

パーソナルコンピュータを用いた 半導体中トラップの評価システムの製作

Development of Evaluation System of Deep Traps
in Semiconductors by Using Personal Computer.

徳田 豊, 下方稔久*

Yutaka TOKUDA, Toshihisa SHIMOKATA

Abstract

Evaluation system of deep traps in pn and Schottky junctions, and MOS structures was developed by using personal computer. Deep level transient spectroscopy and weighted capacitance transient spectroscopy measurements are made by using this system. Zerst and Schroder analyses are also performed for MOS structures. This simple measurement system can provide useful technique to detect traps in semiconductors.

1. はじめに

現代の半導体産業における、デバイスの集積度と歩留まりの向上は、数年前に比べ確実に進歩している。その背景には、デバイスの基板として使われるSiやGaAsなどの半導体材料の品質向上とウェーハ中に含まれる欠陥密度の低下と減少などがあげられる。さらにデバイスの集積度の向上と歩留まりを向上させるために現在も研究が行なわれている。しかし、デバイスが微小になるにつれますます、デバイス作製における汚染やウェーハに含まれる不純物や欠陥の影響が無視できなくなってくる。そこで、そうした欠陥の測定と評価が必要となってくる。

1) 我々は、ショットキー接合、pn接合、MOS構造中に含まれる半導体微量不純物の測定及び評価システムの作成を行なった。そのシステムの構成は、パーソナルコンピュータとA/D、D/Aコンバータとアンプと容量測定器を用いたシンプルな測定系である。その測定系を制御するためのソフトウェアとデータ処理のためのソフトウェアの開発を

行なった。

本論文では、2. にDLTS (Deep Level Transient Spectroscopy) ²⁾ 測定システム、3. では、一定温度DLTS測定システム³⁾、4. FP (Fast Pulse) 測定システム⁴⁾、5. MOS (Metal Oxide Semiconductor) 評価のためのバルスC (容量) - V (電圧)、C (容量) - t (時間) 測定及び、Zerst処理⁵⁾、Schroder処理⁶⁾について述べる。

2. DLTS測定システム

DLTS法は、ショットキー接合、pn接合、MOS構造の接合容量の過渡応答特性から深いエネルギー

ギ一準位の活性化エネルギー、トラップ濃度を求める方法である。一般には接合容量法と呼ばれるもので原理は古くから知られていたが、ベル研究所のLang²⁾が深い準位を高速でスペクトロスコピックに測定する方法として開発した。さらに、接合容量の過渡応答変化は非常に小さいので、S/N比を上げる必要がある。そこで、Tokuda⁷⁾らの方形波重み関数方式によってS/N比の向上がはかられた。方形波重み関数方式のDLTSの基本的な考え方を図1に示す。ここに、温度を上昇させたときの接合容量の過渡応答の時定数変化の様子を示す。2つの時刻でのそれぞれの容量の差を測定し、これを温度に対してプロットするものである。低温では、時定数は長く、2つの時刻の容量差は零であるが、温度の上昇とともに値をもつようになる。さらに温度を上昇させると時定数は短くなるので、再び零となる。

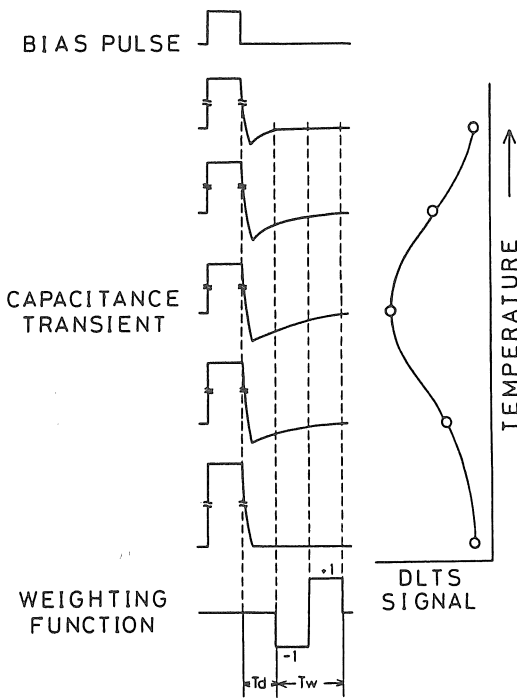


図1 方形波重み関数方式DLTS法の基本的な考え方

ゼロバイアス状態から急激に逆バイアスを印加したことによってトラップからのキャリアの放出によって生じる接合容量の変化は、次の式で表わされる。

$$C(t) = C_{\infty} - \Delta C \times \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (1)$$

ここで、 C_{∞} は、逆バイアス印加時の接合容量の定常値、 ΔC は、過渡応答の全変化幅で、トラップ濃度に比例している。 τ は、キャリアの放出時定数である。また、方形波重み関数方式では、試料に逆バイアスを加えた後、容量測定器のレスポンスを考慮して T_d 区間をもうけ、その後の T_w 区間を2分割しそれぞれの -1 、 $+1$ の重み関数をかける。ここで、過渡応答を表わす式(1)と図1の重み関数を掛け合わせて積分し、時間平均すると、DLTS信号 V_0 が得られる。

$$V_0 = \frac{1}{T_w} \left\{ - \int_{T_d}^{T_d+T_w/2} C(t) dt + \int_{T_d+T_w/2}^{T_d+T_w} C(t) dt \right\} \quad (2)$$

を得る。式(1)を式(2)に代入して整理すると

$$V_c = \frac{1}{\tau} \left\{ \exp\left(-\frac{T_d}{\tau}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{T_w}{2\tau}\right) \right] \right\}^2 \quad (3)$$

またDLTS信号 V_c が最大となる条件は、 V_c を τ で微分して、

$$\exp\left(-\frac{T_w}{2\tau_{max}}\right) = \frac{\left(\frac{T_d}{T_w} + 1\right) \frac{T_w}{\tau_{max}} + 1}{\frac{T_d}{T_w} \frac{T_w}{\tau_{max}} + 1} \quad (4)$$

$\tau = \tau_{max}$ が、その時の T_d 、 T_w において V_c を最大にする時定数である。 T_d/T_w を一定として T_w を変えると V_c が最大となる τ_{max} が変化する。したがって V_c を温度の関数として測定すると、各々のトラップに対して測定した τ_{max} に対応する温度

で、 V_c はそれぞれ最大値をもつ。こうして τ の温度依存性が求められ、トラップのエネルギー準位が評価できる。²⁾

システムのブロック図を図2に示す。

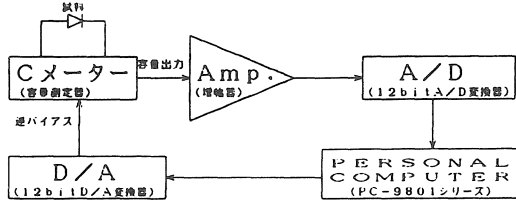


図2 半導体微量不純物測定装置のブロック図

測定システムには、現在広く使われているNEC製PC-9801シリーズパーソナルコンピューター、12ビットA/D、D/Aコンバータ、アンプ、容量測定器を用いた。容量測定器は、BOONTON社MODEL72Bである。D/Aから、試料に容量測定器をとおしてバイアス電圧を加える。容量測定器からは、容量に対応した電圧が出力される。それを、A/Dを通して、コンピューターに取り込む。容量の値をメモリーに蓄えてあるので、それを使って、様々な評価を行なうことができる。図3にDLTS測定例を示す。

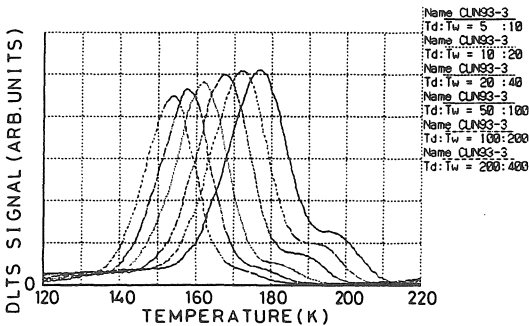


図3 DLTS測定例 試料は、LEC GaAs

試料は、液体封止引き上げ(LEC)法によるGaAsウェーハにAuショットキー形成を行なったものである。測定は、 $T_d/T_w=5$ (ms) / 10 (ms), 10 (ms) / 20 (ms), 20 (ms) / 40 (ms), 50 (ms) / 100 (ms), 100 (ms) / 200 (ms), 200 (ms) / 400 (ms)で行なった。このときのトラップの温度依存性を図4に示す。

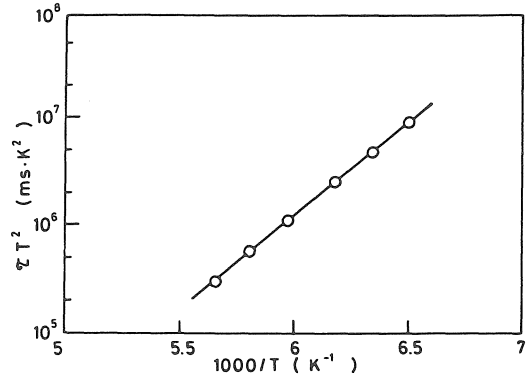


図4 トラップのキャリア放出時定数の温度依存性

このシステムの特徴は、 T_d/T_w が6本同時に計測できる点にある。今までは、トラップのキャリア放出時定数の温度依存性をとるとき T_d/T_w 1本につき1回ずつ温度スキャンを行なってきた。これが、1回で済むときの時間的な短縮は、大きいといえよう。また、従来の測定では、XYレコーダーを用い、DLTS信号の大きさによってその記録範囲を調整してきた。しかし、このシステムでは、CRT上にDLTS信号の大きさに応じて自動的にスケールが設定される。さらに、この様子をリアルタイムにモニターできる点にある。市販の測定システムの中には、試料測定後に結果がはじめて出力されるものがあるが、それでは、何時間もかけて測定したものが正しく測定されているか心配になる上、万が一測定中にトラブルがあったとすれば、時間の浪費になってしまう。また、コンピューターによる測定システムのメリットは、測定後のデータ処理がしやすいという点にある。データがメモリー上にあるので、自由に処理できる。たとえば、他の試料との比較をするときにDLTS信号を同時に表示、また、縮小、拡大が目的に応じて自由に実行できる。また、信号のフィッティングが容易に行なえる点もある。従来は、XYレコーダーに記録した信号強度を読み込んで、コンピューターにデータを入力、処理を行なってきた。この作業が、大変なものであった。この手間が省かれる分、コンピューター導入によるメリットは、おおきといえよう。

3. 一定温度DLTS測定システム

ウェーハの面内分布を評価するとき、多くの試料を測定したいときに、温度掃引によるDLTS測

定は、大変な時間と労力が必要である。トラップのキャリア放出時定数の温度依存性があらかじめわかっているならば、一定温度のもとでDLTSを行なうことができる。温度による容量の変化を考慮に入れなくても良い。ここでは、一定温度WC TS (Weighted Capacitance Transient Spectroscopy) 法について述べる。測定システムは、図2で、使用したブロック図である。一定温度WC TS法による測定例を図5に示す。

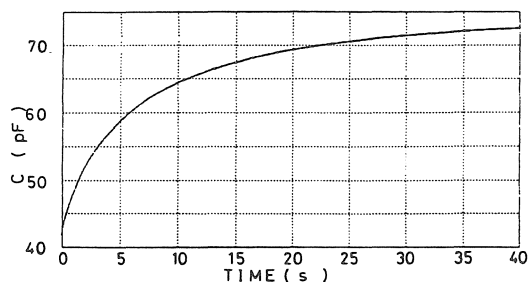


図5 一定温度で接合容量過渡応答測定例
試料はLEC GaAs、測定温度は300K
である。

容量測定器からの容量に対応した電圧出力をA/Dにて最小50μsでサンプリングを行なうことができる。また、測定時間は、数msから数時間の測定が可能である。D/Aから試料に逆バイアスを加え、そのときの試料の容量過渡応答をA/Dを通して、コンピューターに取り込む。その後、その過渡応答を温度を一定、すなわちτを固定する代わりに、Tw/Td一定の条件でTwを変えると、式(3)は式(4)を満足するTwで最大になる。TwとTdの比が一定の条件で、TwとTdのいろんな組み合わせすなわち対応するτmaxに対してVoが与えられることになる。この処理を行なうと図6になる。

この試料では、信号がブロードなため少なくとも2個以上のトラップが存在していることが分かる。このトラップについて、最小2乗法を用いて、信号分離を行なった結果を図の破線を示す。

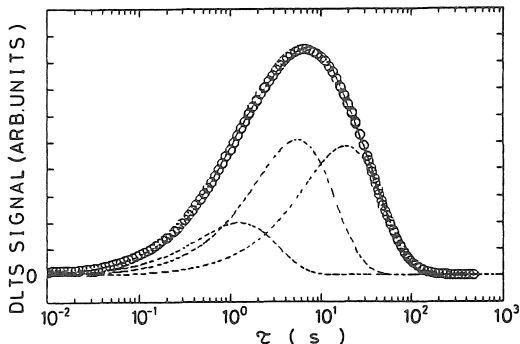


図6 接合容量過渡応答に対する一定温度DLTS信号
Td/Tw = 2の条件である。

4. FP (Fast Pulse) 測定システム

今までは、トラップの温度依存性から間接的に捕獲断面積の評価を行なってきた。ここでは、直接的な捕獲に関する評価を行なうためのシステムを開発した。測定システムの特徴を次に示す。試料に加えるバイアスパルス幅が短くなると容量測定器の回路を通して加えていたのでは、パルス波が歪んでしまう。そこで、試料に直接バイアスパルスを加えた後、その後の過渡応答は、容量測定器により過渡応答を測定する。FP測定を行なうためのFPI (Fast Pulse Interface) の回路図を図7(a)と動作原理を図7(b)に示す。

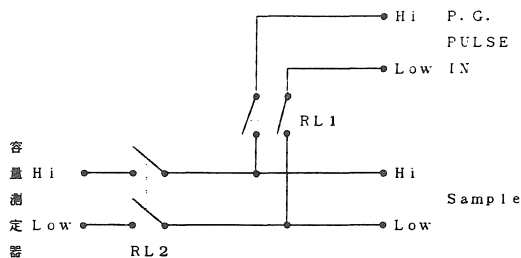


図7(a) FPの回路図

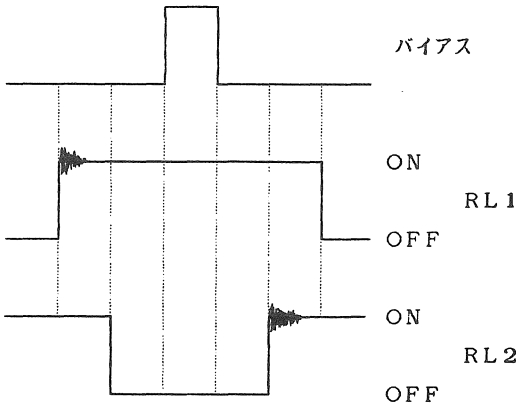


図7 (b) FPの動作原理

RL1と試料をつなぎことによってバイアスパルスを加える。パルス出力後、RL1を切り離しRL2と試料をつなぎ試料の過渡応答を測定する。そのとき、リレーの動作が問題になってくる。リレーの動作を図に示す。最初、パルスが出力される直前にRL1をオンにしておきパルスジェネレーター (P.G.) と試料をつないでおく。これは、RL1が完全動作が完了するまでに数百μsの時間がかかるためである。さらに、試料と容量測定器とをつなぎ変えるためにRL2をオンにする。RL2が完全動作をした後、RL1を切り離す。このように、リレーの動作時間の制御は、コンピューターで行なった。次に、実際の測定例を図8に示す。

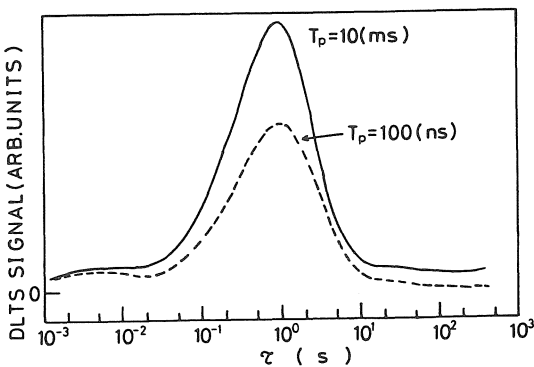


図8 FP測定例 試料はLEC GaAs
測定温度は150Kである。

ここでは、一定温度WCTS法により行なった。試料は、LEC成長GaAsウェーハ、パルス幅の条件は、10msと100nsを合わせて示す。

5. MOS (Metal Oxide Semiconductor) 評価システム

半導体表面近傍におけるシリコン基板の結晶性や界面特性を評価することは、MOSデバイスの動作特性を知る上で、とても重要である。これらの特性を求める測定方法として、バイアス電圧の急激な変化によって起こるMOS容量の時間変化を測定するC-t測定がある。このC-t測定を計測して得られた曲線に対してZerbstは次の関係式を導いた。

$$-\frac{d}{dt} \left(\frac{C_0}{C} \right)^2 = \frac{2n_i C_0}{N_d \epsilon_s \epsilon_0} S + \frac{2n_i C_0}{N_d C_F} \frac{1}{\tau_g} \left(\frac{C_F}{C} - 1 \right) \quad (5)$$

ここで、Cは全容量、C_FはCの平衡時の値、C₀は酸化膜容量、n_iは真性キャリア濃度、N_dはドナー濃度、ε_sはシリコンの誘電率、ε₀は真空誘電率、τ_gが発生ライフタイム、S反転状態での表面再結合速度である。

これより、C-tを横軸に(C_F/C-1)、縦軸に-d/dt (C₀/C)²のように書き直すと、その傾きおよび切片を求めることによって、半導体表面近傍の発生ライフタイム(τ_g)およびSが求められる。次に、半導体表面の浄化のためにGetter処理を行なって表面付近の重金属をバルクに沈めて表面の浄化を行なう時がある。また、デバイスを70~100℃ぐらいの高温で動作させる時、シリコンの全キャリア蓄積の中で、バルクでの項が支配的になってくる。このために、半導体のバルク領域の特性も無視できなくなってくる。そこで、Schroderは、C-t測定をして得られた曲線に対して、次の関係式を導いた。

$$C = \frac{C_i}{(1 - t/t_i)^{1/2}} \quad (6)$$

ここで、C_iは時刻t=0での容量である。

これより、C-tのグラフから次のような横軸に

時間、縦軸に $1 - (C_1/C)^2$ のグラフを得る。このグラフの傾き t_1 より少数キャリアの拡散長 L_p' が次式によって求められる。

$$t_1 = \frac{\epsilon_s \epsilon_0 C_0 N d_2 L_p'}{2 C_1^2 n_i^2 D_p} \quad (7)$$

なお、拡散長 D_p は次式によって求められる。

$$D_p = 495 \left(\frac{T}{300} \right)^{-2.2} \frac{kT}{q} \quad (8)$$

ここで、 q は電気素量、 k はボルツマン定数、 T は測定温度である。

ここで求めた拡散長 L_p' はシリコンの厚さ W_b に比べて $W_b \gg L_p'$ と仮定して、

$$L_p = L_p' \quad (9)$$

としている。この拡散長 L_p と D_p から、少数キャリアの再結合ライフタイム τ_r は次式によって求められる。

$$\tau_r = \frac{L_p^2}{D_p} \quad (10)$$

このシステムでは、MOS評価のための $C-t$ 、パルス $C-V$ 測定とバルク特性評価のための Schrodter 処理と表面特性評価のための Zerbst 処理について述べる。試料は、 n 形 Si 基板の MOS 構造の試料である。

図9にパルス $C-V$ の測定例を示す。パルス $C-V$ は、バイアス電圧を蓄積側 (+10V) から反転側 (-10V) に掃引している。フラットバンド電圧 V_{FB} は -2.6V であった。

図10に MOS 容量の接合応答特性を示す。測定は 23°C で行なった。

図11に $C-t$ から求めた Zerbst 処理を行なった結果である。このグラフの傾きから、半導体表面近傍の発生ライフタイム $\tau_g = 222 \mu s$ が求められる。

図12に $C-t$ から求めた Schrodter 処理を行なった結果である。測定は、100°C で行なった。ここから、少数キャリア再結合ライフタイム $\tau_r = 3.5$

μs が求められる。

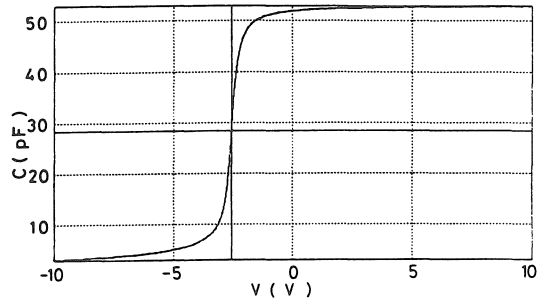


図9 MOS パルス $C-V$ 特性

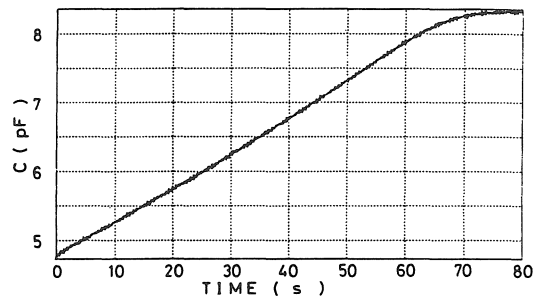


図10 MOS 容量の過渡応答特性
測定温度は 23°C である。

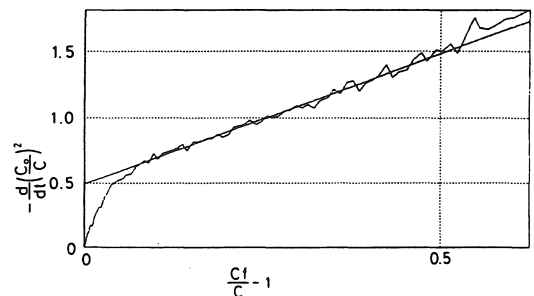


図11 Zerbst 解析例
測定温度は 23°C である。

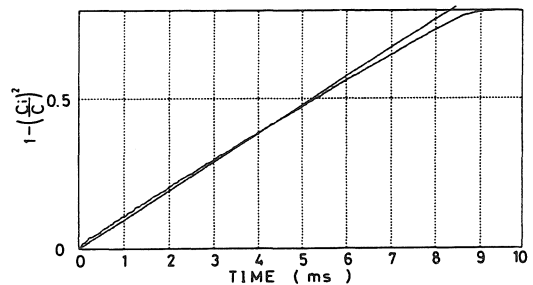


図12 Schrodter 解析例
測定温度は 100°C である。

6. まとめ

この論文では、ショットキー接合、pn接合、MOS構造中に含まれる半導体微量不純物の測定および評価システムの作製を行なった。測定システムは、市販のパーソナルコンピュータ、A/D、D/A、アンプ、容量測定器を使用、これを制御するソフトウェアの開発が重要である。

7. 謝辞

日頃より有益な御援助を頂いている本学林 憲一教授、井上 彌次郎前教授に感謝いたします。

8. 参考文献

- 1) 阿部孝夫：シリコン結晶中の点欠陥と二次欠陥，応用物理 Vol. 59, March 1990
- 2) D. V. Lang, J. Appl. Phys., 45, 3023 (1974)
- 3) Y. Tokuda et al, Journal of Crystal Growth, 103 (1990)
- 4) BIO-RAD社「Fast Pulse Interface Preliminary Operation and Application Note」: Semiconductor Measurement Systems October 1984
- 5) M. Zerbst, Z. Angew Phys., 22, pp30-33 (1966)
- 6) Dieter K. Schroder: Recombination lifetime using the pulsed MOS capacitor, IEEE Vol. ED-31, NO. 4, April 1984
- 7) Y. Tokuda et al, Japan J. Appl. Phys., 18, 309 (1979)

(受理 平成4年3月20日)