



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	容量過渡解析によるAl ₂ O ₃ /native oxide/InP MIS構造の評価
Author(s)	増田, 宏; 何, 力; 長谷川, 英機 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 132, 89-99
Issue Date	1986-07-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41991
Type	departmental bulletin paper
File Information	132_89-100.pdf



容量過渡解析による $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{native oxide}/\text{InP}$ MIS 構造の評価

増田 宏* 何 力* 長谷川英機* 沢田 孝幸* 大野 英男*

(昭和 61 年 3 月 31 日受理)

Characterization of Interface Properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{native oxide}/\text{InP}$ MIS Structure by Capacitance Transient Analysis

Hiroshi MASUDA, Li HE, Hideki HASEGAWA,

Takayuki SAWADA and Hideo OHNO

(Received March 31, 1986)

Abstract

Interface properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{native oxide}/\text{InP}$ structure are characterized by detailed examination of capacitance transient using C-t measurements and Isothermal Capacitance Transient Spectroscopy (ICTS). The results indicate that the interface states responding to injection pulse are distributed spatially and energetically. Those states are shown to exist below E_c and not above. This supports our "Spatially Distributed Interface State Model."

It is also shown that there are two peaks in the spatial distribution of the interface states.

1. 諸 言

今日の情報化社会の発展には目覚ましいものがある。その基礎となっているのは Si 集積回路の驚くほど速い進歩にあるのは疑う余地がない。情報化社会が更に発展していくのに従い処理すべき情報量も飛躍的に増加すると考えられ、より高速動作する集積回路が求められている。III-V 族化合物半導体には、GaAs, InP 等 Si に比べ高い電子移動度と大きな最大電子速度を有するものがあり、これを用いた MESFET (Metal Semiconductor Field Effect Transistor), MISFET (Metal Insulator Semiconductor FET) は超高速集積回路用デバイスとして研究が盛んに行われている。

III-V 族化合物半導体を用いた超高速デバイスの研究では GaAs MESFET が最も進んでいる。MESFET 単体としては、すでにマイクロ波増幅用として実用化されており、集積回路についても 1K ビット SRAM やフリップフロップ等の論理 IC が製品化されている。また、AlGaAs/GaAs ヘテロ接合を用いた HEMT (High Electron Mobility Transistor) や HBT (Heterojunction Bipolar Transistor) も GaAs MESFET 以上の高速動作が期待できることから盛んに研究が行われている。

しかし、GaAs MESFET ではエンハンスメント形 FET (E-FET) の駆動力が小さく、高集積化に適する E/D 形 DCFL ゲートを用いた LSI では期待されるほど高速動作が行われなかったり論理振幅が小さく雑音余裕を大きくとれない等の問題がある。また、GaAs MESFET を高密度に集積化した場合、サイドゲート現象が見られ素子間分離の問題も生じている。

* 電気工学科 電気物性工学講座

一方, InP MISFET に代表される MIS 形ゲートを用いた FET についても研究が盛んに行われている。GaAs MISFET は、半導体-絶縁体界面制御が非常に困難であるが, InP, InGaAs では、伝導帯付近で比較的界面準位密度の低い半導体-絶縁体界面が得られることから、反転形、蓄積形の MISFET が試作され、高移動度の MISFET が製作出来ることが示されており^{1),2)}、また、小規模の集積回路も試作されている³⁾。

化合物半導体 MISFET を用いた集積回路と GaAs MESFET を用いた集積回路を比較すると、MISFET を用いた場合、次のような利点がある。

1) MISFET が製作できるということは良好な半導体-絶縁体界面が得られるということであり、これにより良質な不活性化 (パッシベーション) がなされる。LSI, VLSI と集積度を上げると素子間分離の問題が生じてくる。GaAs, InP では半絶縁性基板を用いて素子間分離を行っているが、GaAs の場合 1-3 kV/cm の電界で絶縁破壊が起きることが既に報告されており、最近、GaAs MESFET においてサイドゲート現象が生じることが問題になっている。

我々は、サイドゲート現象の原因が界面準位 (表面準位) にあり、なだれ破壊により多数の電子-正孔対が発生し基板の深い準位に捕獲されるために生じるというモデルを提案している。このモデルでは InP MISFET のように界面準位密度が小さいものではサイドゲート現象が見られないことが予想され、実験的にも確認されている⁴⁾。このことから GaAs MESFET よりも InP MISFET の方が VLSI に向いていると考えられる。

2) 駆動力の点で InP MISFET の方が GaAs MESFET よりもすぐれていると考えられる。GaAs MESFET では、SSI レベルではリング発振器の伝達遅延時間が 10 psec を切るなど高速動作が既に確認されているが、LSI, VLSI レベルになると期待されるほど高速動作しない。この理由は Si バイポーラトランジスタと比較した場合、駆動力が小さいことにある。GaAs MESFET で駆動力が上がらない理由は、FET という 2 次元的にしか電流が流れない構造的な理由に加えて、ゲートにショットキー接触を用いているため大きなゲート電圧をかけられない点にある。一方、MISFET ではゲートは絶縁膜をはさんだ形をしており、GaAs MESFET に比べ大きな電圧を印加でき、電界効果により面電荷密度を上げることができる。

3) MISFET の場合、GaAs MESFET に比べると過度のしきい値電圧制御の必要がなく、歩留りが向上すると考えられる。GaAs MESFET の場合、ゲート電圧は拡散電位よりも小さい値で使用するため、大きな電圧をかけることができない。そこで、特にエンハンスメント形 MESFET の場合しきい値電圧は 0 V 付近に精密に制御する必要があり、現在、この困難をとまなうしきい値電圧制御をいかに達成するか研究が行われている。一方、MISFET では大きなゲート電圧をかけることができ、GaAs MESFET ほどのしきい値電圧制御の必要がない。

4) MISFET の場合、その構造、特性が Si MOSFET と類似していることから、Si MOSFET 集積回路の膨大な CAD 資産を利用することができる。

このような利点を有するにもかかわらず化合物半導体 MISFET が実用化されないのは、SiO₂/Si 系のような優れた界面と良質な絶縁膜が得られていないためである。界面の品質が劣ることが、MISFET の最大の問題点であるドリフト現象を引き起こしている。このドリフト現象の存在が化合物半導体 MISFET の実用化を困難なものにしており、多くの研究者がドリフト現象の原因や機構、その抑制法について絶縁膜の形成法も含めて研究を行っている。

我々は、ドリフト現象の機構として、空間的、エネルギー的に分布した界面準位へのトンネリングを介した捕獲により生ずるというモデルを提案してきた⁵⁾。このようなドリフト現象についてより多くの情報を得るには、C-V 法などの静的な特性評価法よりも容量の過渡解析のような動

的特性について調べる必要があると考えられる。

今回、我々は過渡容量解析法の一つである ICTS (Isothermal Capacitance Transient Spectroscopy) 法⁶⁾を用いて半導体-絶縁体界面の特性を調べ、我々のモデルの妥当性を示した。

2. ICTS 法

2. 1 ICTS 法の原理⁷⁾

ICTS 法は、等温下において MIS 容量素子の過渡解析を行ない、界面準位の性質を明らかにする方法の一つである。MIS 容量素子に対しては、金属ゲートに図 1 (a) に示すパルスを注入することにより $V = V_p$ の状態でフェルミレベルより下の界面準位が電子で満たされ、 $t = 0$ で $V = V_a$ に変化させたことによりフェルミレベルが下がり、下がったフェルミレベルより上のエネルギーレベルにある界面準位に捕獲されている電子は、その準位に固有の時定数 τ で放出される。このため、容量は図 1 (b) に示すように変化し、この容量の応答波形を解析することにより界面準位密度分布や時定数分布を知ることができる。準位に捕えられている電子数を $g(t)$ とすると、 $g(t)$ は指数関数的に変化し

$$g(t) = g_0 \exp(-t/\tau) \quad (1)$$

と表すことができる。また、 $S(t)$ として

$$|s(t)| = |t \cdot \frac{dg}{dt}| \quad (2)$$

を考えると、 $S(t)$ は $t = \tau$ で最大値 g_0/e をとり、 $S(t)$ を求めることにより g_0 を推定できる。

一方、MIS 容量素子の容量は捕獲されている電子数の関数であり、MIS 構造に対して $f(t)$ を

$$f(t) = \frac{1}{C(t)^2} - \frac{1}{C(\infty)^2} \quad (3)$$

と定義すると、 $f(t)$ と電子数 $Q_{ss}(t)$ の関係は次のように表せる。

$$f(t) \propto \{Q_{ss}(t) - Q_{ss}(\infty)\} \quad (4)$$

ここで、 t はフェルミレベルが変化したときを 0 とした時刻、 $C(t)$ は時刻 t での容量、 $Q_{ss}(t)$ は時刻 t において界面準位に捕獲されている電子による電荷量である。(4) 式を見ると、単一エネルギーレベルの準位の場合、 $Q_{ss}(\infty) = 0$ となり、 Q_{ss} は (1) 式に対応している。従って容量の過渡変化を見ることにより、準位密度を推定することができる。時定数が複数の場合には、 $g(t)$ の重ねたものと考えられ容量の過渡変化から準位の時定数分布も知ることができる。ICTS 法はこのような原理を基にして考えられたものである。

今、 $f(t)$ として (3) 式を用いると、ICTS 信号 $S(t)$ は (2) 式同様

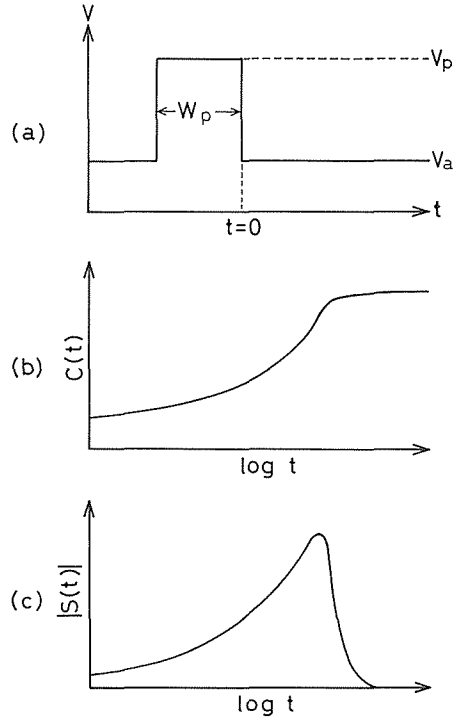


図 1 (a) 注入パルス (b) 過渡容量
(c) ICTS スペクトル

$$S(t) = t \cdot \frac{df}{dt} \quad (5)$$

で定義される。図1(b)を(4)式により処理することにより、図1(c)が得られる。ICTS信号 $S(\tau)$ と時定数 τ を持つ界面単位密度 $N_{ss}(\tau)$ との関係は

$$N_{ss}(\tau) = -\frac{\epsilon_s N_D C_{ox} S(\tau)}{2kT} \cdot \frac{1}{F(E, \Psi_s(0)) - F(E, \Psi_s(\infty))} \quad (6)$$

で表わされる。ここで、 ϵ_s は半導体の誘電率、 N_D は半導体のドナー密度、 C_{ox} は絶縁膜容量、 k はボルツマン定数、 T は温度、 $F(E, \Psi_s(t))$ は分布関数である。

ICTS法とDLTS法を比較した場合、ICTS法の利点としてDLTS法が繰り返しパルスを用いるのに対して、ICTS法では1回の注入パルスで測定できる点が揚げられる。InPMIS界面のようなドリフト現象が見られる系では、界面の初期状態を一定にして界面評価の実験をすることが重要となる。つまり、フェルミレベルより上のエネルギーレベルにある界面準位から電子がすべて放出された状態で測定することが重要になり、測定に繰り返しパルスを用いた場合、十分、電子を放出させる前に次のパルスが注入され、界面の初期状態を変化させながら測定している可能性があり、界面特性を正しく評価していない危険が生じる。一方、ICTS法では、1回の注入パルスで測定できるため界面の初期状態を常に同じにすることができ、これが、今回、InP MIS構造の評価にICTS法を用いた最大の理由である。

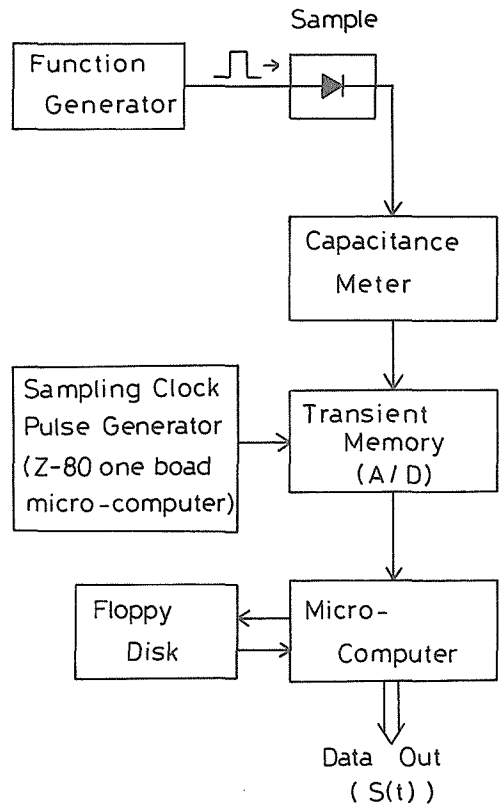


図2 ICTS測定系

2. 2 ICTS測定系

今回、実験に用いたICTS測定系の概略を図2に示す。ICTS信号は、試料にパルス電圧を印加したときの容量の変化を測定し、コンピュータにより信号処理を行うことにより求めるものである。そこで、MIS容量素子にファンクションジェネレータ(NF回路設計ブロック、FG-163)により図1(a)に示すパルス電圧を印加する。このときの容量の変化を容量計(Boonton, Model 72B)で測定する。容量計から出力される容量に比例したアナログ信号をサンプルホールドランジェントメモリ(川崎エレクトロニカ、TMR-10)に入力、記憶させる。このときのサンプリングクロックパルスは、ワンボードマイクロコンピュータによりサンプル間隔が対数的に増加するように制御したパルス発生器からランジェントメモリに供給される。ランジェントメモリに記憶されたデータはマイクロコンピュータ(富士通、FM-11, 16β)に移され、データ処理を行いICTS信号が得られる。データ処理はサンプルしたデータを最小2乗法による多項式近似、または、移動平均処理を行うことにより雑音成分を除去し、ICTS信号を求めた。

3 MIS 容量素子の構造および作製法

今回の実験で用いた試料は陽極酸化 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{native oxide}$ 二重膜を絶縁膜として用いた InP MIS 形容量素子である。試料の構造を図 3 に示す。基板は n 形 InP を用い、裏面にはオーミック電極を形成してある。基板表面の絶縁膜には $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{native oxide}$ 二重絶縁膜を用い、絶縁膜上に Al で金属ゲート電極を形成してある。

試料製作工程は次の通りである。

1) n 形 InP 基板裏面に Au/Ge を真空蒸着し熱処理を行いオーミック電極を形成する。

2) 基板を有機溶剤を用いて超音波洗浄し、 $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 3 : 1 : 1$ のエッチング液を用いて基板表面を軽くエッチングした後、Al を真空蒸着する。次に AGW (Anodization in mixed solutions of Glycole and Water) 溶液を用いて Al/InP を陽極酸化する。AGW 溶液はアンモニア水により $\text{pH} = 6.2$ に調整した酒石酸水溶液とプロピレングリコールを 1 : 9 の体積比で混合した溶液である。酸化は光を照射しながら行い、Al に引き続いて InP も薄く酸化した。このときの電流密度は 0.2 mA/cm^2 とした。

3) Al を絶縁膜上に真空蒸着し金属ゲート電極を形成する。

実験で用いた InP 基板のキャリア濃度は $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{native oxide}$ の膜厚はそれぞれ $1100 \text{ \AA}$ 、 $130 \text{ \AA}$ である。

$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{native oxide}$ 二重膜を絶縁膜として用いた場合、熱処理を行うことにより大幅に界面準位が減少し界面特性が改善されることがわかっている²⁾が、今回は、ICTS 信号が大きく界面特性について調べやすいように界面準位密度の大きい熱処理前の試料を用いて測定を行った。

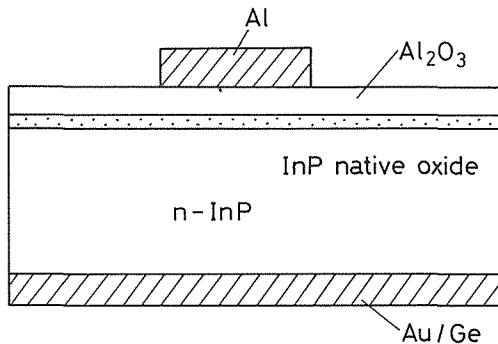


図 3 MIS 容量素子の構造

4. 実験結果

4. 1 C-V 測定

作製した試料に対して C-V 特性を調べた結果を図 4 に示す。測定試料は as-grown の状態で、測定周波数は $110 \text{ Hz} - 1 \text{ MHz}$ である。また、印加電圧の掃引は 23 mV/s で行った。 1 MHz の C-V 曲線に示されたヒステリシスは、界面準位に注入された電子が印加電圧の掃引に対して放出が追いつかないために生じる。また、蓄積側の容量値に周波数分散が見られ、周波数を小さくするに従い容量が大きくなるのがわかる。これは、容量として微分容量を測定しているため、界面準位が応答する低周波では界面準位に充放電する電荷量が増加し、その結果、容量が増加すると考えられる。

4. 2 C-t 測定

(1) バイアス依存性

パルス注入時の電圧 V_p 、注入パルス幅 W_p を一定として、印加バイアス V_a を変化させ、C-t 曲線のバイアス依存性を調べた。パルス注入は最後に注入したパルス終了後 25 分後に行った。これによりパルス注入に応答するフェルミレベルより上にある準位は電子を捕獲していない状態を作りだしていると考えられる。

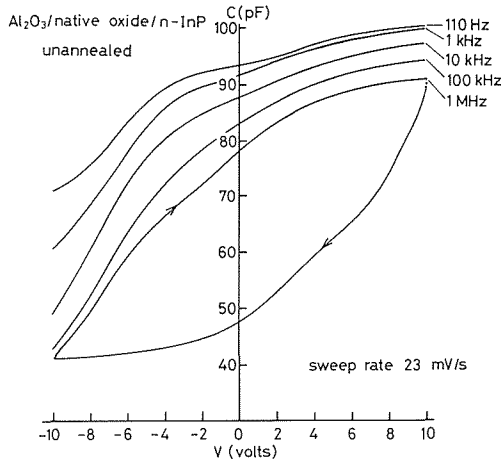


図4 C-V特性

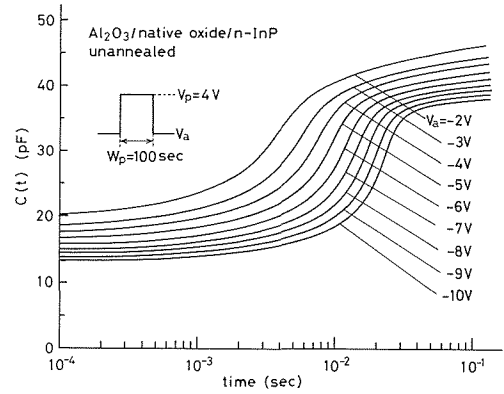


図5 C-t 曲線のバイアス依存性

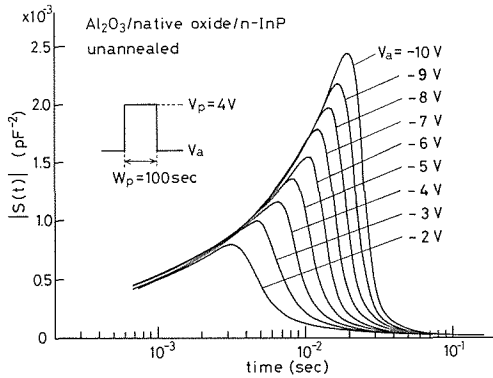


図6 ICTS スペクトルのバイアス依存性

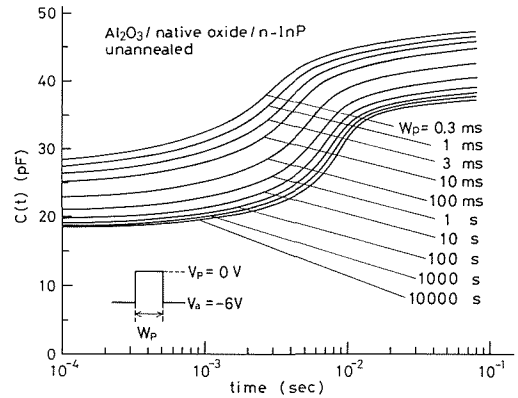


図7 C-t 曲線の注入パルス幅依存性(a)

図5に注入パルスとして $V_p=4V$, $W_p=100\text{ s}$ 一定とし, V_a を $-2V$ から $-10V$ まで変化させたときの $C-t$ 曲線を示す。なお測定は室温で行った。図5からバイアスを深くするに従い $C-t$ 曲線が容量の小さい方にシフトしており, また, 容量の変化が急激に小さくなる時刻が遅い方に移動していることがわかる。この $C-t$ 曲線から ICTS スペクトルを求めた結果を図6に示す。これからバイアスを深くするのに従い遅い放出時定数を持つ単位からの放出が見られる。ICTS スペクトルにはバイアスには依存しないピークが表れないことから, 応答している単位は連続したエネルギー分布をしていると考えられ, この $C-t$ 曲線はバルクの深い準位からの電子の放出ではなく, 界面準位からの電子の放出と考えられる。

また, 図5中 $V_a=-10V$ の曲線に着目すると, 10 ms 以前では容量が非常に小さく, $t=1\text{ ms}$ における容量値を用いて計算すると半導体表面では deep depletion 状態になっていることがわかる。そこで, 小数キャリアの発生により容量が変化している可能性があり, この点について検討を行う。deep depletion 状態において単位時間当たり空乏層中で発生する正孔の個数 N_h は

$$N_h \leq \frac{n_i}{\tau_p} (W - W_\infty) \quad (7)$$

なる関係が成り立つ。ここで、 n_i は真性キャリア密度、 τ_p は正孔の寿命、 W は空乏層幅、 W_∞ は $t=\infty$ における空乏層幅である。 τ_p として $10^{-7}\text{s}^{(8)}$ を用いて(7)式から求めた N_h とICTSスペクトルから求まる単位時間当たり放出される電子数 N_e を比較すると、 N_h は N_e に比べて3桁から4桁小さい。このことからC-t曲線において小数キャリアの発生が与える影響は小さく、C-t曲線が界面準位からの電子の放出を反映していることがわかる。

(2) 注入パルス幅依存性

印加バイアス V_a 、パルス注入時の電圧 V_p を一定としてパルス幅 W_p を変化させ、C-t 曲線の注入パルス幅依存性を調べた。パルスを注入する際には界面の初期状態を同じにするために、測定を開始する前に10数時間、 V_a を印加した状態を保ち初期容量値 C_{ini} を決定し、パルス注入後、容量値が C_{ini} に戻った時行った。測定は $V_a = -6\text{V}$ 、 $V_p = 0\text{V}$ 、測定温度 $T = 300\text{K}$ 、 $C_{ini} = 51.6\text{ pF}$ として W_p を 0.3 ms から 10000 s まで変化させて行った。

図7にC-t曲線のパルス幅依存性を示す。図7からパルス幅が 1000 s と 10000 s の場合でもC-t曲線に違いが見られ、界面準位への捕獲が飽和していないことがわかる。しかし、C-t曲線をよく見ると容量の変化が小さくなる $t > 10\text{ ms}$ における容量値にも W_p により大きな違いがあり、このような放出時定数の大きい準位からの放出が $t < 10\text{ ms}$ におけるC-t曲線に影響を与えていることも考えられる。そこで、このC-t曲線から求めたICTSスペクトルを図8に示した。図8からICTSスペクトルのピーク以前を見ると、ICTSスペクトルは W_p が 100 s で飽和していることがわかる。ここでは $t < 10\text{ ms}$ で電荷の放出が終了する準位について検討を行い、 $t > 10\text{ ms}$ における容量の過渡応答に寄与する放出時定数の大きい準位については後で検討する。

ICTSスペクトルの $t < 10\text{ ms}$ におけるパルス幅 W_p 依存性では、ICTSスペクトルのピーク以前は $W_p < 100\text{ s}$ で未飽和である。この点については界面準位が界面に局在しているとするモデル(「界面局在モデル」と呼ぶ。)では界面準位への電子の捕獲が数msで飽和すると概算されることを考慮すると「界面局在モデル」による説明は不可能である。我々には既に化合物半導体MIS構造の界面準位に対するモデルとして「空間分布モデル」を提案してきた。このモデルでは、界面準位はエネルギー的、空間的に分布し、空間分布した界面準位へはトンネリングを介した電子の捕獲、および、トンネリングを介しての電子の放出が行われると考えている。このようなトンネリングを介した捕獲、放出を考えることにより時定数の大きい準位の存在が説明できる。

次にC-t曲線の $t > 10\text{ ms}$ における注入パルス幅 W_p の依存性について考える。図9は $t >$

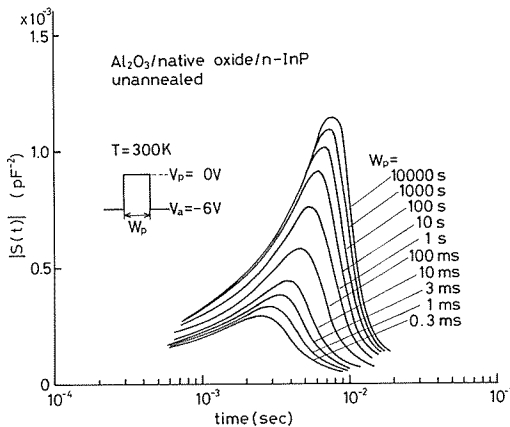


図8 ICTS スペクトルの注入パルス幅依存性(a)

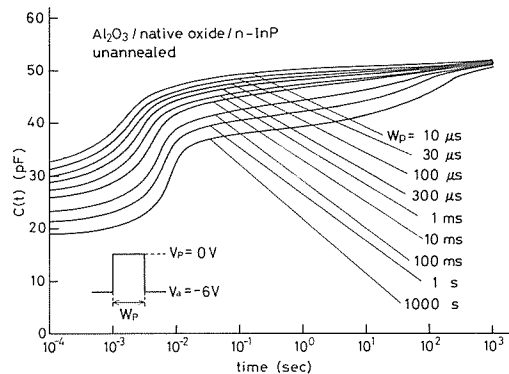


図9 C-t 曲線の注入パルス幅依存性(b)

1000sまでC-t曲線の W_p 依存性を調べた結果を示す。図9から $t > 10\text{ms}$ のC-t曲線にも大きな W_p 依存性が存在し、 W_p が100ms以上のC-t曲線では $t=100\text{s}$ 前後において容量の時間変化が小さくなる点が見られる。このC-t曲線から求めたICTSスペクトルを図10に示したが、図10においても $t=100\text{s}$ 前後にICTS信号が急激に小さくなる点が見られ、これはC-t曲線において容量の時間変化が小さくなる点に対応している。また、 W_p が10ms以下のICTSスペクトルではこのようなICTS信号が急激に減少する点は見られない。

このような非常に大きな放出時定数を持つ界面準位が存在することの説明として、次の2つのモデルが考えられる。1つは、非常に捕獲面積の小さい準位が界面に局在しているというもので、もう1つは、空間的にかなり界面から離れた所に準位が存在するというものである。

第1のモデルでは少なくとも捕獲断面積の違う2種類以上の界面準位が存在し、それらの捕獲断面積は4桁以上違う必要があり、このモデルによる説明は難しい。一方、第2のモデルでは界面からの深さ方向の準位密度分布を適当に仮定することにより説明可能となる。以下に「空間分布モデル」に基づく解釈について説明を行う。

「空間分布モデル」では図11に示すように界面準位密度 N_{ss} がエネルギー E と界面からの距離 x の関数になっている。空間分布した界面準位への捕獲は、パルス幅 W_p の注入パルスによりトンネリングを介して深さ x_m までの準位を埋めるとすると、 x_m は次式で表される。

$$x_m = \frac{1}{2\kappa_0} \ln(\sigma_n v_{th} n_s W_p) \quad (8)$$

ここで、 $2\kappa_0$ はトンネリング定数、 σ_n は界面準位の捕獲断面積、 v_{th} は電子の熱速度、 n_s は半導体表面での電子密度である。

図11にパルス注入により電子が占有された界面準位の分布している領域をPP'A'Aで示した。パルス注入時にはフェルミ準位はPP'にあり、AA'はバイアス V_a の定常状態におけるフェルミ準位である。なお、ここでは絶縁膜中の電界は考慮していない。

一方、空間分布した界面準位からの放出を考えると、界面準位に捕えられた電子はトンネリングにより界面に達し、熱的活性化により半導体伝導帯に放出される。このときエネルギー E 、深さ x の準位の持つ放出時定数 $\tau(E, x)$ は

$$\tau(E, x) = \frac{1}{\sigma_n v_{th} N_c} \exp\left(\frac{E_c - E}{kT} + 2\kappa_0 x\right) \quad (9)$$

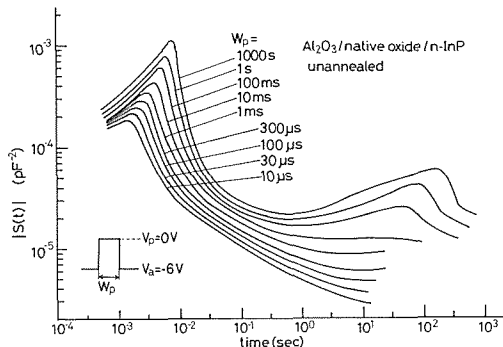


図10 ICTS スペクトルの注入パルス幅依存性(b)

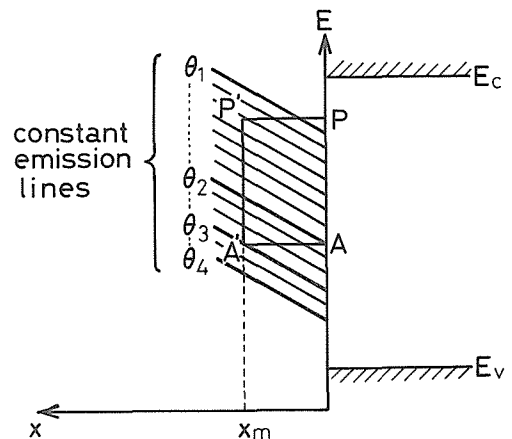


図11 界面準位の「空間分布モデル」

で表される。(9) 式から図 11 に示すようにエネルギー E と界面からの距離 x の座標上に放出時定数が同じになる線 (等放出時定数線) が引ける。今, 界面準位密度 N_{ss} が図 12 に示すようなエネルギー的, 空間的分布をしているとする。 N_{ss} のエネルギー的分布は従来報告されている U 字形分布をしており, また, x 方向の分布は, 表面付近では x に対して指数関数的に減少し⁹⁾, さらに, ICTS スペクトルにおいて $t=100$ s 付近でピークを持つことを説明するために, ある点 x_t 付近で N_{ss} が大きくなる分布をしているとする。このような界面から離れた所に準位が存在すると仮定した点については, 絶縁

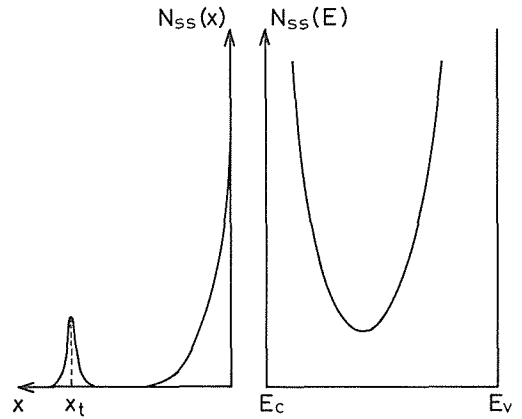


図 12 界面準位密度分布

膜が二重膜であるため, Al_2O_3 と native oxide の界面に準位が存在している可能性は十分にあり, 図 12 に示した N_{ss} の x 方向の分布になっている可能性は十分にある。また, x_t 点における N_{ss} のエネルギー分布も U 字形分布をしていると仮定する。このような N_{ss} 分布を仮定した場合, 等放出時定数線上で放出される電荷量 $Q_{ss}(\theta_i)$ は θ_1 から θ_2 にかけては θ_2 に向かって増加し, θ_2 を過ぎると急激に減少する。その後, θ_2 から θ_3 にかけては徐々に増加し θ_3 を過ぎると再び減少する。ある時刻 t における ICTS 信号は, その時刻が放出時定数となる準位から放出された電荷量 $Q_{ss}(t)$ に対応することから, ICTS スペクトルが図 10 に示した形になることが証明できる。

(3) 温度依存性

このようなエネルギー的, 空間的に分布したと考えられる界面準位について, C-t 曲線の温度依存性を調べ, 活性化エネルギー E_a , 捕獲断面積 σ_n を求めた。

注入パルスは, バイアス $V_a = -6\text{V}$, パルス注入時の電圧 $V_p = 0\text{V}$, パルス幅 $W_p = 1000$ s 一定として測定温度を 290 K から 320 K まで変化させて測定した。パルスを注入する際には界面の初期状態を同じにすることに注意し, その基準として 300 K における初期容量値 C_{ini} を注入パルス幅依存性の測定と同様に定め, 温度を変化させてパルス注入を行った後は再び 300 K に戻し, 容量値が C_{ini} に達してから温度を変化させ, 設定温度に達してから温度が安定するまで 10 分間待った後パルスを注入した。

図 13 に測定した C-t 曲線から求めた ICTS スペクトルを示す。温度が下がるに従い ICTS スペクトルの 2 つのピークが時刻の遅い方にずれ, 電子の放出が活性化形をしていることがわかる。この ICTS スペクトルの 2 つのピーク位置 t_{peak1} , t_{peak2} (図 13 中矢印) をアレニウスプロットしたものを図 14 に示した。このアレニウスプロットから求まる E_a , σ_n は t_{peak1} に表れる ICTS スペクトルピークからは, それぞれ $E_{a1} = 0.55$ eV, $\sigma_{n1} = 1.7 \times 10^{-14} \text{cm}^2$, t_{peak2} に表れる ICTS スペクトルピークからは, それぞれ $E_{a2} = 0.4$ eV, $\sigma_{n2} = 2.5 \times 10^{-17} \text{cm}^2$ と求まる。これらの結果を「界面局在モデル」により説明しようとする, 次の 2 点で極めて困難である。第一に E_{a2} が E_{a1} よりも大

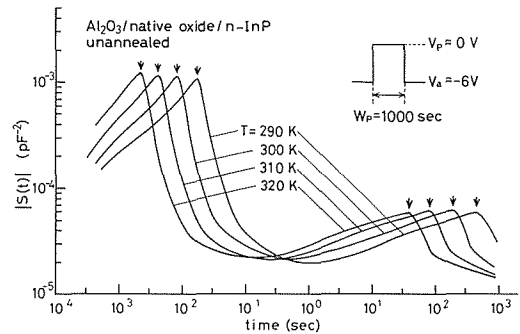


図 13 ICTS スペクトルの温度依存性

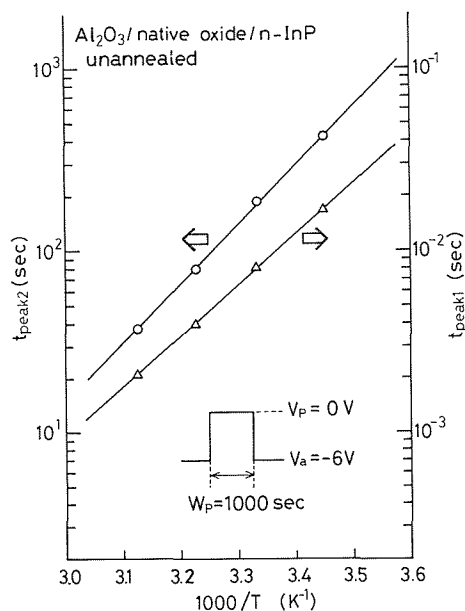


図 14 ICTS スペクトルピークの温度依存性

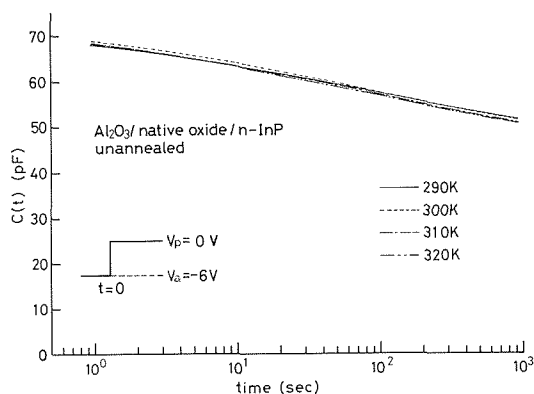


図 15 C-t 曲線（パルス注入時）の温度依存性

きい点である。「界面局在モデル」では、 E_a は半導体表面における $E_c - E_F$ を表しわており、 E_{a1} と E_{a2} の大小関係は、時間とともに電子が界面準位から放出されるため、フェルミレベルが上がり、 $E_c - E_F$ は小さくなる。このため E_{a2} は E_{a1} より小さくなると考えられるが、実験結果は $E_{a2} > E_{a1}$ となり矛盾する。また、第二に捕獲断面積 σ_n が3桁も違う準位がエネルギー的に連続して混在している点であり、このようなことは考えにくい。このように、「界面局在モデル」により測定結果を説明することは不可能と考えられる。一方、先に述べた図 12 に示した空間分布を仮定した「空間分布モデル」では、 E_a については次のように説明できる。 t_{peak1} は図 11 における等放出時定数線 θ_2 の時定数に対応し θ_2 上の準位の活性化エネルギーは θ_2 が $x = 0$ におけるエネルギー E_1 に対応する。また、 t_{peak2} は θ_3 の時定数に対応し、活性化エネルギーも θ_3 が $x = 0$ におけるエネルギー E_2 に対応する。よって、 $E_c - E_2$ は $E_c - E_1$ より大きく、 E_{a2} が E_{a1} より大きくなることが説明できる。また捕獲断面積 σ_n についても界面からの距離 x における捕獲断面積が $\exp(-2\kappa_0 x)$ で小さくなると仮定する¹⁰⁾ことにより σ_{n2} が σ_{n1} より3桁小さくなることが示される。

図 15 パルス注入時の C-t 曲線の温度依存性を示した。図 15 から注入時の容量は温度によらず同じであり、捕獲に寄与している準位は E_c より下のエネルギーレベルにあると考えるのが妥当であり、以前、報告された E_c より上に存在する捕獲、放出に寄与する準位¹¹⁾では説明できない。これらのことより、我々が提案してきた「空間分布モデル」の妥当性が証明された。

5. 結 論

今回、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{native oxide}$ 二重膜を用いた InP MIS 構造に対して容量の過渡応答を詳細に調べ、以下のことがわかった。

- 1) InP RIS 構造における界面準位は界面に局在しているのではなく、空間的に広がりを持って分布しており、このため、長時間にわたって捕獲、放出が行われる。
- 2) 電子の捕獲に対して温度依存性がないことから、捕獲に寄与する準位は E_c より下のエネルギー

ギーレベルにある。

3) 今回、測定した MIS 構造では、空間的に界面から離れた所に高密度の準位が存在している可能性を示したが、これが具体的にどこにあるのか、また、プロセスや熱処理によりどのように変化するかは、まだわかっておらず、今後の研究課題である。

4) 空間的に広がりを持って界面準位が分布する系では、ICTS 法において、直接、時刻 t がエネルギー E に対応しないが、界面準位密度の時定数分布を求めるには有用であることがわかった。

本研究は、文部省科学研究費特別推進研究「化合物半導体－絶縁体界面の物性と応用に関する研究」の補助により行われたものである。

参 考 文 献

- 1) K. P. Pande and D. Gutierrez : Appl. Phys. Lett., 46 (1985), 4, p.416
- 2) T. Sawada, S. Itagaki and H. Hasegawa : IEEE Trans. Electron Devices, ED-31 (1984), 6, p.1038
- 3) L. Messick : IEEE Trans. Electron Devices, ED-31 (1984), 6, p.763
- 4) H. Hasegawa, T. Kitagawa, H. Masuda and H. Ohno : presented at 1985 Device Research Conf.
- 5) H. Hasegawa, T. Sawada and H. Ohno : presented at 1984 Int. Symp. GaAs and Related Comp.
- 6) H. Okushi and Y. Tokumaru : Jpn. J. Appl. Phys., 20 (1981), Suppl. 20-1, p.261
- 7) 徳丸, 大串 : 電子通信学会技術研究報告 SSD 81-125 (1981), p.75
- 8) M. Yamaguchi, S. Sinoyama and C. Uemura : J. Appl. Phys., 52 (1981), 10, p.6429
- 9) H. Hasegawa and T. Sawada : IEEE Trans. Electron Devices, ED-27 (1980), 6, p.1055
- 10) F. P. Heiman and G. Warfield : IEEE Trans. Electron Devices, ED-12 (1965), p.167
- 11) M. Okamura and T. Kobayashi : Jpn. J. Appl. Phys., 19(1980), 11, p.2143