

研究種目：基盤研究 (C)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19560022  
 研究課題名 (和文) ナノ領域における極微小電流特性のキャリアセパレーション  
 評価技術の開発  
 研究課題名 (英文) Development of carrier separation technique by conductive atomic  
 force microscopy  
 研究代表者  
 坂下 満男 (SAKASHITA MITSUO)  
 名古屋大学・大学院工学研究科・助教  
 研究者番号：30225792

## 研究成果の概要：

集積回路の基本素子である MOSFET のゲート絶縁膜の劣化機構を解明するために、C-AFM によるキャリアセパレーション測定を可能とする手法の提案を行い、その測定技術の確立を目的に本研究を行った。本手法で用いる観察試料の設計および作製を行い、その観察試料の評価結果から、良好な電流-電圧特性を得ることができた。しかしながら、C-AFM 観察では変位検出のためのレーザー光の漏れが観察試料に照射され、光励起電流によって観察電流が測定できず、本手法の実現には光が全く照射されない環境での C-AFM 観察が重要であることが明らかとなった。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 薄膜・表面界面物性

キーワード：C-AFM、キャリアセパレーション、ゲート絶縁膜、MOSFET

## 1. 研究開始当初の背景

半導体デバイスの微細化によって MOS (Meta-Oxide-Semiconductor) 型トランジスタのゲート絶縁膜は従来用いられてきたシリコン酸化物は高誘電率 (high-k) 材料に、また、ゲート電極は多結晶シリコンから金属化合物材料に置き換わりつつある。一般的に high-k 材料は基板のシリコンと反応性が高く、さらに相分離し易いことから、組成、結晶構造、界面構造および膜厚等に“構造ゆらぎ”を元来生じ易い材料である。また、金属

化合物ゲート電極の仕事関数は、ゲート電極の組成、結晶構造および面方位等の“構造ゆらぎ”の影響を大きく受ける。さらに、トランジスタの微細化は“構造ゆらぎ”の影響を顕在化させ、トランジスタ間での特性バラツキや局所破壊の要因となる。そのため、次世代半導体デバイスの安定性や信頼性の向上においてゲート絶縁膜およびゲート電極材料の“構造ゆらぎ”の要因を解明することは必要不可欠である。

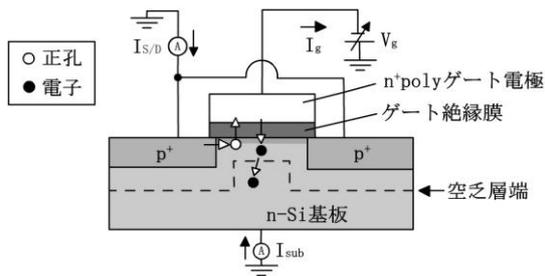


図1. MOSFETによるキャリアセパレーション測定。

## 2. 研究の目的

"構造ゆらぎ"は局所的な電気伝導特性のゆらぎに反映されることから、局所的な電気伝導特性から"構造ゆらぎ"を評価することができる。また、その電気伝導に寄与するキャリアタイプ（電子および正孔）の同定によって、さらに詳しい評価や解析を行うことが可能となる。そこで本研究では、電流検出型原子間力顕微鏡(C-AFM)にキャリアセパレーション法を適用し、ナノ領域におけるキャリアタイプ別極微量電流特性測定を可能とする評価技術を確認することにある。

## 3. 研究の方法

MOS型トランジスタにおけるゲート絶縁膜の破壊機構は、図1に示すようにトランジスタ素子を用いたキャリアセパレーション法によって、検討されている。キャリアセパレーション法とは、MOS型トランジスタのゲート電極に電圧を印加することによってゲート絶縁膜下部全体にチャンネルを形成し、ソース電極およびドレイン電極から流れ出る電流から少数キャリア電流を測定し、また、半導体基板からの電流から多数キャリア電流を測定する方法である。この方法は、キャリアタイプ別にリーク電流特性を各々得られることから、リーク電流に寄与する多数電流と寄与が小さい少数電流とに分離することができ、絶縁破壊現象の考察に非常に有効である。しかし、トランジスタ素子の評価から得られる情報はゲート電極の面全体に起きる現象の平均的なものであり、局所的な分解能は全くない。そのため、局所的に引き起こされるゲート絶縁膜の破壊現象の解明には素子による評価だけでは不十分である。

一方、C-AFMは局所的なリーク電流特性をナノスケールの分解能で観察できる方法である。本研究において開発するC-AFMによる評価技術は、材料の"構造ゆらぎ"に起因するゆらぎをナノスケールに面内分解能で得ることができ、さらにキャリアタイプ別に電流特性を直接的に測定することによって、局所的なリーク電流機構の同定を可能とする方法である。

通常、C-AFM測定では探針がゲート電極

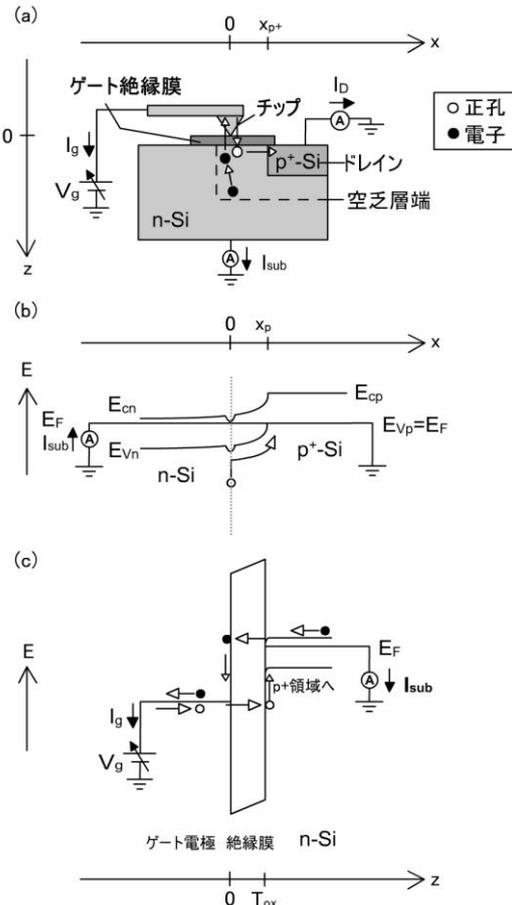


図2. C-AFMによるキャリアセパレーション技術。

に相当することから探針直下のみにチャンネル（反転層）が形成され、ソース・ドレイン間の絶縁膜下部に連続的なチャンネル層を形成することはできない。そのため、MOS型トランジスタの様にゲート絶縁膜に流れる少数キャリアをソースあるいはドレインを通して測定できない。そこで、本研究の最大の発想は図2に示す様にpn接合構造を形成して半導体の内部電位（ビルトインポテンシャル）を利用しソース・ドレイン電極に少数キャリアを導き、チャンネル層の形成がなくともC-AFMによるキャリアセパレーションを実現可能とするものである。

## 4. 研究成果

観察試料としてpn接合構造を形成し、観察領域となる半導体の不純物濃度をソース・ドレイン領域より低くすることによって、観察領域半導体を空乏化させ、内部電界を作る。そこで、観察試料の構造設計には下記について考慮する必要がある。

- (1) pn接合リーク電流は極微小な観察電流評価に障害となることから、pn接合にはバイアスを印加することができない。

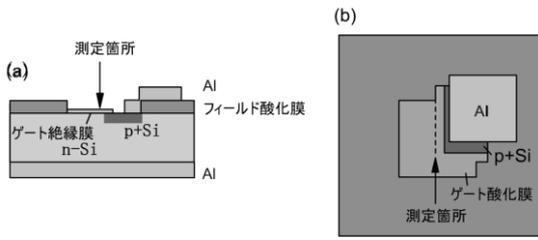


図 3. 観察試料の(a)断面および(b)表面模式図。

- (2) pn 接合リーク電流を極力抑えるために接合面積を小さくする。そのため、浅接合とする。
- (3) 大面積の観察領域の確保には電界印加領域を長く、すなわち空乏層幅を長くできる不純物濃度を選択する必要がある。
- (4) 観察領域の明確化のために、試料表面の pn 接合境界線を明確にする。

ここで、観察領域の不純物濃度を下記の手順によって検討する。まず、空乏層幅  $W$  は、

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi}-V)}{qN_B}} \quad (1)$$

である。ここで、 $\epsilon_s$ 、 $V_{bi}$ 、 $V$ 、 $q$ 、 $N_B$  は、それぞれシリコンの誘電率、内部電位、外部電圧、素電荷、基板の不純物濃度である。また、 $V_{bi}$  は、

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_B N_{SD}}{n_i^2}\right) \quad (2)$$

である。ここで、 $T$  は温度、 $N_{SD}$  はソース・ドレイン領域の不純物濃度、 $n_i$  は真性キャリア密度である。そこで、 $N_B$  が  $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  のシリコン基板に  $N_{SD}$  を  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  として pn 接合を形成した場合、 $V_{bi}$  は(2)式から 0.86 V となる。また、外部電圧を加えないことから内部電位によって形成される空乏層幅は(1)式から  $0.47 \mu\text{m}$  となる。

図 3 は、n 型シリコン基板を用いて作製した観察試料の断面および表面模式図である。

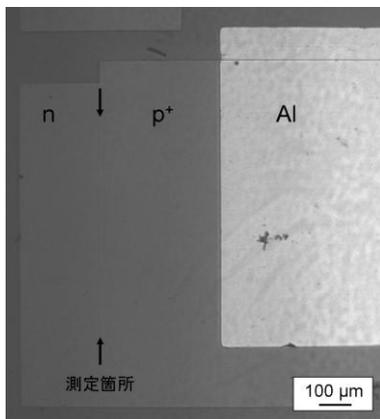


図 4. 観察試料表面写真。

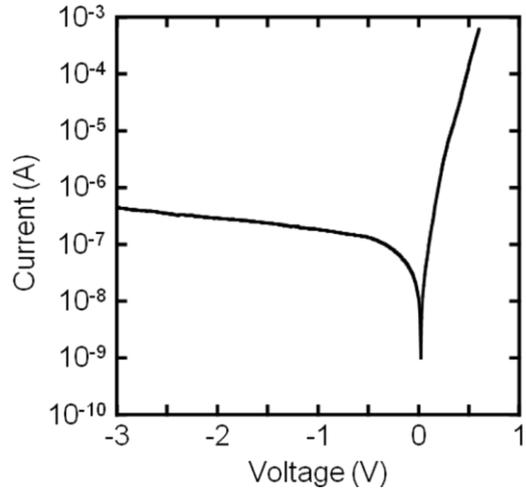


図 5. pn 接合部の電流-電圧特性。

測定箇所の明確化は、フィールド酸化膜の窓開け位置によって行っている。また、手法の確立を目的としていることから、標準試料としてゲート絶縁膜にはシリコン酸化膜を熱酸化によって作製した。電流検出は裏面 Al 電極 (シリコン基板) から電子電流を、表面 Al 電極 (ソース・ドレイン電極) から正孔電流を測定する。図 4 は作製した観察試料表面の光学顕微鏡像である。

作製した観察試料の pn 接合部の暗状態での電流-電圧特性を図 5 に示す。電流特性は整流性を示し、特にバイアスが印加されていない ( $V=0(V)$ ) において、電流は 1 (nA) 以下であり、C-AFM によるキャリアセパレーション用観察試料として使用できることを確認した。

次に、図 6 の様に AFM 用試料台に観察試料を銀ペーストを用いて貼り付け、JSPM4200 (日本電子製) の C-AFM によって測定を行った。さらに、この AFM 装置に高倍率電流増幅アンプ (FEMTO 製) を二台付加して、二種類の極微電流を観察できる測

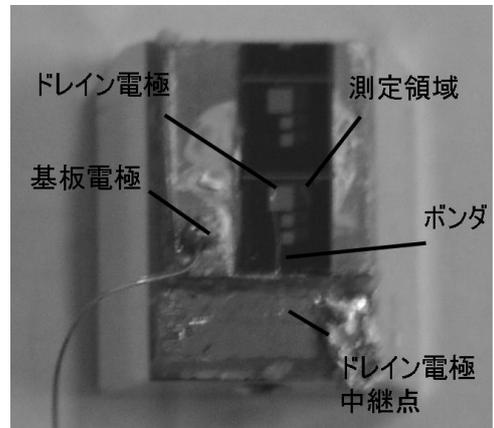


図 6. C-AFM の観察試料台への固定。

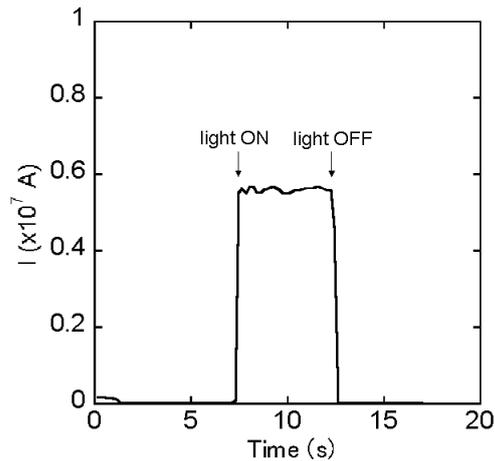


図7. AFM装置のレーザー光による光励起電流。 $V_s=0$  (V)。

定システムを構築した。このシステムを用いて観察した結果、電子電流および正孔電流、どちらの電流も非常に大きな電流が観察された。そこで、AFMのカンチレバーの変位検出に用いているレーザー光の影響について検討した。原理的にAFMはレーザー光を消して像を観察することはできない。そのため、カンチレバー探針を観察試料の一点に固定してレーザー光の照射による電流の変化を観察した。(図7) その結果、レーザー光の照射時には光励起電流が観察され、本来、観察すべき極微電流がこの電流によって消されていることが分かった。そこで、レーザー光を切った状態での一点固定のキャリアセパレーション観察を試みたが、カンチレバーのフィードバックが機能しないため、ドリフトによって探針の位置が安定せず、電流観察が不可能であった。

現在、レーザー光を使用しないAFMの市販装置として、カンチレバーに搭載されたピエゾ素子によって変位を検出する方式の装置がある。しかしながら、この方式のAFM装置ではカンチレバーの探針を導電性とすることができず、C-AFM測定に用いることができない。本研究で提案するC-AFMによるキャリアセパレーション観察に限らず、太陽電池等の様々な半導体デバイス材料の局所電流観察を可能とするには、光を使用しないC-AFM装置の開発が急務であることが明らかとなった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 1件)

- ① 加藤雄三、平安座朝誠、坂下満男、近藤博基、財満鎮明、「電流検出型原子間力顕微鏡法を用いた極薄Si酸窒化膜の劣化現象の観察」、第56回応用物理学関係連

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

坂下 満男 (SAKASHITA MITSUO)

名古屋大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：30225792

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者

酒井 朗 (SAKAI AKIRA)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授

研究者番号：20314031