V(C-t測定時) -30~+30V(C-V測定時) 印加パルス電圧 0.01V~ Vb +5V(Vb:バイアス電圧) 印加パルス幅 50ns、100ns~100s(最高桁を可変) 順方向電圧 0~99mA 逆方向電圧 0~99.9μA インターフェイス GP-IB アラーム機能 過電流アラーム 浮遊容量補正機能 その他の機能 C-t波のアナログ出力およびトリガー出力	対象プロッタ LP5201(PANTOS) 電源 AC100V、50/60Hz、100W 外形寸法 440(W)×620(D)×270(H) 重量 32kg 電子冷却試料ホルダ DA-100 冷却方式 ヘルティエ素子による電子冷却 加熱方式 ヘルティエ素子による電子加熱 温度制御方式 PID制御とON/OFF制御の併用 温度範囲 -40~+70°C(233~343K) [室温が25°Cを超える場合やサンプルの 熱容量が大きい場合は、サンプル温度 が-40°Cまで低下しない場合あり]	温度安定性 ±0.1°C サンプル形状 30×30×2mm以内またはTO-5 真空ポンプ クイックリリースカップリングNW25 XYZ軸ステー 付、1対 温度センサー 白金測温体 電源 AC100V、50/60Hz、150W 外形寸法 440(W)×615(D)×270(H) 重量 45kg 液体ヘリウムクライオスタット DA-220(オプション) 冷却方式 液体ヘリウム蒸発ガスによる冷却 加熱方式 ヒータ 温度制御方式 PID制御 温度範囲 6~400K(-267~+127°C) 温度安定性 ±0.2°C サンプル形状 TO-5 温度センサー シリコニダイオード インターフェイス GP-IB 付属品 温度コントローラ、定電流電源、クライオ スタットホルダ	対象コンピュータ NEC PC-9800シリーズ(使用できる機種に は限定あり) OS MS-DOS(使用できるバージョンには限定あり) O MS-DOS(使用できるバージョンには限定あり) 本装置ではLattice Cコンパイラおよび C-Tool/98を使用	外形寸法 本体部：600(W)×120(D)×810(H) 本体部：3.5kg その他のオプション 専用テーブル DA-300 ロータリーポンプ DA-101(DA-100用オプション) 顕微鏡 DA-102(DA-100用オプション)	温度安定性 ±0.1°C サンプル形状 30×30×2mm以内またはTO-5 真空ポンプ クイックリリースカップリングNW25 XYZ軸ステー 付、1対 温度センサー 白金測温体 電源 AC100V、50/60Hz、150W 外形寸法 440(W)×615(D)×270(H) 重量 45kg 液体ヘリウムクライオスタット DA-220(オプション) 冷却方式 液体ヘリウム蒸発ガスによる冷却 加熱方式 ヒータ 温度制御方式 PID制御 温度範囲 6~400K(-267~+127°C) 温度安定性 ±0.2°C サンプル形状 TO-5 温度センサー シリコニダイオード インターフェイス GP-IB 付属品 温度コントローラ、定電流電源、クライオ スタットホルダ	対象プロッタ LP5201(PANTOS) 電源 AC100V、50/60Hz、100W 外形寸法 440(W)×620(D)×270(H) 重量 32kg 電子冷却試料ホルダ DA-100 冷却方式 ヘルティエ素子による電子冷却 加熱方式 ヘルティエ素子による電子加熱 温度制御方式 PID制御とON/OFF制御の併用 温度範囲 -40~+70°C(233~343K) [室温が25°Cを超える場合やサンプルの 熱容量が大きい場合は、サンプル温度 が-40°Cまで低下しない場合あり]	温度安定性 ±0.1°C サンプル形状 30×30×2mm以内またはTO-5 真空ポンプ クイックリリースカップリングNW25 XYZ軸ステー 付、1対 温度センサー 白金測温体 電源 AC100V、50/60Hz、150W 外形寸法 440(W)×615(D)×270(H) 重量 45kg 液体ヘリウムクライオスタット DA-220(オプション) 冷却方式 液体ヘリウム蒸発ガスによる冷却 加熱方式 ヒータ 温度制御方式 PID制御 温度範囲 6~400K(-267~+127°C) 温度安定性 ±0.2°C サンプル形状 TO-5 温度センサー シリコニダイオード インターフェイス GP-IB 付属品 温度コントローラ、定電流電源、クライオ スタットホルダ	プリンタプロッタ パーソナルコンピュータ ハードディスク CRT DA-1500 システム プログラム オペレーション システム MS-DOS

表1 ICTS/DLTS測定装置 DA-1500仕様
Specifications for the Model DA-1500 ICTS/DLTS

設定温度範囲	25~400K ※
温度安定性	±0.2K以下 ※
冷却時間	室温より25Kまで100min以内 ※ (液体窒素使用時)
一定温度保持時間	3時間以上 ※
温度勾配	0.5~5.0K/min ※
プロービング範囲	φ 3 インチ全面

構成機器	(1)クライオスタットユニット (2)コントロールユニット (3)温度制御装置	
所要設備	電源	200V、50/60Hz、6kVA(最大) 100V、50/60Hz、1.3kVA(最大) 100V、50/60Hz、800VA(最大)
	冷却水	水道水200l/hr. 水圧 1.2~2.5kg/cm ² G 水温 10~30°C 水質 上水相当
	重量	クライオスタット約200kg コントロールユニット約200kg

※ 3 インチウエハ取付時

表 2 ヘリウム循環式ウエハクライオスタット DA-250仕様
Specifications for the Model DA-250 Helium-Gas Circulating Wafer Cryostat

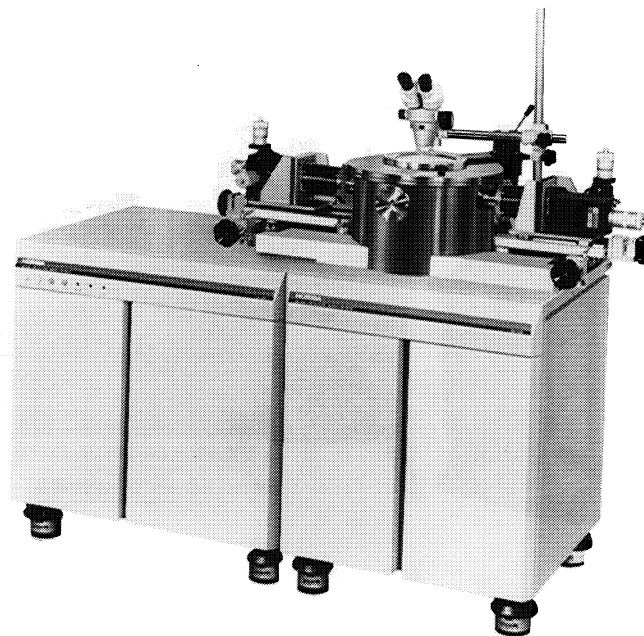


図 9 ヘリウム循環式ウエハクライオスタット DA-250外観
The Model DA-250 Helium-Gas Circulating Water Cryostat

循環式ウエハクライオスタット DA-250の外観を図 9 に、仕様を表 2 にそれぞれ示す。最近とくに、試料内部の応力を解放しないウエハ状態での特性評価に対するニーズが高まってきている。DA-250は、ウエハ状態で高価な液体ヘリウムを用いることなく、極低温の25K から400K までの広い温度範囲を、高精度に温度制御することが可能である。また、試料の測定範囲（プロービング範囲）は、各プローブともに3インチウエハ上の全範囲をカバーし、最大8インチウエハを設置できるように設計した。さらに、本クライオスタットは、ICTS/DLTS 以外の I-V 特性や比抵抗（プローブ 4 本使用時）の測定も可能である。

以上からもわかるように、ICTS 装置としての性能を十分に発揮させるためには、単に汎用の装置の組み合わせでは十分ではない。そのため、当社では、主要な装置を新たに開発した。前述したように、ICTS 装置には、一定温度で種々の深い不純物準位の高感度測定が要求される。すなわち、広範囲の時間領域（約 10^{-6} s~ 10^4 s）における、高感度な容量（最高 1 fF の分解能）の測定が必要となる。そのために高速領域から低速領域まで高感度で測定可能な容量計を特別に開発した。さらに、広範囲の時間領域データ（ 5×10^{-6} s~ 10^4 s）を 1 回の測定でも取得可能なように、対数等間隔でサンプリングができるトランジェントコンバータも開発した。これらの開発により、ICTS 法の長所を十分に生かすことが可能になった。

3.2 データ処理ソフトウェアとデータ出力

データ解析用のソフトウェアとして、DA-1500標準ソフトウェアのほかに、DA-202 MOS/MIS 界面評価ソフトウェアをオプションとして用意した。

前者には、①浅い準位濃度測定、②深い準位濃度測定（ICTSとTDS-ICTS）、③捕獲断面積測定、④活性化エネルギー測定、⑤ 3次元 ICTS 測定の各機能と、オプションとして DLTS 測定が行えるソフトを搭載した。

また後者には、① C-V 解析、②浅い準位濃度の深さ方向分布解析、③ゼル

ポスト解析, ④界面準位 (深い準位) 解析が簡単に行えるソフトを搭載した.

さらに, データ出力には, 高速出力が可能なラスタメモリタイプのサーマル式のプロッタプリンタを採用した.

3.3 DA-1500の特長

DA-1500は, 以上のような装置構成と, データ処理・解析機能をそなえ, 半導体中不純物測定装置として以下のような特長をもっている.

- (1)あらゆる半導体に適用可能.
- (2)各種の深い準位のパラメータの測定可能.
- (3) $10^{11}\text{atoms}/\text{cm}^3$ での高感度な定量が可能で, フォトルミネッセンス法などの光学測定法では検出できない光学的に不活性な元素の検出可能.
- (4)深い準位濃度の測定が一定温度で可能なため, サンプルの構造変化を心配する必要がない. また, 活性化エネルギーも数点の温度で測定でき, 温度を連続的に掃引する必要がない.
- (5)測定から解析まで一括して処理する高速解析のソフトウェア搭載.
- (6)最高 $1\ \mu\text{s}$ の高速応答, $1\ \text{fF}$ の高分解能, $1\ \text{fF}\sim 2000\ \text{pF}$ の広範囲の測定可能な過渡容量計.
- (7)対数等間隔サンプリング法により, $5\times 10^{-6}\ \text{s}\sim 10^4\ \text{s}$ の広範囲のサンプリング可能.
- (8) λ 効果を考慮した TDS-ICTS スペクトルの解析により高濃度測定可能.
- (9)DLTS 測定用オプションにより, 数 $10\ \text{meV}$ からのエネルギー準位の解析可能.

4. 測定対象と用途

4.1 測定対象

- ①単結晶半導体 (Si, Ge ほか).
- ②化合物半導体 (GaAs, GaP, InP, AlGaAs ほか).
- ③アモルファス半導体 (a-Si, a-Ge ほか).
- ④セラミック半導体 (ZnO ほか).

これらの半導体で p-n 接合, ショットキー接合または MOS/MIS 接合をもつ試料.

4.2 用途

- ①半導体基板材料の特性評価.
- ②半導体デバイスの特性評価.
- ③半導体発光・受光デバイスの特性評価ほか.

5. 深い不純物準位の測定解析例

5.1 シリコン中の金のアクセプター準位

ICTS, DLTS 法による測定において, 過渡容量波形の良否が重要となる. その測定例を図10に示す. DA-1500は, 高速過渡容量計を搭載しているため, シリコン中の金の深い準位不純物測定が室温で可能となった. 本装置では, 定容量成分を自動的に除去し, 深い準位不純物による微小容量変化のみを拡大表示する. この過渡波形は, ICTS や DLTS スペクトル解析の源になる信号であり,

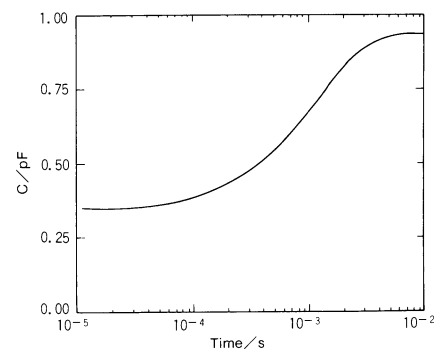


図10 高速容量過渡波形
High-speed capacitance
transient signal

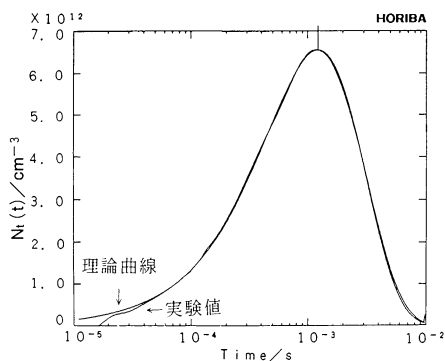


図11 ICTS スペクトルと論理曲線の比較
(Si中のAuの準位)
Comparison between ICTS
spectrum for the Au deep level
in Si and the theoretical curve

異常スペクトルが得られたときの原因追求が容易になる。

図10を解析して求めたシリコン中の金のアクセプター準位の ICTS スペクトル例を図11に示す。ICTS 信号は正であるので、一見して多数キャリアトラップ（本試料の場合は電子トラップ）であることがわかる。また、ICTS の理論曲線（単一準位）と実験値が非常によく一致しており、単一準位であることがわかる。また、 λ 効果補正をした正しい深い準位濃度（TDS Deep Conc.）は、ピーク値より、 6.55×10^{12} atoms/cm³と簡単に求められる。一方、 λ 効果補正を行わない場合は、真の値より約1/3程度小さな値を見積ることになる。一般に、 λ 効果を考慮した解析を行わなければ、1/3から1/10程度小さな不純物濃度を見積ることになる。

図12に、捕獲断面積の測定例として、シリコン中の金のアクセプター準位の場合⁵⁾を示す。印加パルス幅を50ns から20ms まで変えて自動測定を行ったも

CAPTURE CROSS SECTION #2

```

Filename       : SIAU3
Comment        : Au in Si #1-01
                at Room Temperature
Sample Temp.   : MANU. 300.0 K
Bias Voltage   : -8.00      V
Pulse Voltage  : 6.00       V
Pulse Width    : TABLE    ASC
Sampling Range: SMTH. 10   ms
Accumulation   : 4000
Capaci. Range : AUTO. 2    pF
Nullbalance    : AUTO. 13.5 pF
Response Time  : 10        μs
-----
Shallow Conc.  : 5.91X1013 cm-3
R. Effect. Mass : 0.330
Form Factor    : 6
-----

```

No.	Pulse Width
1	50 ns
2	100 ns
3	200 ns
4	300 ns
5	500 ns
6	700 ns
7	1 μs
8	2 μs
9	3 μs
10	5 μs
11	10 μs
12	100 μs
13	1 ms
14	10 ms
15	20 ms

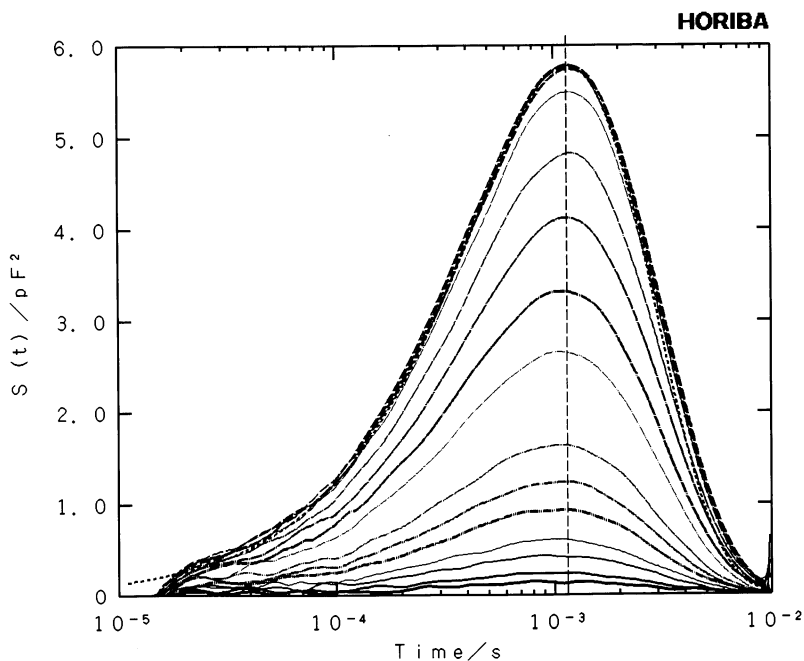


図12 捕獲断面積の測定(Si中のAuの準位)
Measuring the capture cross section for the Au deep level in Si

のである。10ms 以上で信号は飽和しており、深い準位がキャリアにより完全に満たされていることがわかる。これらの ICTS 信号のパルス幅依存性より求める時定数から、捕獲断面積が $2.75 \times 10^{-16} \text{cm}^2$ と求まる。さらに、この値を用いることにより、エネルギー準位を決定することも可能である。

温度を変えることなく測定することのできる ICTS の場合は、上記の15本のスペクトルを得るのに30分程度で完了する。一方、同様の実験を DLTS により行った場合は、各印加パルス幅に対するスペクトル測定に約40分を要するため、全測定には10時間を要することになる。その上、DLTS では1本のスペクトルを得るのに必ず温度掃引（上昇または下降）が不可欠であり、液体窒素や液体ヘリウムなどの冷媒の消費量が多くなる。

図13に、3次元 ICTS 測定例を示す。図13(A)は、逆バイアス電圧を変えながら ICTS 信号の自動測定を行い、3次元で表示したものである。ここで、逆バイアス電圧を変えることは、測定領域を接合面に対し垂直な方向に変化させることに対応する。また、ICTS 信号の各ピーク値を接合深さ方向に対してプロットしたものが図13(B)である。このプロットより、深い準位濃度の深さ方向依存性を簡単に求めることができ、不純物の拡散の様子などを調べる上で非常に有用な機能である。

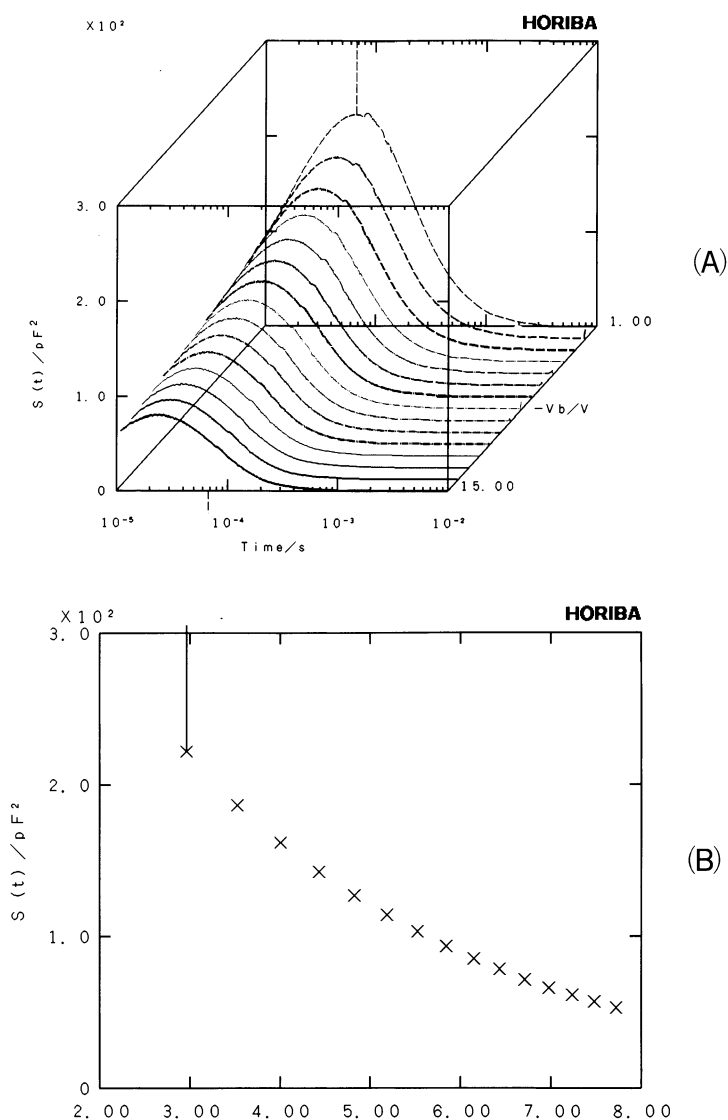


図13 3次元 ICTS
3-dimensional ICTS spectrum

5.2 GaAs 中の EL 2 と EL 3 準位³⁾

室温での測定例として図14に、GaAs 中の EL 2 と EL 3 の測定例を示す。

深い不純物準位を正確に測定するためには、半導体とショットキー電極間の電極反応が生じない室温付近での測定が望ましい。しかし、DLTS 法による測定では、レイトウインドを0.1秒以上に設定することが困難なため、EL 2 の測定を400K 付近の高温で行わねばならず、誤差要因を含むことになる。一方、ICTS 法による測定では、DLTS のレイトウインドに対応する測定時間を最大10,000s (DA-1500の場合) まで設定できるため、電極反応が生じにくい低温での測定が可能となる。また、TDS-ICTS 法³⁾の採用により、正確な不純物準位濃度をピーク値から正確に求めることが可能となった。

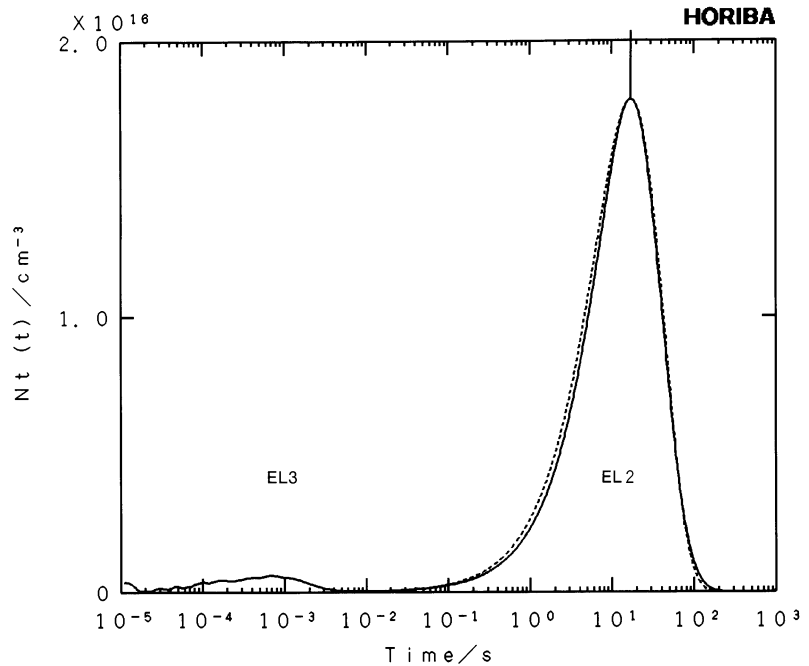


図14 室温での GaAs 中の EL 2, EL 3 準位測定
EL2 and EL3 deep level in GaAs under isothermal condition

5.3 GaAs の界面準位^{6,7)}

図15に、表面処理状態の異なる GaAs に対して、ICTS 法により求めた EL 2 濃度の相違を示す。本図に示すように、未処理、H₂ 及び PH₃ プラズマ処理、ポストアニール処理を行った試料に対する EL 2 濃度より、プラズマ処理は EL 2 濃度を減少させることに役立っていることがわかる。また、EL 2 濃度は、H₂ プラズマ処理後のアニールにより増加するのに対して、PH₃ プラズマ処理後のアニールにより EL 2 濃度は未処理の場合の30%未満におさえられていることもわかる。これらのことにより、リン原子による GaAs 界面準位のパッシベーションの可能性が見いだされた。

5.4 超高压下での深い不純物準位

図16に、深い不純物準位 (Si: Au, ZnSe: In, Al_xGa_{1-x}As: Si) からの電子の熱放出割合; e_n (ICTS 信号のピーク時間より決定される) におよぼす圧力効果を ICTS 法により求めた結果を示す。電子放出にともなう格子緩和による体積 ΔV は、 e_n を用いて $-kT \left| \frac{\partial \ln e_n}{\partial P} \right|_{\tau}$ として与えられる。また、ZnSe: In 中の深い準位 (D-trap) に適用すると、体積変化として 0.016 nm^3 が求められた。

さらに、この体積変化を ZnSe の結合距離に換算すると 8 % の変化であることがわかった。

このように、ICTS 法は、一定温度での測定が可能のため、圧力変化などの測定を容易にすることがわかる。

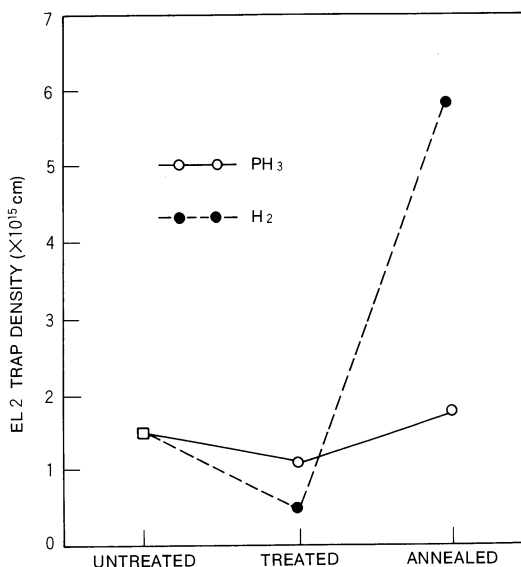


図15 GaAs 界面の処理状態、未処理、プラズマ処理 (—○— : PH₃, -●- : H₂) 及びアニール処理による EL2 濃度の変化
Variation in EL2 densities on untreated, treated and annealed GaAs surfaces. The EL2 density on PH₃-plasma-treated GaAs surface is compared to that on the H₂-plasma-treated one.

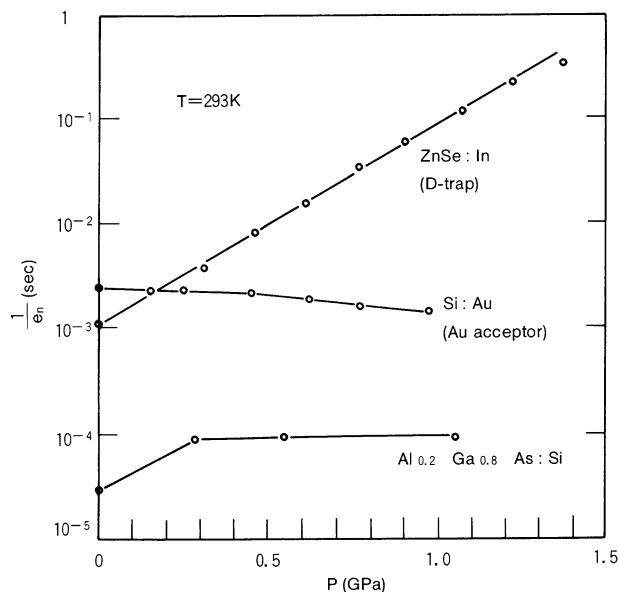


図16 超高压力下における半導体中の深い不純物準位
Pressure-induced changes of electron thermal emission rate of deep level

6. まとめ

ICTS 法は、一定温度での測定が可能であり、アモルファス半導体のように温度により構造変化を起こしやすい試料の測定や他の実験装置との組み合わせ、たとえば圧力変化によるキャリア（電子、正孔）の放出率変化^{8,9)}などを調べるのに有力な手段になる。また、測定不純物に最適な温度に設定した場合には、ICTS 測定時間が GaAs 中の EL2 の場合に 5 分間程度と DLTS 法より 1 桁短いため、品質管理にますます有用性を発揮するものと期待される。

現在の ICTS/DLTS 測定装置は、最小検出感度約 10^{11} atoms/cm³、最小測定領域数 $10 \mu\text{m}$ 角である。不純物・欠陥測定装置の今後の展開としては、①超 LSI などますます重要性が増加する微小領域の測定に対応するために、電流のように測定領域が接合面積に依存しない電流 ICTS などへの測定原理の拡大、②バルク結晶の高純度化にともない問題点が相対的に浮き彫りになってきた界面準位密度の正確な測定評価などへの測定対象の拡大、さらに、③超高压力下での ICTS 測定のように、温度以外の物性量を変えることにより新たな情報を得るなど、ICTS 法の威力を発揮できる分野は、ますます広がるものと期待される。

参考文献

- 1) D. V. Lang, J. Appl. Phys., 45, 3032 (1974).
- 2) H. Okushi and Y. Tokumaru, Jpn. J. Appl. Phys., 19, L335 (1980).
- 3) T. Okumura, Jpn. J. Appl. Phys., 24, L437 (1985).
- 4) 松田耕一郎, 横山一成, 田中光, 吉岡誠一郎, 原清明, “半導体中不純物測定装置”, 計

- 測技術, Vol.18, No.3, p.81-89 (1990).
- 5) 松田耕一郎, 大串秀世, 徳丸洋三, 田中一宣, 八百隆文, “ICTS 法による結晶 Si 中 Au の深い準位評価”, 1986年春期応用物理学会, 日本大学, 1986年4月1日.
 - 6) 山田隆史, 杉野隆, 松田耕一郎, 白藤純嗣, “PH₃ プラズマ処理を行った GaAs 表面の DLTS 及び ICTS 解析”, 1990年秋期応用物理学会, 岩手大学・岩手医科大学, 1990年9月26日.
 - 7) T. Sugino, T. Yamada, K. Matsuda, and J. Shirafuji, Jpn. J. Appl. Phys., 29 (9), L1575-1577 (1990).
 - 8) 財部健一, 平塚梯一, 箕村 茂, 日下征彦, 松田耕一郎, “超高压等温下における半導体中の深い不純物準位”, 1989年春期応用物理学会, 千葉大学, 1989年4月1日.
 - 9) K. Takarabe, S. Minomura, M. Kusaka, and K. Matsuda, “Pressure Effects On Deep Level In Semiconductors”, Defect Control In Semiconductors, K. Sumino (ed), Elsevier Science Publishers B.V. (North-Holland), p1037-1041 (1990).



松田 耕一郎

開発1部 副部長
1951年1月7日生
広島大学理学研究科
博士課程後期修了
理学博士

