

チャージポンピング法によるMOS界面準位密度の測定

三宅 雅保*

Measurement of interface state density in MOSFETs by charge-pumping technique

Masayasu MIYAKE

ABSTRACT

Charge-pumping technique for the determination of interface state density in MOSFETs has been studied. Interface state density is directly determined from charge-pumping currents that arise from trapping and emission of carriers by interface states. Experimental results for dependences of charge-pumping currents on measurement conditions are presented. Charge-pumping currents for square pulses are larger than those for triangular pulses. This is due to the mechanism that the range of energy levels of interface states, which give rise to charge-pumping currents, depends on a rise time and a fall time of pulses. Considering the mechanism, interface state density and capture cross sections are accurately determined.

キーワード：チャージポンピング法, 界面準位, MOS, 捕獲断面積

Keywords: charge-pumping technique, interface state, MOS, capture cross section

1. まえがき

LSIはあらゆる分野で使われており、さらなる高性能化をめざして微細化の研究が行われている。LSIの重要な構成要素はMOS電界効果トランジスタ(MOSFET)であり、MOSFETの高性能化がLSIの高性能化に直結する。そのような微細で高性能なLSIを実現するためには、種々の新しい製作プロセスが必要であるが、ドライエッチングやイオン注入のような高エネルギー粒子がSi基板にぶつかるプロセスでは、MOSFETの心臓部であるSi/SiO₂界面に界面準位が発生するおそれがある。界面準位密度が大きくなると、MOSFETのしきい値電圧の変動、相互コンダクタンスの低下等の現象がおき、大きな問題となる。また、初期特性に影響を及ぼさない場合でも、長期信頼性には影響を及ぼす場合もあり、界面準位を発生させないプロセ

スを確認することが重要である。従って、界面準位密度を正確に測定することが必要となる。

界面準位密度の測定法として従来広く使われてきた方法は、MOSキャパシタの低周波C-V特性から求める方法である。これは、quasi-static C-V法と呼ばれる方法である。[1] 界面準位は、伝導帯あるいは価電子帯と電子あるいは正孔のやりとりをするため、半導体の表面電位が変化すると界面準位の荷電状態が変化し、容量として観測される。容量を測定し、理想的な場合とのずれから界面準位密度を求める。この方法は、理想的な容量値が不純物濃度分布に大きく依存するため、正確に不純物濃度分布がわかっていないと精度が悪くなるという問題がある。また、近年のデバイスは結晶性がよいので、MOSキャパシタの低周波C-V特性を測定しにくくなっているという問題もある。これに対して、MOSFETの電流-電圧特性から界面準位密度を測定する方法が

*電子・電気工学科

あり、チャージポンピング法と呼ばれる。[2] これは、界面準位が電子あるいは正孔をトラップしたり放出したりするときに流れる電流を測定する方法であり、不純物濃度分布にはあまり依存しない。そのため、quasi-static C-V法に比べると測定結果から界面準位密度が直接的に評価できるという利点がある。しかし、その電流-電圧特性には種々の機構が影響を与え、厳密に界面準位密度を評価するには多くの検討が必要である。

本報告は、MOS構造の界面準位密度の評価法を確立するために、MOSFETの電流-電圧特性から界面準位密度を評価するチャージポンピング法について検討した結果を述べるものである。まず、チャージポンピング法の原理について述べ、次に、自動測定システムを構築した結果を述べる。さらに、MOSFETのチャージポンピング電流から界面準位密度を評価した結果を述べる。

2. チャージポンピング法

2.1 MOS構造の界面準位

単結晶半導体中では、電子のエネルギーはバンド構造を持ち、価電子帯と伝導帯の間に禁制帯と呼ばれる電子が存在することができないバンドができる。しかし、半導体の表面では結晶の周期性が途絶えるため、禁制帯の中にも電子が存在することができるエネルギー準位が存在し表面準位と呼ばれる。MOS構造の場合は、Siの表面はSiO₂との界面なので、界面準位とも呼ばれる。また、界面準位は電子や正孔をトラップするので、最近では界面トラップと呼ばれることが多い。Si/SiO₂の界面準位密度は小さくでき、特に標準的なMOSプロセスでは、Si表面の未結合手が水素で終端されるので、小さい界面準位密度を実現できる。歴史的に見ると、このSi/SiO₂構造により小さい界面準位密度を実現できたことがMOSFETを実現したといえる。界面準位密度が非常に大きいと、ゲートによる電界効果が半導体に届かず、界面準位でしゃへいされるので、電界効果トランジスタの動作をしなくなる。電界効果トランジスタの動作をしなくなるほど小さくなくても、しきい値電圧の変動や相互コンダクタンスの低下等の悪影響を与える。また、長期信頼性が劣化する等の悪影響もあり、界面準位密度の小さいMOS構造の実現が重要である。高性能のMOSFETは微細化により実現されてきたが、微細加工プロセスとしてドライエッチングが使われるようになると、いわゆるエッチングダメージや金属汚染等により界面準位密度が大きくなってしまいう問題がおき、加工形状だけではなく界面準位密度を増大させない加工方法を開発することが重要になっている。この問題は、ドライエッチングだけではなく、新しいプロセスを開発する際には常に重要な問題である。また、製作

時だけではなく、MOSFETの動作中の高電流等のストレスにより、あるいは放射線等の高エネルギー粒子にさらされることにより、界面準位密度の増大がおきる場合もある。

界面準位は電子あるいは正孔をトラップしたり放出したりするために、ゲート電圧により荷電状態が変化する。簡単に表現すると、フェルミレベル E_F より下にある界面準位には電子が存在し、上にある準位には電子が存在しない。電子が存在するとき中性で、電子を放出したとき正に帯電するものをドナー型、空のとき（電子が存在しないとき）中性で、電子が存在するとき負に帯電するものをアクセプタ型と呼ぶ。ゲート電圧が変化すると半導体の表面電位が変化し、バンドの曲がり方が変化する。すなわち、界面の禁制帯中のフェルミレベルの位置が変化し、界面準位の荷電状態が変化する。これは容量となって観測されるので、低周波C-V特性から界面準位密度を評価する方法がquasi-static C-V法である。一方、MOSFET構造で考えると、界面準位と伝導帯あるいは価電子帯との電子あるいは正孔のやりとりは、電流として観測されることになる。これに着目した測定方法がチャージポンピング法である。

2.2 チャージポンピング法の原理

図1にチャージポンピング法によるチャージポンピング電流の測定方法を示す。図はnチャネルMOSFETの場合を示している。MOSFETのソース、ドレインを接続し、基板に対して0あるいは逆バイアスになる電圧を印加する。基板は接地電位である。ゲート電極に図に示すようなパルス列電圧を印加する。ここで、パルス

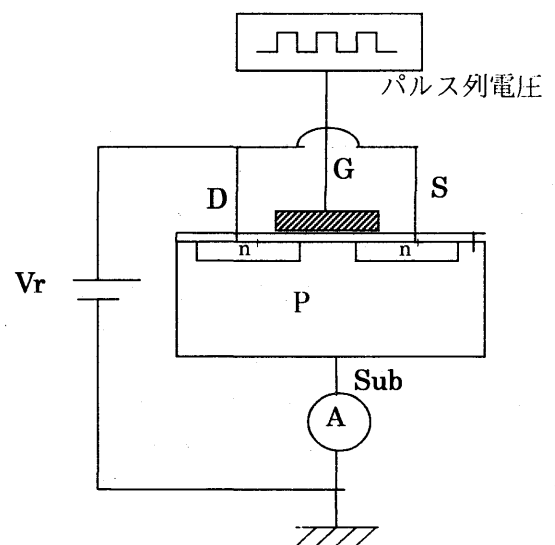
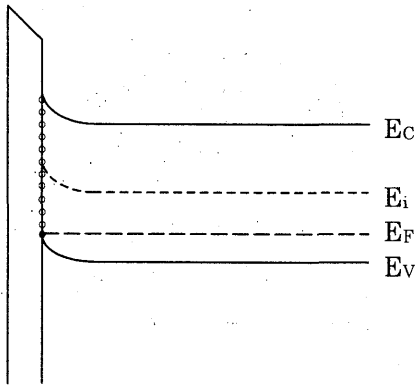
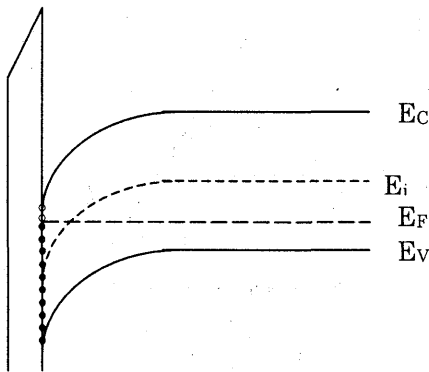


図1 MOSFETのチャージポンピング電流測定方法
Fig. 1 Measurement method for charge-pumping currents of MOSFET



(a) 蓄積状態
(a) Accumulation



(b) 反転状態
(b) Inversion

図2 MOS構造の各状態でのエネルギーバンド図と界面準位

Fig. 2 Energy band diagrams and interface states of MOS structure

の最小電圧と最大電圧は、MOS構造の蓄積状態と反転状態に相当する電圧とする。MOSFETが蓄積状態と反転状態を繰り返すときに起きる現象を考察する。蓄積状態では、図2(a)に示すようにフェルミレベルは価電子帯の頂上 E_v の近く、すなわち禁制帯中の下の方にあるので、ほとんどの界面準位は空である。この状態から反転状態にすると、フェルミレベルは禁制帯中の上の方になるので、今まで空であった界面準位は電子で満たされることになる。この電子はソース、ドレインの電子が反転状態になったチャンネル部分に移動したのから供給される。すなわち、図2(b)の伝導帯の電子、すなわちソース、ドレインの電子が界面準位にトラップされて、界面準位は電子で満たされることになる。次に、また蓄積状態にもどると、界面準位はトラップしていた電子を放出することになるが、これは、価電子帯の正孔との再結合によりなされる。すなわち、蓄積状態になっているので、価電子帯には正孔が多数存在するが、この正孔を界面準位がトラップすることにより空になる。パルスの

一周期の間に、ソース、ドレインからは電子が界面準位に移動し、価電子帯、すなわち基板からは正孔が界面準位に移動することになる。すなわち、電流が界面準位を介して基板からソース、ドレインに流れることになる。これがチャージポンピング電流である。通常、基板電流 I_{sub} を測定する。また、この電流測定は直流電流計で行うので、平均値、すなわち1秒間に移動する電荷量を測定することになる。

一周期の間に移動する電荷量 Q_{SS} は次式となる。

$$Q_{SS} = S \cdot q \int D_{it}(E) dE \quad (1)$$

ここで、 S はMOSFETのチャンネル領域の面積、 $D_{it}(E)$ は界面準位密度であり、禁制帯中でのエネルギー E の関数となる。すなわち、一般的には、禁制帯中の位置により界面準位密度は異なる。なお、(1)式の積分はフェルミレベルが動くエネルギー範囲内で行う。(1)式に示すように Q_{SS} には D_{it} の積分値が効果をおよぼす。

D_{it} の平均値を $\overline{D_{it}}$ とすれば、(1)式は次のようになる。

$$Q_{SS} = S \cdot q \cdot \overline{D_{it}} \cdot (q \Delta \phi_s) \quad (2)$$

ここで、 $\Delta \phi_s$ はチャージポンピング電流に寄与する表面ポテンシャルの幅である。従って、 $q \Delta \phi_s$ がチャージポンピング電流に寄与する界面準位のエネルギーの幅となる。測定の際には、周波数 f のパルス列を印加するので、チャージポンピング電流 I_{cp} は

$$I_{cp} = f Q_{SS} = f \cdot S \cdot q \cdot \overline{D_{it}} \cdot (q \Delta \phi_s) \quad (3)$$

となり、 $q \Delta \phi_s$ がわかれば(3)式より直接 $\overline{D_{it}}$ を求めることができる。今まで述べたように、伝導帯からトラップした電子をすべて価電子帯に放出する(価電子帯からの正孔と再結合する)とすれば、 $q \Delta \phi_s$ の値は、フェルミレベルが走査するエネルギー幅なので、概略の値を見積もることができる。ゲート電圧と表面ポテンシャルの関係は、厳密には容量測定等から求めなければならないが、界面準位密度の値の評価がそれほどの精度を要求されない場合は、簡単にある値を仮定することができる。それは、大きく見積もって、エネルギーギャップの値の1.1 eVであり、小さく見積もって $2 q \phi_B$ である。ここで、 ϕ_B はバルク中での真性フェルミポテンシャルを基準としたフェルミポテンシャルの値である。しかし、後に述べるように、伝導帯からの電子をすべて価電子帯に放出するわけではないので、さらに詳しい考察が必要である。

2. 3 測定システム

パソコンで測定機器を制御し、チャージポンピング電

流の種々の測定条件依存性を自動的に測定するシステムを構築した。測定ウェーハは試料台上に設置し、プローブでウェーハの電極部分を測定機器に接続する。直流電圧の印加と直流電流の測定は、半導体パラメータアナライザHP 4145Bを用い、パルス列電圧の印加には、ファンクションジェネレーターHP 33120Aを用いた。測定機器の制御とデータ収集はGPIBにより行っている。測定プログラムはBASIC (HPBASIC) で記述した。HPBASICは、ヒューレットパッカード社により提供されている言語で、ほぼ通常のBASICであるが、測定機器の制御の面が充実している言語である。このプログラムはウィンドウズ環境下で動作し、MSDOSファイルを扱うことができる。そのため、測定データはテキストファイルに出力でき、エクセルで読み込めば、データ処理、グラフ化が容易にできる。

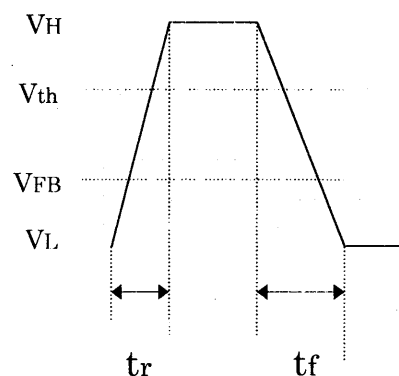
3. 測定結果

3.1 測定試料と測定方法

本報告で測定した試料は、nチャンネルMOSFETで、ゲート酸化膜厚は35Åである、 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ と $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の2種類のチャンネル不純物濃度を持つMOSFETを測定した。しきい値電圧は、チャンネル不純物濃度の低い方が0.2V、高い方が0.5Vである。これら2種類のしきい値電圧のMOSFETは同じウェーハ内に製作されており、チャンネルドープのイオン注入の注入量を調整することにより製作している。チャンネル幅は50μm、チャンネル長は1.5μmのMOSFETを測定した。ソース、ドレインへの印加電圧は0Vとし、ゲートに印加するパルス列は、図3に示すような方形波あるいは三角波とした。方形波の立ち上がり時間を t_r 、立ち下がり時間を t_f とする。また、三角波においては、立ち上がり時間の周期に対する割合を α とすると、立ち上がり時間は α/f 、立ち下り時間は $(1-\alpha)/f$ となる。パルスの最大電圧を V_H 、最小電圧を V_L とすると、通常は図3に示すように、 V_H はしきい値電圧 V_{th} より十分大きく、 V_L は V_{FB} より十分小さくして測定した。なお、パルス幅依存性の測定においては、 V_L を固定し V_H を変化させた測定、および V_H を固定し V_L を変化させた測定を行った。

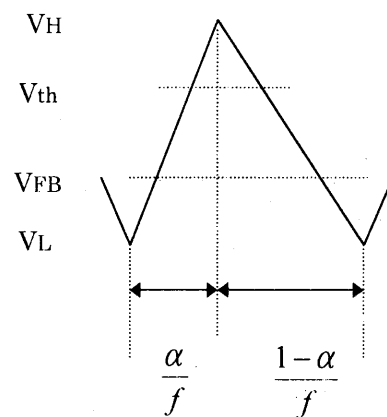
3.2 パルス振幅依存性

周波数100kHzの方形波で、パルスの最小電圧値 $V_L = -1.5\text{V}$ と固定し、パルスの最大電圧値 V_H を変化させたときのチャージポンピング電流の変化を図4に示す。●印がしきい値電圧0.2Vのもの、■印がしきい値電圧0.5Vのものに対する結果である。フラットバンド電圧は-1Vと見積もられる。従って、 V_L の値は



(a) 方形波

(a) Square pulse



(b) 三角波

(b) Triangular pulse

図3 チャージポンピング電流測定に用いたパルス列電圧

Fig. 3 Pulse trains for charge-pumping current measurement

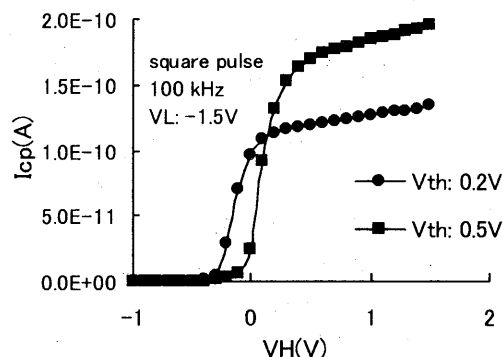


図4 パルスの最大電圧を変化させたときのチャージポンピング電流の変化

Fig. 4 Dependence of charge-pumping current on maximum voltage of pulses

十分蓄積状態である。図に示すように、チャージポンピング電流 I_{cp} はしきい値電圧が 0.2 V の場合は、 V_H が -0.3 V 付近から増大し始め、0.1 V 付近を超えると飽和の傾向を示す。しかし、完全には飽和せず、 V_H の増大とともに徐々に増大する。しきい値電圧が 0.5 V の MOSFET の場合は、-0.2 V 付近から増大し始め、0.4 V 付近から飽和の傾向を示す。飽和の傾向を示し始める電圧は、いずれもしきい値電圧より 0.1 V 程度低い。また、増大し始める電圧はしきい値電圧が高い方が 0.1 V 程度大きい。この結果から (3) 式を用いておよその界面準位密度を求めることができる。

$q \Delta \phi_s$ として $2q \phi_B$ を使うと、しきい値電圧が 0.2 V のものは 0.81 eV 、しきい値電圧が 0.5 V のものは 0.90 eV となり、 I_{cp} の値として例えば 1.0 V のときの値を使うと、 $\overline{D_{it}} = 1.3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ ($V_{th} = 0.2 \text{ V}$)、 $1.7 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ ($V_{th} = 0.5 \text{ V}$) となる。これらの値は、十分小さい値であり、デバイスとして問題ないものであることがわかる。 I_{cp} が完全には飽和しないで、徐々に増大することについては後で議論する。 V_H を固定し、 V_L を変えた場合の I_{cp} の変化を図 5 に示す。●印がしきい値電圧

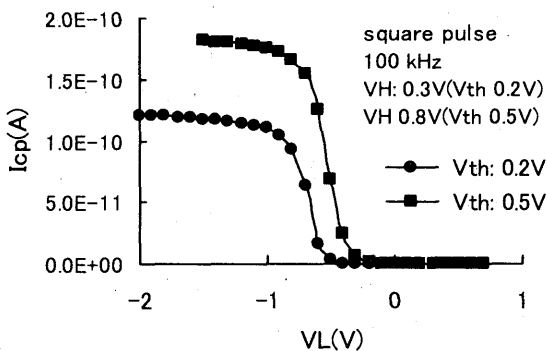


図 5 パルスの最小電圧を変化させたときのチャージポンピング電流の変化
Fig. 5 Dependence of charge-pumping current on minimum voltage of pulses

0.2 V のもので、 V_H を 0.3 V、■印がしきい値電圧 0.5 V のもので、 V_H を 0.8 V とした。しきい値電圧 0.2 V の MOSFET は V_L が -0.5 V 付近から増大し始め、-0.9 V 程度より小さくなると飽和の傾向を示す。しきい値電圧 0.5 V の MOSFET は V_L が -0.2 V 付近から増大し始め、-0.8 V 程度で飽和の傾向を示す。飽和の傾向を示す電圧は V_{FB} よりやや大きい電圧で、しきい値電圧が大きいものの方がやや高い電圧になっている。また、この場合も完全には飽和せず、徐々

に増大している。

3. 3 パルス波形による違い

図 6 にパルス波形によるチャージポンピング電流の違いを示す。これは、 I_{cp} の V_H 依存性を示したもので、しきい値電圧 0.2 V の MOSFET で $V_L = -1.5 \text{ V}$ としたものである。測定周波数は 135 kHz である。●が方形波に対する結果、■が α が 0.5 の三角波に対する結果である。図から、パルス波形によりチャージポンピング電流の値に違いがあり、方形波の方が三角波より 6 割程度大きいことがわかる。2.2 での議論ではパルス波形については言及しておらず、この原因は後で考察する。

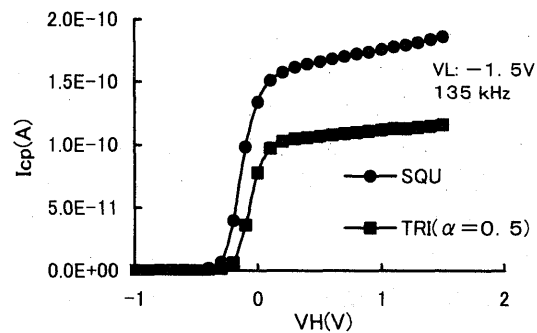


図 6 パルス波形によるチャージポンピング電流の違い
Fig. 6 Influence of pulse shape on charge-pumping current

3. 4 周波数依存性

図 7 にしきい値電圧 0.2 V の MOSFET の I_{cp} の周波数依存性を示す。●が方形波、■が α が 0.5 の三角波に対する結果である。 $V_L = -1.5 \text{ V}$ 、 $V_H =$

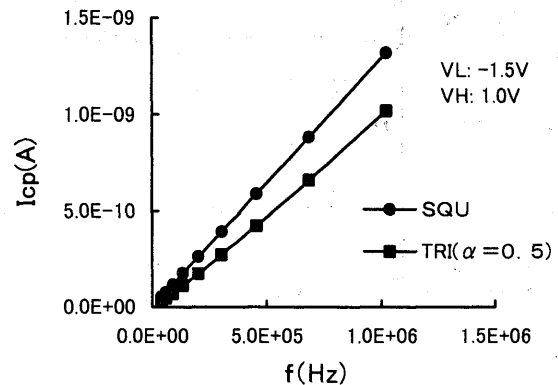


図 7 チャージポンピング電流の周波数依存性
Fig. 7 Dependence of charge-pumping currents on pulse frequency

1. 0 Vである。どちらの波形に対しても、 I_{cp} は周波数にほぼ比例していることがわかる。しかし、厳密に考察すると、三角波の場合は正確には比例していない。これについても後で考察する。

3. 5 チャージポンピング効果の詳細な機構

以上の測定結果に示すように、2. 2で述べたチャージポンピング効果の機構では、実験結果を正確に説明することができない。ここでは、さらに詳細な機構について述べる。

2. 2では、伝導帯から界面準位にトラップされた電子はすべて価電子帯からの正孔と再結合し、チャージポンピング電流に寄与すると考えたが、実際はそうではない。伝導帯から界面準位にトラップされた電子の内、また伝導帯に戻るものもあり、その逆に価電子帯からトラップされた正孔の内、また価電子帯に戻るものもある。このように、パルスの一周期の間に同じ所へ戻るものは、チャージポンピング電流には寄与しない。以上のことを表したのが図8である。蓄積状態から空乏状態を経て反転状態になるようにゲート電圧が変化した場合を考える。これは、パルスの立ち上がりに相当する。このとき、界面の禁制帯中をフェルミレベルは下から上へ時間とともに動くことになる。蓄積状態からフラットバンド付近、すなわち、図8の①の領域では、界面準位が価電子帯と正孔のやりとりをする際、平衡状態が保たれる。すなわち、ゲート電圧が速く変化しても、フェルミレベルより下の界面準位には電子が存在し、上の準位は空であるという状態が実現される。フェルミレベルが価電子帯の近くから上に動くので、界面準位から価電子帯に正孔が放出される。フラットバンドを過ぎて空乏状態になると、

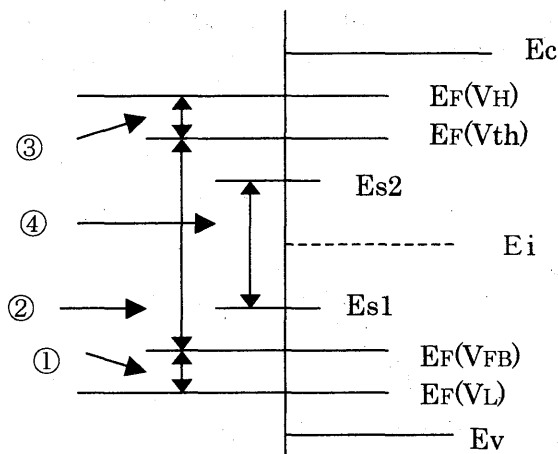


図8 界面準位の電荷のやりとりと種々の状態でのフェルミレベル

Fig. 8 Trapping and emission of carriers by interface states and Fermi levels

界面準位から価電子帯への正孔の放出に時間がかかるようになるため、平衡状態を保てなくなり、非平衡状態となる。すなわち、フェルミレベルより下の界面準位でも空のままのものが存在するようになる。電子で満たされている一番上の界面準位を E_s とすれば、 $E_s < E_F$ となる。さらにゲート電圧が高くなり反転状態になると、伝導帯にはソース、ドレインから電子が移動してきて、電子濃度が高くなる。すると、非平衡状態にある準位は、伝導帯から電子をトラップし始める。そして、強く反転した状態、すなわち表面電位が $2\phi_B$ になると、電子濃度が高くなるので、非平衡状態にある準位に急激に電子がトラップされ、平衡状態となる。急激に電子がトラップされ始めるときの E_s を E_{s1} とすれば、 E_{s1} より下の準位は価電子帯に正孔を放出することにより電子を持ち、 E_{s1} より上の準位は伝導帯から電子をトラップすることにより電子を持つということになる。さらにゲート電圧が高くなると、平衡状態を保ったままフェルミレベルは伝導帯に近づく。これがパルスの立ち上がりに相当する現象である。次に、パルスの立ち下がりについて考察する。立ち上がりとはほぼ同様なことが起きる。フェルミレベルは上から下に下がってくるが、 $2\phi_B$ に相当するエネルギーレベルまでは、平衡状態を保ったまま界面準位は電子を伝導帯に放出する。これは図の③に相当する。その後は伝導帯への電子の放出に時間がかかるようになり、非平衡状態となる。そして、立ち上がりのときとは逆に $E_s > E_F$ となる。そして、空乏状態を経てフラットバンド状態になると、急激に、非平衡状態にある準位は、価電子帯から正孔をトラップすることにより電子を失う。このときの E_s を E_{s2} とすれば、 E_{s2} より上の準位は伝導帯に電子を放出し、下の準位は価電子帯から正孔をトラップすることになる。以上のパルスの一周期のふるまいを考えると、 E_{s1} より下の準位は、価電子帯から正孔をトラップし、価電子帯に正孔を放出する。 E_{s2} より上の準位は、伝導帯から電子をトラップし、伝導帯に電子を放出する。すなわち、これら2つの領域の界面準位はチャージポンピング電流に寄与しない。 E_{s1} と E_{s2} の間の準位は、伝導帯から電子をトラップし、価電子帯から正孔をトラップする。すなわち、この間の界面準位、すなわち図の④の領域の界面準位のみがチャージポンピング電流に寄与することになる。 E_{s1} の位置はパルスの立ち上がりの速さに関係し、 E_{s2} の位置は立ち下がり速さに関係するので、チャージポンピングに寄与するエネルギー幅はパルスの立ち上がり、立ち下がり速さに依存することになる。すなわち、チャージポンピング電流の値がパルスの立ち上がり、立ち下がり速さに依存することになる。これが、パルスの波形によりチャージポンピング電流の値が異なる理由である。

次に、以上の機構を定量的に扱う。通常のチャージポ

ンピング電流測定の場合は、 E_{s1} 、 E_{s2} は次式で表される。

$$E_i - E_{s1} = kT \cdot \ln \left(\frac{1}{v_{th} \cdot \sigma_p \cdot n_i \cdot t_1} \right) \quad (4)$$

$$E_{s2} - E_i = kT \cdot \ln \left(\frac{1}{v_{th} \cdot \sigma_n \cdot n_i \cdot t_2} \right) \quad (5)$$

ここで、 v_{th} はキャリアの熱速度、 σ_p は正孔の捕獲断面積、 σ_n は電子の捕獲断面積、 n_i は真性キャリア濃度、 t_1 は正孔の放出が非平衡である時間、 t_2 は電子の放出が非平衡である時間である。

従って、チャージポンピング電流に寄与する界面準位のエネルギー幅は次式となる。

$$E_{s2} - E_{s1} = 2kT \cdot \ln \left(\frac{1}{v_{th} \cdot \sqrt{\sigma_n \sigma_p} \cdot \sqrt{t_1 t_2}} \right) \quad (6)$$

立ち上がり時間が t_r 、立ち下がり時間が t_f の方形波パルスの場合、 t_1 、 t_2 は次式で与えられる。

$$t_1 = \frac{V_{th} - V_{FB}}{V_H - V_L} \cdot t_r \quad (7)$$

$$t_2 = \frac{V_{th} - V_{FB}}{V_H - V_L} \cdot t_f \quad (8)$$

また、立ち上がり時間の割合が α で周波数 f の三角波の場合、 t_1 、 t_2 は次式となる。

$$t_1 = \frac{V_{th} - V_{FB}}{V_H - V_L} \cdot \frac{\alpha}{f} \quad (9)$$

$$t_2 = \frac{V_{th} - V_{FB}}{V_H - V_L} \cdot \frac{1 - \alpha}{f} \quad (10)$$

以上の式から、方形波および三角波に対するチャージポンピング電流は次のように表される。

方形波

$$I_{cp} = 2q \overline{D_{it}} \cdot f \cdot S \cdot kT \cdot \ln \left(\frac{1}{v_{th} \cdot n_i \cdot \sqrt{\sigma_n \sigma_p}} \cdot \frac{V_H - V_L}{V_{th} - V_{FB}} \cdot \frac{1}{\sqrt{t_f t_r}} \right) \quad (11)$$

三角波

$$I_{cp} = 2q \overline{D_{it}} \cdot f \cdot S \cdot kT \cdot \ln \left(\frac{1}{v_{th} \cdot n_i \cdot \sqrt{\sigma_n \sigma_p}} \cdot \frac{V_H - V_L}{V_{th} - V_{FB}} \cdot \frac{f}{\sqrt{\alpha(1-\alpha)}} \right) \quad (12)$$

これらの式からわかるように、方形波では I_{cp} は周波数 f に比例するが、三角波では比例しない。これは、方形波ではパルスの立ち上がり時間と立ち下がり時間が f に無関係に一定であるが、三角波では、それらが f に依存するからである。

(12)式から、三角波の場合の Q_{ss} 、すなわち I_{cp}/f は次式となる。

$$Q_{ss} = I_{cp}/f = 2q \overline{D_{it}} \cdot S \cdot kT \cdot \ln \left(\frac{1}{v_{th} \cdot n_i \cdot \sqrt{\sigma_n \sigma_p}} \cdot \frac{V_H - V_L}{V_{th} - V_{FB}} \cdot \frac{f}{\sqrt{\alpha(1-\alpha)}} \right) \quad (13)$$

この式から、三角波の場合には、 I_{cp}/f と $\log(f)$ をプロットすれば直線が得られ、その傾きから界面準位

密度の平均値 $\overline{D_{it}}$ が、 f 軸との切片から捕獲断面積の平

均値 $\sqrt{\sigma_n \sigma_p}$ が得られることがわかる。種々の α の三角

波に対する測定結果に以上の解析を行った結果を図9に示す。これは、しきい値電圧0.2VのMOSFETで、 $V_L = -1.5V$ 、 $V_H = 1.0V$ で測定したものであり、縦軸は Q_{ss} 、横軸は f を対数目盛りで示す。このように直線関係が得られている。 $v_{th} = 1.55 \times 10^7 \text{ cm/s}$ 、 $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 、 $V_{th} = 0.2V$ 、 $V_{FB} = -1.0V$ 、 $V_H = 1.0V$ 、 $V_L = -1.5V$ という値を使って、図9に示す結果から界面準位密度と捕獲断面積を求めた結果を表1に示す。表1に示すように、どの α

に対しても、 $\overline{D_{it}} = 1.4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ という値

が得られた。捕獲断面積の値は $1.4 \sim 1.9 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ という値が得られ、特に、 α が 0.15 と小さいとき、他のものよりやや大きい値が得られた。

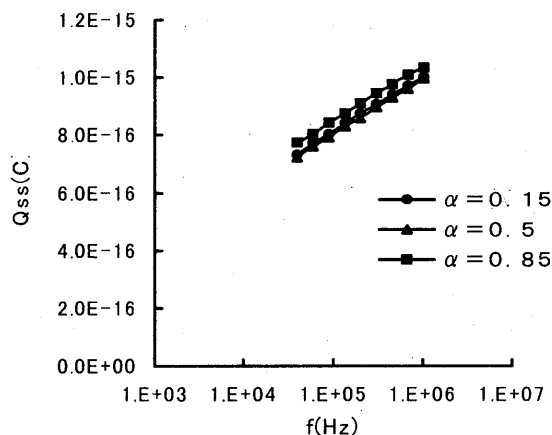


図9 三角波の Q_{ss} と周波数の関係
Fig. 9 Relationship between Q_{ss} and frequency for triangular pulses

表1 図9の結果から求めた界面準位密度と捕獲断面積
Table 1 Interface state densities and capture cross sections obtained from Fig. 9

α	$\overline{D_{it}}$ ($\text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$)	$\sqrt{\sigma_n \sigma_p}$ (cm^2)
0.15	1.4×10^{10}	1.9×10^{-16}
0.5	1.4×10^{10}	1.5×10^{-16}
0.85	1.4×10^{10}	1.4×10^{-16}

3.6 振幅依存性とパルス波形依存性

3.2, 3.3で述べたチャージポンピング電流の振幅依存性およびパルス波形依存性の実験結果について考察する。 I_{cp} の V_H 依存性の結果に示すように、 I_{cp} は V_H が V_{th} を超えるとほぼ飽和の領域になるが、 V_H の増大とともに徐々に増大する。これは、(9), (10)式に示すように、 V_H が大きくなると、 t_1 , t_2 が小さくなるためであり、 I_{cp} の V_H 依存性は (11), (12)式で与えられる。上記で求めた界面準位密度と捕獲断面積の値を用いて (11) 式と (12) 式を計算した。なお、捕獲断面積の値は $\alpha = 0.5$ のときのものを用いた。 $\alpha = 0.5$ の三角波と方形波について I_{cp} の計算値と測

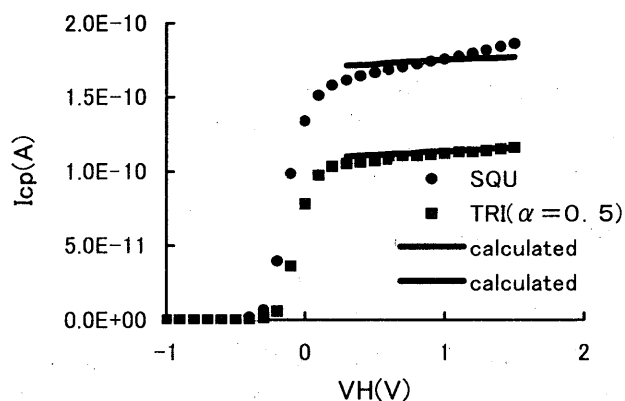


図10 I_{cp} の V_H 依存性の計算値と実験値の比較
Fig. 10 Comparison of calculated values and experimental results for I_{cp}

定値の比較を図10に示す。周波数は 135 kHz 、 $V_L = -1.5 \text{ V}$ 、 $V_{th} = 0.2 \text{ V}$ であり、方形波の立ち上がり時間 t_r と立ち下り時間 t_f は、いずれも 20 ns である。●が方形波の測定値、■が三角波の測定値、実線がそれぞれの計算値である。図に示すように、三角波では測定値と計算値はよく一致しており、周波数依存性の測定結果から導出したパラメータを使って、振幅依存性の測定結果を説明できることがわかる。すなわち、振幅が増大するとチャージポンピング電流が徐々に増大するのは、(9), (10)式に示すように、 t_1 , t_2 が小さくなるためである。一方、方形波では三角波よりチャージポンピング電流の値が6割程度大きくなるという結果は説明できているが、 V_H 依存性が測定値の方が計算値より大きくなっている。測定値は方形波の方が三角波より V_H 依存性が大きい、(11), (12)式では、波形にかかわらず V_H 依存性は同じである。すなわち、ここで述べたモデルでは、波形の違いによる振幅依存性の違いは説明できず、さらなる検討が必要である。

4. まとめ

MOS構造の界面準位密度の評価法を確立するため、チャージポンピング法による界面準位密度の測定について検討した。チャージポンピング法とは、MOSFETのゲート電極にパルス列電圧を印加し、界面準位を介して流れる基板電流を測定する方法であり、不純物濃度分布にほとんど依存しないで界面準位密度を測定できるという特長がある。ゲート酸化膜厚 35 \AA のMOSFETを用いて、パルス列電圧の振幅、周波数、波形によるチャージポンピング電流の違いを測定した。その結果、パルスが蓄積と反転を完全に含むようになると、チャージ

ポンピング電流は飽和の傾向を示すが、完全には飽和しないで徐々に増大することがわかった。また、方形波の方が三角波よりもチャージポンピング電流の値が大きくなることを明らかにした。これらの結果は、チャージポンピング電流に寄与する界面準位のエネルギーレベルの範囲が、パルスの立ち上がりおよび立ち下りの速さに依存するためであることを明らかにし、正確に界面準位密度と捕獲断面積の値を求めることができた。

参考文献

- [1] M. Kuhn, "A quasi-static technique for MOS C-V and surface state measurements," *Solid-state Electron.*, **13**, 873(1970)
- [2] G. Groeseneken, H. E. Maes, N. Nicolas, and R. F. DeKeersmaecker, "A reliable approach to charge-pumping measurements in MOS transistors," *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-31**, 42(1984)