

# スプリットゲートによる極微細 SOI-MOS におけるコンダクタンス振動現象

Conductance Oscillations in a Very Small Channel SOI-MOSFET with a Split-gate

石黒仁揮\*・平本俊郎\*・生駒俊明\*\*

Hiroki ISHIKURO, Toshiro HIRAMOTO and Toshiaki IKOMA

## 概 要

Si 極微細構造における電気伝導を解明するため、Si 極微細 MOS 構造を作製しその電気特性の測定を行っている。SOI (Silicon On Insulator) 基板上に電子ビーム露光およびリフトオフによりスプリットゲートを作製し、静電的に電子の伝導チャンネルを細線領域に閉じ込めることで極微細 MOS 構造を実現した。4.2 K 以下の測定でピンチオフ電圧付近のコンダクタンスに振動が観測された。フーリエスペクトルからコンダクタンス振動は、周期的成分および非周期的成分から形成されていることが分かった。また、ドレインソース間の電流-電圧特性には非線形性が観測された。これらの現象は電気伝導がクーロンブロケードによる単一電子トンネル、およびホッピング伝導に支配されていることを示すものだと考えられる。

## 1. はじめに

Si-ULSI 技術の発達に伴い、LSI を構成するデバイスのサイズは既に  $0.5\mu\text{m}$  を切っており、研究レベルではゲート長が  $0.05\mu\text{m}$  を切る超短チャンネル MOSFET も報告されている<sup>1)</sup>。今後、さらに LSI の集積度が上昇しデバイスの微細化が進むと、デバイス形状や不純物分布の揺らぎに伴うデバイス特性のばらつきが問題になってくる。また電子の波動性や粒子性に起因する量子効果や単一電子効果が現れ、デバイス特性に影響を与える可能性も生じてくる。一方、Si 微細構造中で出現する量子効果や単一電子効果を積極的に応用することで、新しい機能を有するデバイスが考案されることも期待できる。これらの理由から、Si 微細構造中における電気伝導特性を解明することは、今後の Si-ULSI で生じる問題に対応するためにも、また新た

な概念を有するデバイス実現のための手がかりをつかむためにも、今後非常に重要になるものと考えられる。今日まで量子効果や単一電子効果については GaAs 等化合物半導体を用いて数多くの研究がなされてきた<sup>2)-4)</sup>が、実用上有用な Si を用いた研究は、その低移動度あるいはヘテロエピタキシャル成長が困難であるという理由から十分になされてきたとは言い難い。

本研究室では Si 微細 MOSFET 構造における電気伝導特性を解明することを目的に、実際にデバイスを作製し極低温における電気特性を測定している。今回、4.2 K 以下の測定でスプリットゲート極微細 MOSFET 構造中におけるコンダクタンスに、クーロンブロケード現象およびホッピング伝導に起因すると考えられる振動が観測されたので報告する。

## 2. 素子作製プロセス

今回作製した素子のスプリットゲート部における断面図および上面図をそれぞれ図 1、図 2 に示す。基板には SOI の一種である SIMOX (Separation by IMplanted OXYgen) 基板を用いた。SOI 層をメサエッチングすることで素子分離されている。この素子は上下二つのゲートを持つ二重ゲート構造となっている。下部ゲートはスプリットゲート (SG) である。スプリットゲートの隙間に非常に細い電子伝導チャンネルが形成される。上部ゲートはキャリア密度変調用 Al ゲート (UG) である。スプリットゲートのバイアスを変化させることで電子伝導チャンネルの幅と電子密度を変えることができる。また上部 Al ゲートのバイアスを変化させることで、チャンネル部の電子密度を変えることができる。このように二重ゲート構造を用いることでチャンネルの線幅とキャリア密度を独立に変化させることができる。

Si 極微細 MOSFET 構造の作製プロセスを以下に示す。

\*東京大学生産技術研究所 第3部

\*\*T.I. 筑波研究開発センター

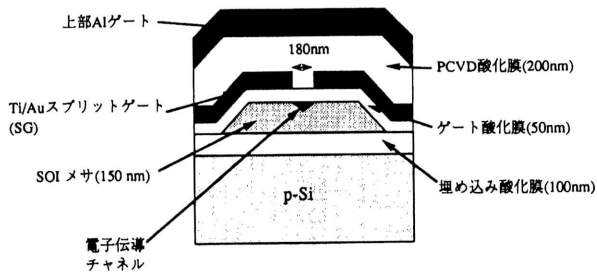


図1 スプリットゲート MOS 構造の断面図

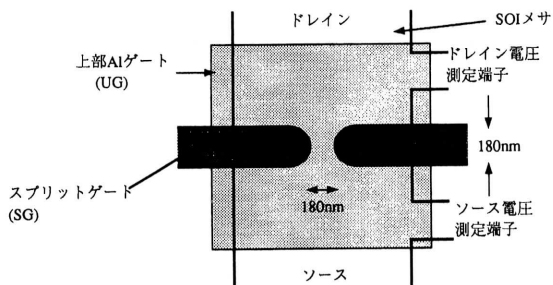


図2 スプリットゲート MOS 構造の上面図

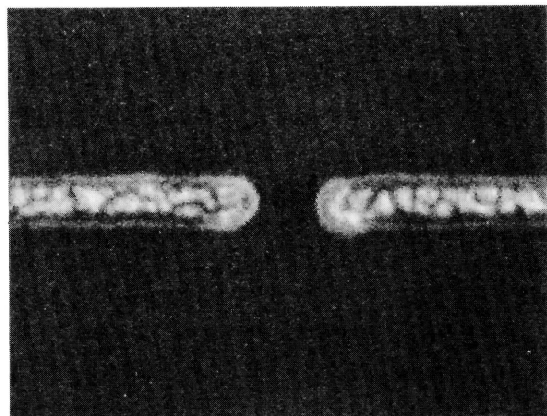


図3 スプリットゲートの SEM 写真

まず、MOS 構造のフィールド部を RIE にてメサエッチングを施すことにより形成し素子分離を行った。その後ソースおよびドレインに  $P^+$  を  $40 \text{ keV}$  で  $1.0 \times 10^{15} / \text{cm}^2$  の濃度でイオン注入した。次に、 $1000^\circ\text{C}$  の熱酸化により  $50 \text{ nm}$  のゲート酸化膜を付けた。微細加工を要するスプリットゲートは、電子ビームで PMMA レジストを露光後、Ti/Au の蒸着およびリフトオフにより作製した。図3は今回作製した素子と同一条件で作製したスプリットゲートを真上から撮った SEM 写真である。図3よりゲート間の隙間およびゲート長はそれぞれ  $180 \text{ nm}$  である。その後、PCVD により酸化膜を  $200 \text{ nm}$  堆積し、その上にキャリア

密度変調用の Al ゲートを蒸着した。

実験では、 $^4\text{He}$  クライオスタットを使用して  $1.5 \text{ K} \sim 4.2 \text{ K}$  まで素子を冷却し、そのコンダクタンスを HP4156A (半導体パラメータアナライザ) を用いて直流 4 端子で測定した。

### 3. 測定および結果

#### 3.1 コンダクタンスのスプリットゲート電圧依存性

図4に、作製したスプリットゲート極微細 MOSFET 構造のコンダクタンスのスプリットゲート電圧 ( $V_{sg}$ ) 依存性を示す。

ドレイン-ソース間電圧  $V_{ds} = 5 \text{ mV}$ 、上部 Al ゲート電圧  $V_{ug} = 1.0 \text{ V}$  であり、 $V_{sg}$  を  $1 \text{ V} \sim -2 \text{ V}$  までゆっくり走査して測定を行った。温度は  $1.5 \text{ K}$ 、 $2.2 \text{ K}$ 、 $3.0 \text{ K}$ 、 $4.2 \text{ K}$  の 4 点に固定して測定した。各温度での比較を容易にするため、コンダクタンスの値を  $V_{sg} = 1.0 \text{ V}$  における値で正規化してあり、各曲線にオフセットを  $0.25$  ずつ加えて表示してある。

グラフから、 $1.5 \text{ K}$  においてコンダクタンスにはっきり振動が現れており、コンダクタンス振動が温度とともに減少しているのが分かる。コンダクタンス振動は温度を  $4.2 \text{ K}$  以下に保っている限り再現性があったが、一度室温に上げ再び  $4.2 \text{ K}$  に戻すと振動の形は変化した。 $1.5 \text{ K}$  におけるコンダクタンス振動の電圧周期を調べるため、そのフーリエ変換を行った。

図5は  $1.5 \text{ K}$  におけるコンダクタンス振動のフーリエ成分である。直流成分を差し引いて表示してある。このグラフから  $\Delta V_{sg} = 123 \text{ mV}$  にはっきりとピークが存在するのがわかる。これは、コンダクタンス振動が非周期的な揺ら

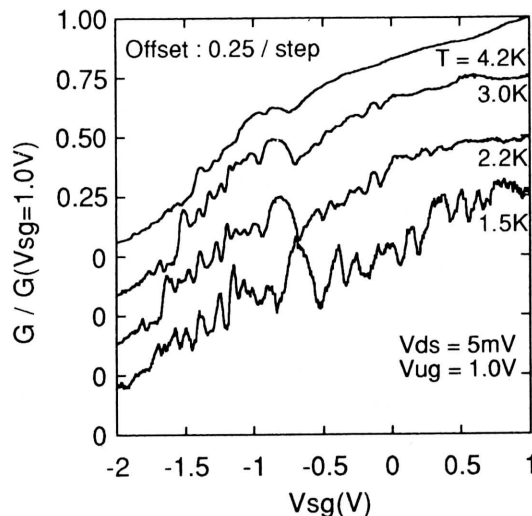


図4 コンダクタンスのスプリットゲート電圧依存性

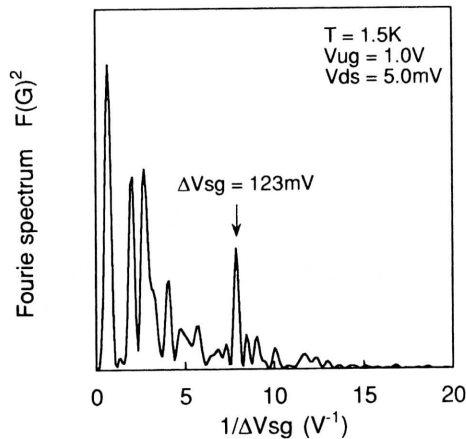


図5 コンダクタンス振動のフーリエ成分

ぎに加え,  $\Delta V_{sg} = 123 \text{ mV}$  の周期的成分を含んでいることを示している。

### 3.2 ドレインソース間電流・電圧特性

図6は二つのゲートバイアスを固定したときのドレインソース間の電流 ( $I_{ds}$ ) - 電圧 ( $V_{ds}$ ) 特性である.  $V_{ug} = 1.0 \text{ V}$  でスプリットゲート電圧は,  $V_{sg} = -0.4, -0.5, -0.7, -0.9 \text{ V}$  の4点に固定して測定した. 測定温度は  $1.5 \text{ K}$  である. またグラフ中の挿入図は  $1.5 \text{ K}$ ,  $V_{ug} = 1.0 \text{ V}$  におけるコンダクタンス振動の  $V_{sg}$  依存性である. コンダクタンス振動のピークに対応する  $V_{sg} = -0.5 \text{ V}$  のとき,  $I_{ds}$ - $V_{ds}$  はオーミックな特性を示しているが, コンダクタンス振動の谷に対応する  $V_{sg} = -0.4, -0.7, -0.9 \text{ V}$  では特性に非線形性が生じている. この時,  $|V_{ds}| < 2 \text{ mV}$  では電流がほとんど流れないが,  $|V_{ds}| > 2 \text{ mV}$  で電流が急激に流れ始めている.

## 4. 考 察

今回の測定では, Si 極微細 MOSFET 構造においてコンダクタンスのスプリットゲート電圧依存性に振動が観測された. このような微細構造においてコンダクタンスに揺らぎが生じる原因としては,

- (1) 電子の1次元状態密度を反映したコンダクタンスの変化 (コンダクタンスの量子化等)<sup>2), 5)</sup>
- (2) 普遍コンダクタンス揺らぎ<sup>6) ~ 8)</sup>
- (3) 不純物準位を介した電子のホッピング伝導<sup>9)</sup>
- (4) ポテンシャル揺らぎの結果生じるクーロンブローケード現象<sup>3), 4), 10)</sup>

などが報告されている.

(1) や (2) は電子濃度の大きなメタリックな伝導状態において観測されるものである. ところが今回のコン

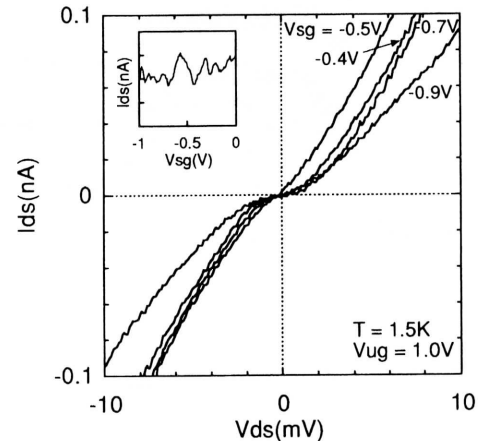


図6 ソースドレイン間の電流電圧特性

ダクタンス振動はピンチオフ電圧付近でのみ観測され, コンダクタンスの値は数  $\mu\text{S}$  であり量子化コンダクタンス ( $4e^2/h = 155 \mu\text{S}$ ) に比べ非常に小さい. 従ってこの状態ではチャンネルがほぼ空乏しており, コンダクタンスの値から計算したチャンネル中の伝導電子の数は10数個と見積もられ, 電子はコンダクションバンドの端に局在していると考えられる. また, 図6からコンダクタンスの谷の部分で非線形な  $I_{ds}$ - $V_{ds}$  特性が観測されていることを考えると, (1) のコンダクタンスの量子化および, (2) の普遍コンダクタンス揺らぎが原因ではないと考えられる.

電子が局在している状態での, コンダクタンス揺らぎの原因としては (3), (4) が考えられる. (3) のホッピング伝導によればポテンシャル障壁中に界面準位等の局在準位が存在すると, フェルミレベル近傍の電子はその準位を介してソースからドレインに移ることができる. コンダクタンスは局在準位のエネルギーレベルを反映するため, スプリットゲート電圧 (フェルミレベル) に対して非周期的に振動する<sup>9)</sup>. 一方, (4) のクーロンブローケードの理論では, チャンネル中に電子を閉じ込める微小なドットが形成されると, 閉じ込められた電子のクーロン反発力により他の電子の伝導を妨げる現象が起きる. この現象ではコンダクタンスはゲート電圧に対して周期的に振動し, コンダクタンス振動の谷の部分で非線形な  $I_{ds}$ - $V_{ds}$  特性が生じる<sup>11), 12)</sup>.

今回の測定で観測されたコンダクタンス振動の非周期的成分はホッピング伝導に, 周期的成分はクーロンブローケード現象に起因しているものと考えられる.

以下にチャンネル中の伝導メカニズムについて考察する. スプリットゲート間の細いチャンネル部には, 不純物や Si/SiO<sub>2</sub> 界面電荷が存在しポテンシャルの揺らぎが発生する. 一方チャンネル中に存在する電子の数は, 10数個のオーダー

である。電子はポテンシャルの揺らぎによって進行を妨げられ、いくつかの細いパスを通して流れているものと考えられる。このような状況のもとでは、ピンチオフ電圧付近において電子がポテンシャル揺らぎによってドットに閉じ込められるという現象が起こりうる。ドットとドットの間にはポテンシャルバリアが存在し両者は容量で結ばれている。ドットサイズが極めて小さい場合には、電気伝導特性にクーロンブロケード現象が現れる<sup>3), 10)</sup>。

コンダクタンス振動の周期成分がクーロンブロケード現象に起因していると仮定して、コンダクタンス振動の電圧周期からスプリットゲートと電子を捕獲するドットの間容量を計算すると  $e/\Delta V_{sg} = 1.3 \text{ aF}$  となり、これよりドットの面積は  $2000 \text{ nm}^2$  と見積もられる。

C-V 測定から求めた今回の試料の界面電荷密度は  $10^{11} \text{ cm}^{-2}$  程度であり、隣合う界面電荷の距離は  $30 \text{ nm}$  程度である。従ってポテンシャル揺らぎにより形成されるドットの面積は数  $1000 \text{ nm}^2$  である。この値は、コンダクタンス振動の周期から求めたドットの面積と定量的にほぼ一致する。一方、図 6 の  $I_{ds}-V_{ds}$  特性に現れる非線形性もクーロンブロケードによるものと考えられる。クーロンギャップ ( $V_{gap}$ ) の大きさからドットのトータル容量を求める<sup>11)</sup>と  $C_{total} = e/2V_{gap} = 40 \text{ aF}$  となる。これらの値から求めたドットのチャージングエネルギーは  $E_c = e^2/2C_{total} = 2 \text{ meV}$  であり  $T = E_c/k_B = 23 \text{ K}$  となる。

以上の考察から、今回のコンダクタンス振動の周期的成分は、クーロンブロケード現象に起因しているものと考えられる。

## 5. ま と め

スプリットゲート Si 極微細 MOSFET 構造の作製法と、低温で観測されたコンダクタンスの振動現象について述べた。この現象はポテンシャル障壁中にランダムに分布する局在準位を介したホッピング伝導現象、およびポテンシャル揺らぎによって生じた電子のドットを介しての単一電子トンネルに起因していると考えられる。今回の実験で観測された単一電子ドットは界面電荷によるポテンシャル揺らぎという人工的に制御不可能なもので形成されていた。今

後は人工的に作製した構造で単一電子現象を制御できるような微細加工技術をさらに進めていく一方、電子密度が高いスプリットゲート MOSFET 構造を作製し量子効果の発現を目指す予定である。さらにこれらの単一電子現象および量子効果を用いた新しい概念を持つ電子デバイスについて検討していく予定である。

## 謝 辞

有益な討論を頂いた東大生産技術研究所の藤田博之教授、平川一彦助教授に感謝いたします。また実験に御協力して頂いた秋山氏、斉藤氏、島田氏、安宅氏、榊原氏、王氏に感謝いたします。  
(1995年6月14日受理)

## 参 考 文 献

- 1) M. Ono, M. Saito, T. Yoshitomi, C. Fiegna, T. Ohguro, and H. Iwai: Technical Digest of International Electron Devices Meeting, (1993), pp. 119.
- 2) B.J. van Wees, H. van Houten, C.W.J. Beenakker, J.G. Williamson, L.P. Kouwenhoven, D. van der Marel, and C.T. Foxon: Phys. Rev. Lett. 60 (1988) 848.
- 3) A.A.M. Staring, H. van Houten, C.W.J. Beenakker, and C.T. Foxon: Phys. Rev. B (1992) 9222.
- 4) S.B. Field, M.A. Kastner, U. Meirav, J.H.F. Scott-Thomas, D.A. Antoniadis, H.I. Smith, and S.J. Wind: Phys. Rev. B 42 (1990) 3523.
- 5) H. Matsuoka, T. Ichiguchi, T. Yoshimura, and E. Takeida: IEEE Electron Device Lett. EDL-13 (1992) 20.
- 6) W.J. Skocpol, P.M. Mankiewich, R.E. Howard, L.D. Jackel, D.M. Tennant, and A.D. Stone: Phys. Rev. Lett. 56 (1986) 2865.
- 7) T. Hiramoto, K. Hirakawa, Y. Iye, and T. Ikoma: Appl. Phys. Lett. 51 (1987) 1620.
- 8) S.B. Kaplan and A. Hartstein: Phys. Rev. Lett. 56 (1986) 2403.
- 9) A.B. Fowler, J.J. Wainer, and R.A. Webb: IBM J. Res. Develop. 32 (1988) 372.
- 10) C. deGraaf, J. Caro, S. Radelaar, V. Lauer, and K. Heyers: Phys. Rev. B 44 (1991) 9072.
- 11) D. Ali and H. Ahmed: Appl. Phys. Lett. 64 (1994) 2119.
- 12) D.J. Paul, J.R.A. Cleaver, H. Ahmed, and T.E. Whall: Appl. Phys. Lett. 63 (1993) 631.