

MOS 界面準位密度の自動測定

徳 田 豊

Automatic Measurements of Interface-State Densities in MOS Structures

Yutaka TOKUDA

The microcomputer-controlled DLTS system for the automatic measurements of interface-state densities in MOS structures is described. The present system can draw curves of the interface-state densities versus temperature or energy level during a DLTS thermal scan. Therefore, this system allows the rapid evaluation of the interface-state densities and is suitable to the MOS process control. Experimental results are given for the nSi-SiO₂ interface.

1. まえがき

LSI 製造工程評価のため MOS 界面準位密度分布を迅速かつ精度よく測定できることは極めて重要である。この目的のため各種測定法が提案されているが、バルクトラップ評価のために提案された DLTS¹⁾ (Deep-Level Transient Spectroscopy) 法がエネルギー的に連続分布した MOS 界面準位評価にも大変有効であることが近年示され、広く用いられている²⁾³⁾。この場合通常界面準位密度は、DLTS 測定後図上よりその信号を読み取り、適当な計算²⁾³⁾を行うことにより求めている。しかしこのような方法では評価に時間がかかるうえ、読み取りの誤差も入るように思われる。

本論文では、上記の点を解決するものとして、著者がすでに報告したマイクロコンピュータを利用した DLTS 測定系を用い⁴⁾、MOS 界面準位密度を自動測定できるプログラムを開発した結果を述べる。プログラムの内容は界面準位密度を温度に対して測定するものであるが、捕獲断面積が温度、エネルギーに依存せず、かつその値があらかじめわかっている場合には界面準位密度のエネルギー分布を直接描かすことができるようにもした。

2. 測定手法

図1は、バイアスパルス(V)にもなる試料(MOSあるいはpnダイオード)の容量(C)の過渡応答を示したものである。浅い逆バイアスでトラップがキャリアでうまり、その後深い逆バイアスを印加すると、トラップからのキャリアの放出により容量が過渡的变化を示す。

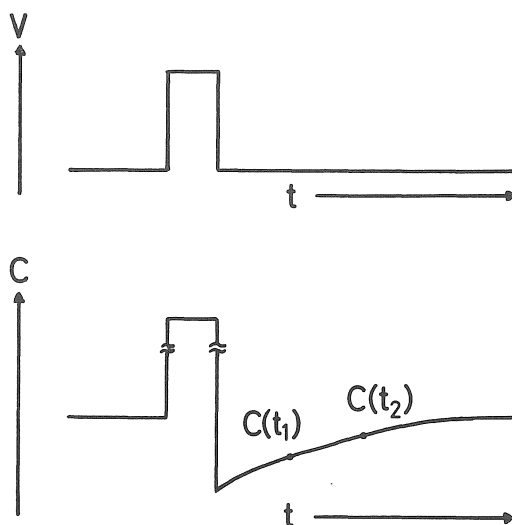


図1 DLTS法の測定原理。Vはバイアスパルス、Cは試料の容量である。

DLTS 法は、深い逆バイアス印加後時刻 t_1 および t_2 の容量の差、すなわち $\Delta C = C(t_1) - C(t_2)$ を測定し、バイアスパルスをくり返し印加しつつ温度を掃引することにより ΔC を温度に対して測定するものである¹⁾。温度を変化させることにより容量の過渡応答の時定数が変わるので、単一エネルギーを持ったバルクトラップに対しては、DLTS 信号 ΔC はある温度で鋭いピークとなる¹⁾。一方エネルギー的に連続分布した MOS 界面準位に対しては、 ΔC は一般的に鋭いピークを持たず、より広がった形の信号となる²⁾³⁾。

便宜上 n 形の基板を用いた MOS ダイオードを考える

と、DLTS法では界面単位密度 N_{ss} は次式により求められる²⁾。

$$N_{ss}(E) = \frac{A\epsilon N_s C_{ox}}{k \ln(t_2/t_1)} \cdot \frac{\Delta C}{TC(t_1)^3} \quad (1)$$

また求めた N_{ss} に対応するエネルギー準位 E は

$$E = E_c - kT \ln[\sigma n V_n N_c (t_2 - t_1) / \ln(t_2/t_1)] \quad (2)$$

で与えられる²⁾。式(1)、(2)において A は接合面積、 ϵ は半導体の誘電率、 N_s はドーパント濃度、 C_{ox} は酸化膜容量、 σn は電子捕獲断面積、 V_n は電子の平均熱速度、 N_c は伝導帯の有効状態密度、 E_c は伝導帯下端のエネルギー準位、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度である。 A は素子寸法で決まり、また C_{ox} および N_s は $C-V$ 法であらかじめ求めることができる量であるので、式(1)で $[] = A\epsilon N_s C_{ox} / k \ln(t_1/t_2)$ はある測定試料に対しては定数となる。従って N_{ss} を求めるために通常の DLTS 信号 ΔC の他に $C(t_1)$ および T を測定すればよいことがわかる。

図2には、界面単位密度 N_{ss} を自動測定するために製作した測定系を示す。マイクロコンピュータはパナファ

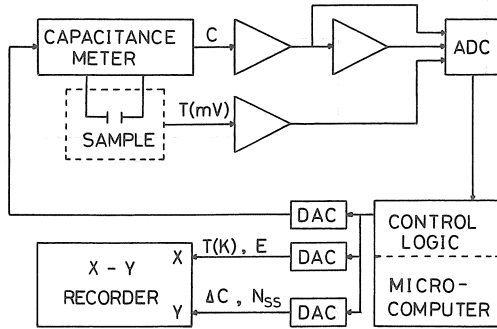


図2 界面単位密度を自動測定するために試作した測定系。コム L_{KIT}-16 を用い、容量測定は BOONTON 72 BD で行った。AD 変換器は変換速度 25 μ s、12ビットのものを (BURR-BROWN, ADC 80 AG-12)、また DA 変換器は変換速度 3 μ s、12ビットのものを (DATEL, DACHK 12B) を用いた。またマイクロコンピュータのメモリは 16 K バイトに拡張してある。この測定系は以前報告したものと同一であるが⁴⁾、図2には簡略化したものが示されている。なおこの測定系では DLTS、DDLTS (Double Correlation DLTS)⁵⁾、ドーパント濃度分布およびトラック濃度分布の測定が行えるが、詳しい内容については分献4)を参照されたい。先に述べたように界面単位密度 N_{ss} を求めるためには DLTS 信号 ΔC 、時刻 t_1 での容量 $C(t_1)$ および絶対温度 T の値が必要となる。このため図2に示したように3種類のデータがマイクロコンピュータに入力される。1つは容量の一段増幅後の値で、これは時刻 t_1 での容量の値、すなわち $C(t_1)$ を測定するのに用いられる。この後容量はもう一段増幅されるが、これは

ΔC 測定用のものであり、マイクロコンピュータで計算することにより ΔC を得る⁴⁾。残りの入力は熱起電力で、これより絶対温度 T を得る。熱電対としては銅-コンスタンタンを用い、熱起電力の絶対温度への変換は、温度範囲を 73 K から 173 K および 173 K から 323 K に分け、それぞれ係数の異なる 3 次の多項式を用い、マイクロコンピュータで演算することにより行った。すなわち

$$T(K) = a_0 + a_1 E + a_2 E^2 + a_3 E^3 \quad (3)$$

を用いた。ここで E は熱起電力であり、単位は mV である。係数は $-5.603 \text{ mV} \leq E \leq -3.378 \text{ mV}$ ($73 \text{ K} \leq T \leq 173 \text{ K}$) の範囲で

$$a_0 = 355.8127821576$$

$$a_1 = 90.57406598622$$

$$a_2 = 16.31119937927$$

$$a_3 = 1.633862049937$$

$-3.378 \text{ mV} \leq E \leq -2.035 \text{ mV}$ ($173 \text{ K} \leq T \leq 323 \text{ K}$) の範囲で

$$a_0 = 273.0584164213$$

$$a_1 = 25.72094993725$$

$$a_2 = -0.7957493955489$$

$$a_3 = 0.1061808509724$$

である。この係数は、熱起電力から絶対温度への変換が JIS 規格 (C1602-1974) に対して精度が 0.2 K 以内になるように決めたものである。また多項式を 3 次としたの

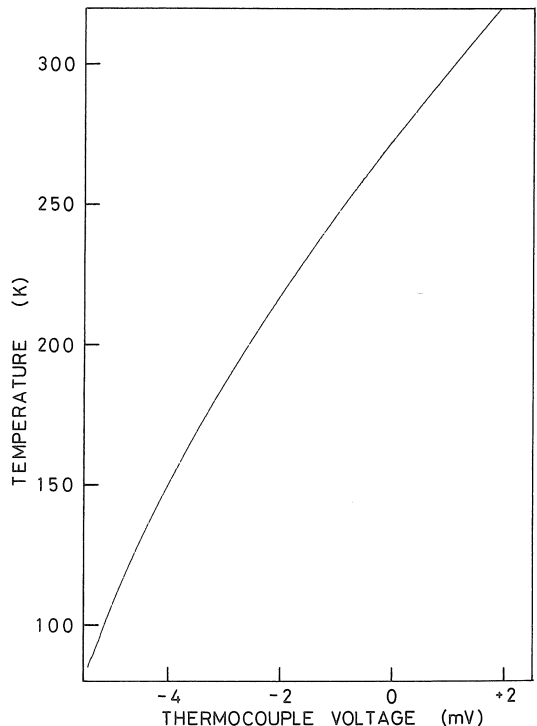


図3 熱起電力を絶対温度に変換した結果

はマイクロコンピュータの演算時間を短くするためであり、温度範囲を限定することにより上記精度が実現できた。なお熱起電力から絶対温度への変換の計算時間は5 ms程度である。一方上記温度範囲73Kから323Kは、著者が目的としたシリコン MOS 界面に対しては十分のものである。図3には図2の測定系を用いて式(3)により熱起電力を絶対温度に変換した結果を示す。なお絶対温度 T は DA 変換器の出力 OV を 250K とし、1 K 当り 20 mV となるように決めてある。

以上のようにして界面準位密度を評価すべき測定量を得る。後は式(1)に従ってマイクロコンピュータで演算を行う。なお式(1)での [] 内の値はあらかじめマイクロコンピュータに入力しておき、このようにして界面準位密度の絶対値を得る。

3. 測定試料

用いたシリコン MOS ダイオードの基板は、n 形 (100)、比抵抗 $3.5 \sim 4.5 \Omega \text{cm}$ のものである。ドーパントはリンである。酸化膜は $1,000^\circ\text{C}$ で熱酸化で形成し、膜厚は $1,500 \text{ \AA}$ である。ゲート電極は Al であり、ゲート面積は $2.12 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ である。

4. 実験結果

4.1 DLTS

DLTS 測定を行うために設定する条件は

- (1) バイアスパルス電圧
- (2) バイアスパルス幅
- (3) t_1, t_2

である。図4は、n 形 (100) 基板のシリコン MOS ダイオードに対して測定した DLTS 信号 ΔC を示す。なお温

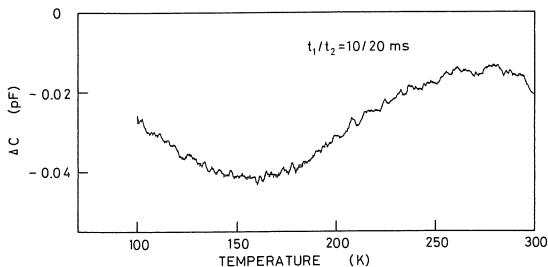


図4 n 形 (100) 基板シリコン MOS ダイオードの DLTS 自動測定

度掃引はマイクロコンピュータにより自動的に行っている⁴⁾。従来 DLTS 信号を熱起電力に対して測定していたものを、2 で述べた熱起電力から絶対温度への変換プログラムを用いることにより、絶対温度に対して測定することが可能となった。図4からわかるように MOS ダイオードに対する DLTS 信号は鋭いピークを持たずより

広がった形となっていることがわかる。これは、この DLTS 信号がエネルギー的に連続分布した MOS 界面準位からの信号であることを意味している。

4.2 界面準位密度対温度の測定

界面準位密度対温度の測定を行うためには4.1で述べた DLTS 測定のための設定条件(1)~(3)に加えて

- (4) 接合面積 A
- (5) ドーパント濃度 N_s
- (6) 酸化膜容量 C_{ox}

の値を与えることが必要となる。酸化膜容量 C_{ox} は C-V 特性より求められる。また N_s は本測定系を用い、すでに報告したプログラムより求めることができる⁴⁾。(4)~(6)の値により式(1)の [] 内の値が定まる。図5はシリコン MOS 界面準位密度 N_{ss} を温度に対して自動測定したものである。この試料に対する(4)~(6)の値は図

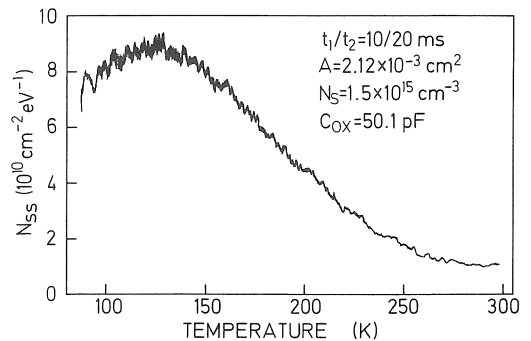


図5 n 形(100)基板シリコン MOS ダイオードの界面準位密度対温度の自動測定の結果

5中に示した。なお界面準位密度の値は単位が $\text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ となるように定数が合わされている。 N_{ss} の値を X-Y レコーダに出力させる場合、 N_{ss} の値と Y 軸用の DA 変換器の出力電圧の関係は指定する必要がある。本測定系では N_{ss} の下限の値を DA 変換器の出力 -5 V に、 N_{ss} の中心の値を DA 変換器の出力 OV に対応させている。従って図5で示したものは出力電圧 -5 V が $N_{ss} = 0 \text{ cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ に、 OV が $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ に設定して測定したものである。この場合は N_{ss} の値が $0 \sim 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ (DA 変換器は $-5 \sim +5 \text{ V}$ の範囲で使用)⁴⁾の範囲でプロットすることができる。界面準位密度を直接測定した場合、図5からわかるように雑音幅は温度が高くなるにつれて減少している。DLTS 信号 ΔC の雑音幅は測定温度に無関係であるので、 N_{ss} 測定での雑音幅の特徴は式(1)からわかるように N_{ss} の計算では ΔC を T で割っていることによる。これは本質的には観測している界面準位のエネルギー幅が高温ほど広がるということに対応し²⁾³⁾、高温ほど界面準位の測定感度は向上するものエ

エネルギー分解能は低下することを意味する。なお、Nss計算に要する時間は40ms程度である。

4.3 界面準位密度対エネルギー準位の測定

界面準位密度対エネルギー準位の測定、すなわち界面準位密度のエネルギー分布を求めるためには、4.1で述べたDLTS測定条件(1)~(3)および4.2で述べたNss計算のための各種値(4)~(6)に加えてエネルギー準位Eを計算するための設定が必要となる。エネルギー準位Eは式(2)より求められるが、そのために必要な設定は

- (7) 電子捕獲断面積 σ_n
- (8) 電子の平均熱速度 V_n
- (9) 伝導帯の有効状態密度 N_c

である。 $V_n \propto T^{1/2}$, $N_c \propto T^{3/2}$ の形で温度に依存し、その係数は対象となる半導体材料で決まる。本実験ではn形シリコンを対象としているので $V_n N_c = 3.132 \times 10^{21} T^2 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-2}$ ⁶⁾と与えられる。一方電子捕獲断面積 σ_n は前もってわかっている量ではなく、実験によって求められるべきものである。図6は、 $\sigma_n = 10^{-16} \text{ cm}^2$ ²⁾を仮定してエネルギー準位を計算したものである。この場合エネルギー

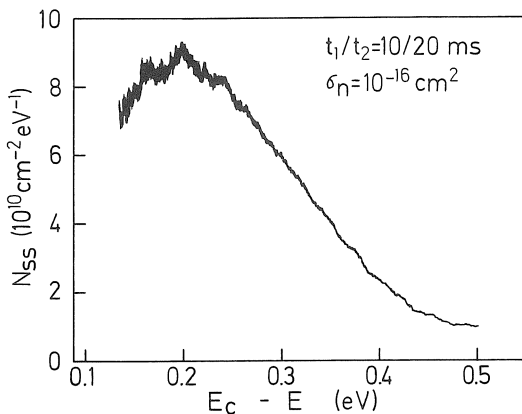


図6 n形(100)基板シリコンMOSダイオードの界面準位密度対エネルギー準位の自動測定の結果

準位Eの値は式(2)からわかるように温度Tのみで決まる。なおEの値は、X軸用のDA変換器の出力電圧OVをE=OeVとし、0.1eV当り0.5Vとなるように決められている。エネルギー準位の計算には対数が含まれるためNssも含めて計算に要する時間は400ms程度となる。

図6での界面準位密度のエネルギー分布はエネルギー準位を求める際に捕獲断面積の値を仮定しているの近似的なものである。正確な界面準位密度のエネルギー分布を求めるためには捕獲断面積の評価が必要である。MOS界面準位に対する捕獲断面積の評価法としていくつかのものが提案されている⁷⁾⁸⁾⁹⁾。その一つの方法として界面準位密度対温度の測定をいくつかの t_1/t_2 について行う方法がある⁷⁾。これは4.2で述べたプログラムを用

いて行うことができる。しかしながらこの方法も含め捕獲断面積の評価には多大な時間を必要とする。従って第1段階での界面準位密度のエネルギー分布の評価には捕獲断面積をほぼ妥当な値で近似して求めるのも、評価時間の点から有用であると思われる。図6で用いた $\sigma_n = 10^{-16} \text{ cm}^2$ の値は、Yamasakiら²⁾が報告しているものである。

5. むすび

マイクロコンピュータを利用した試作のDLTS測定系を用い、MOS界面準位密度を自動測定することができることを示した。DLTS測定系はすでに以前報告したものであるが、プログラムの開発により上記測定を可能にしたものである。界面準位密度の自動測定のためのプログラムは、界面準位密度を測定温度に対して描くものとエネルギー準位に対して描くものの2種類であり、いずれも温度掃引を行ないながら測定できる。従ってこれは界面準位密度の評価時間を短縮するものであり、MOSプロセス制御に適している。本方法をn形基板のシリコンMOSダイオードに適用し、その有用性を示した。

謝辞

日頃より有益な御指導と御援助を頂いている本学竹松英夫先生、大阪大学犬石嘉雄先生、名古屋工業大学宇佐美晶先生に感謝致します。なお、本研究の一部は昭和58年度文部省科学研究費補助金の援助によって行われたものである。

参考文献

- 1) D. V. Lang : Deep-Level Transient Spectroscopy : a New Method to Characterize Traps in Semiconductors, J. Appl. Phys., 45, 3023, 1974.
- 2) K. Yamasaki, M. Yoshida and T. Sugano : Deep Level Transient Spectroscopy of Bulk Traps and Interface States in Si MOS Diodes, Jpn. J. Appl. Phys., 18, 113, 1979.
- 3) Y. Tokuda, M. Hayashi and A. Usami : Evaluation of Interface States in MOS Structures by DLTS with a Bipolar Rectangular Weighting Function, J. Phys., D. 14, 895, 1981.
- 4) 徳田, 中村, 宇佐美 : 半導体接合容量を用いた不純物濃度測定へのマイクロコンピュータの応用, 応用物理, 50, 90, 1981.
- 5) H. Lefevre and M. Schulz : Double Correlation Technique (DDLTS) for the Analysis of Deep Level Profiles in Semiconductors, Appl. Phys., 45,

- 1977.
- 6) S. M. Sze : Physics of Semiconductor Devices, 57, John Wiley and Sons, New York, 1969.
 - 7) M. Schulz and E. Klausmann : Transient Capacitance Measurements of Interface States on the Intentionally Contaminated Si-SiO₂ Interface, Appl. Phys., 18, 169, 1979.
 - 8) N. M. Johnson : Energy-Resolved DLTS Measurement of Interface States in MIS Structures, Appl. Phys. Lett., 34, 802, 1979.
 - 9) T. J. Tredwell and C. R. Viswanathan : Interface State Parameter Determination by Deep-Level Transient Spectroscopy, Appl. Phys. Lett., 36, 462, 1980.

(受理 昭和58年1月16日)