

平成21年11月30日  
筑波大学  
株式会社半導体先端テクノロジーズ  
早稲田大学  
独立行政法人物質・材料研究機構

## 次世代集積回路用高誘電率ゲート絶縁膜材料に 信頼性劣化の鍵となる新事実

### 概要

1. 筑波大学大学院数理物質研究科の村上浩一研究科長を中心に進めている「つくばナノエレクトロニクス教育研究プロジェクト」の一貫として次世代トランジスタの研究を進めていた筑波大学大学院電子・物理工学専攻の山部紀久夫教授と蓮沼隆講師のグループは株式会社半導体先端テクノロジーズ(Selete)、早稲田大学、独立行政法人物質・材料研究機構と共同で、MOS型電界効果トランジスタに使用されている高誘電率ゲート絶縁膜の信頼性劣化現象に関する新しい知見を得ることに成功しました。
2. 超高集積回路への高誘電率ゲート絶縁膜の導入では、信頼性に対する懸念を払拭することが最大の課題となっています。集積回路の高信頼化は、あらゆるエレクトロニクスの省エネ、省資源に欠かせない大きな要素となっています。
3. 集積回路の主要構成素子であるトランジスタでは従来ゲート絶縁膜として酸化ケイ素が使用されてきましたが、トランジスタの小型化が進むにつれてゲート絶縁膜のリーク電流の増大が大きな問題となってきています。この問題を解決するために酸化ケイ素を金属酸化物である高誘電率絶縁膜に入れ替える研究開発が精力的に行われています。
4. トランジスタの確かな動作を保証するためにはゲート絶縁膜の絶縁性維持に高い信頼性が必要ですが、共有結合性の高いこれまでの酸化ケイ素とは異なり、イオン結合性の高い高誘電率絶縁膜の絶縁性劣化現象が不明であることから高誘電率材料を用いるトランジスタの開発では試行錯誤的な研究開発を進めざるを得ませんでした。
5. 高誘電率ゲート絶縁膜材料の絶縁性劣化現象の一つとして、電圧をかけつづけると、膜中で原子が移動し、膜の組成や構造が変化することを、今回明らかにしました。これまでの酸化ケイ素系トランジスタではまったく考慮されていないものです。本成果は高信頼性ゲート絶縁膜の実現、しいては今後の集積回路の寿命予測において新たな指針になることが期待されます。

## 研究の背景

半導体集積回路は、今や車、家電、携帯電話、オーディオなどのエレクトロニクスにおけるさらなる省エネ化にとって不可欠なものとなっています。集積回路を構成するトランジスタをいかに小さくするかで世界中で凌ぎを削って、開発競争が行われています。集積回路が全体として高い性能を発揮するためには、中に含まれる何億個ものトランジスタが同じような特性をもって動作する必要があり、エレクトロニクスを安心して利用するには個々のトランジスタが高い信頼性をもつことが必須条件となっています。

集積回路の基本素子であるトランジスタ（図1参照）は、ゲートに電圧をかけて、電流のスイッチの役目をしています。ゲート電極の下には、極薄のゲート絶縁膜（ゲート絶縁膜、これまでは酸化ケイ素が用いられる）が敷かれており、トランジスタの心臓部となっています。トランジスタの小型化を実現し、エネルギー消費を抑えるため、従来の酸化ケイ素に替わって酸化ハフニウムが広く注目されています。しかし、信頼性に課題を残して、今一步で足踏み状態にあります。

ゲート絶縁膜の厚さはすでに2ナノメートル（1ナノメートルは1メートルの10億分の1）以下であり、原子・分子を数個並べた程度の厚さとなっています。ゲート電圧は1ボルト程度であり、低いようであるが極薄なので電界としてはかなり大きな値です。

トランジスタに高い信頼性を持たせるためには、中でも絶縁破壊に対する信頼性を確保することが最も重要な要件ですが、一般的に絶縁膜に電圧をかけつづけると、徐々に劣化し、ついには絶縁破壊して、絶縁膜として働かなくなります。どこか1か所絶縁破壊するだけで使えなくなります。ヒューズが飛ぶのと同じようなことです。どのように劣化するかを明らかにして、その原因を取り除く必要があります。

ところが高誘電率絶縁膜は、酸化ケイ素とは原子レベルの構造が大きく異なるため、これまでの経験と知識だけでは、どのようにして劣化するかがよくわかりませんでした。酸化ケイ素は確固たる信頼性を実現してきましたが、原子同士をつなげている原理が高誘電率材料は異なり、正と負の電荷が引き合って結合ができていて、その長期信頼性は酸化ケイ素ほど確かなものではなく、安定性に乏しいものでした。例えば非晶質の高誘電率材料は熱処理によって結晶化してしまいます。高誘電率ゲート絶縁材料で高い信頼性を実現するためには、その信頼性劣化現象に関する十分な知見を得る必要があります。

## 研究成果の内容

今回、同じつくば市にある Selete で作製した最先端技術で形成した、高誘電率材料の一つである酸化ハフニウム膜を用いて、劣化と回復の特性を詳細に調査することにより、信頼性劣化現象に少なくとも3つのタイプがあることが明らかになりました。

それは、膜中に電荷が蓄積されるタイプ、酸素原子が動くタイプ、膜の組成あるいは構造を変化させるタイプ、です。後2者が今回明らかになったものです。酸化ケイ素と異なり、酸化ハフニウムでは、正イオンのハフニウムと、負イオンの酸素が、長時間電圧をかけつづけると、やがて弱いところから、両電極に分離していきます。このことが膜の組成を不均一にさせたり、より安定な結晶相を非晶質相の中に局所的に形成する要因となります。溶液で少しずつ酸化ハフニウム膜を剥がしていくと凹凸が現れ、他とは性質が異なる箇所ができてしまうことを、筑波大学の山部・蓮沼研究室が明らかにしました（図2参照）。この変化は、他の酸素原子の移動や電荷の蓄積とは異なり、加熱しても元に戻りません。イオンの移動が原因なので、かける電圧と時間が大きくなると、変化が大きくなります。また、イオンが動きにくい状態の物質にすることで、変化を小さくし、信頼性を高めることができると予想されます。今後は、その方法を研究開発していくことが急務です。ねらいが判明した以上、目標は近いと考えられます。

## 波及効果と今後の展開

最先端の半導体集積回路における高誘電率ゲート絶縁膜の信頼性劣化をもたらす大きな要因を明らかにしたことにより、原子の移動を抑制し、劣化を遅くしたり回避したりする種々の方法が提案されることは確実であり、世界中で競争が進んでいる半導体集積回路の信頼性が一段と高くなる。それにともなって、エレクトロニクス在省エネ、省資源化が進み、安心・安全な生活に大きく貢献すると期待される。

本成果は、米国ボルチモアで開催される 2009 IEEE International Electron Devices Meeting (2009.12.7-9, Baltimore, MD)において12月7日の午後2時50分（現地時間）から発表します。

発表者：

- 1) 筑波大学 数理物質科学研究科  
山部紀久夫 教授
  
- 2) 筑波大学 数理物質科学研究科  
蓮沼 隆 講師
  
- 3) 株式会社 半導体先端テクノロジーズ  
第一研究部 フロントエンドプロセスプログラム  
佐藤基之
  
- 4) 早稲田大学  
ナノテクノロジー総合支援プロジェクトセンター  
山田啓作
  
- 5) 独立行政法人物質・材料研究機構  
ナノマテリアル研究所 ナノ立体配置グループ  
知京 豊裕

## 用語説明

信頼性:故障を起こすまでの寿命を表す指標。

高誘電率ゲート絶縁膜:誘電率の高い酸化物材料を用いたゲート絶縁膜。従来は酸化ケイ素が使われていた。今後は酸化ハフニウムが主流になるとされている。将来材料として酸化ランタンも検討されている。

共有結合:原子同士が互いに不対電子を共有し共有電子対をつくり、分子を形成する結合

イオン結合:異種原子間で電子のやりとりが行われ、その結果正イオンと負イオンが静電気力で引き合っつくる結合

絶縁膜中の電荷の蓄積:高電界によって注入された電子などの電荷が絶縁膜中に捕獲される現象

電界:電圧を膜厚で割ったもので、電気力の強さを示す。

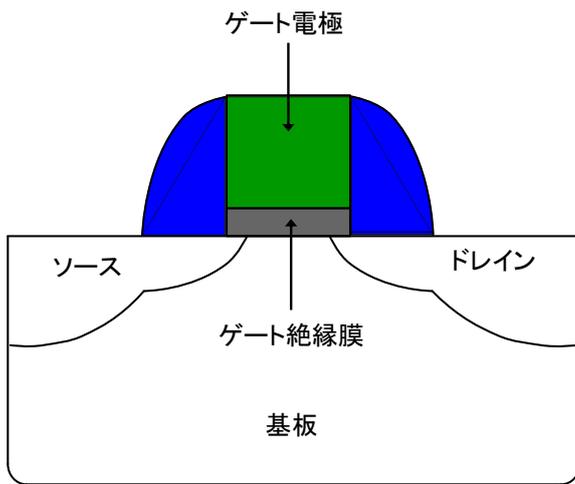


図1 MOS型電界効果トランジスタ

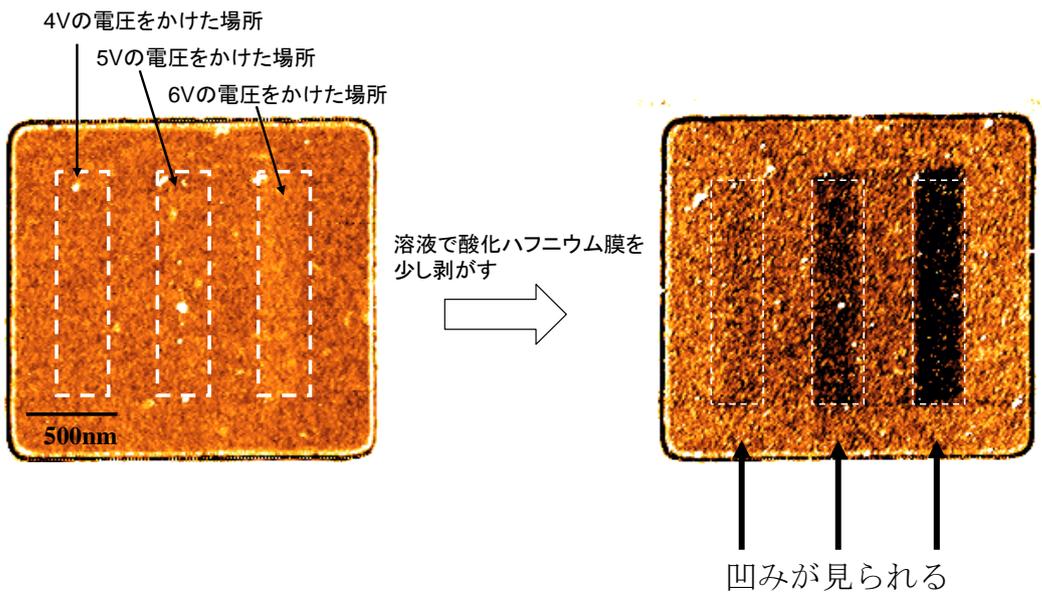


図2 溶液中で少し剥がす前後の酸化ハフニウム膜

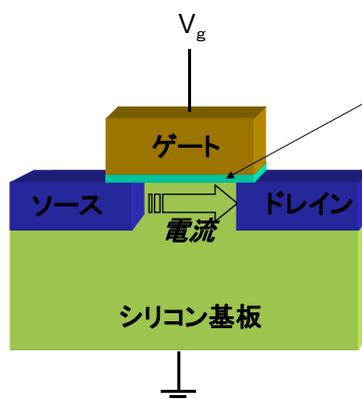
# 次世代集積回路用高誘電率ゲート絶縁膜材料に 信頼性劣化の鍵となる新事実

筑波大学大学院電子・物理工学専攻  
山部紀久夫、蓮沼 隆

## 電界効果トランジスタ

Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET)

ゲート電極に印加する電圧で、ソース・ドレイン間の電流が変化する

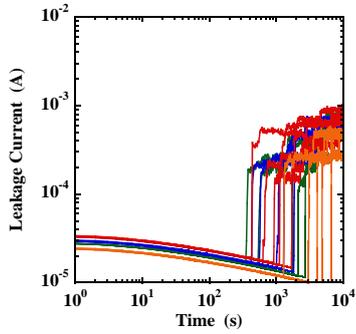


ゲート絶縁膜

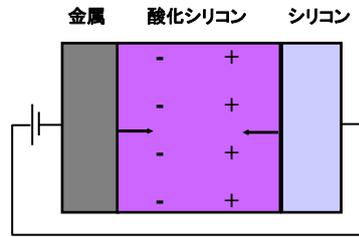
ゲート電極からシリコン基板に電流  
が流れないようにしている。

トランジスタの小型化に伴い、  
現在主流の酸化シリコンから  
高誘電率材料へ

## ゲート絶縁膜の信頼性劣化

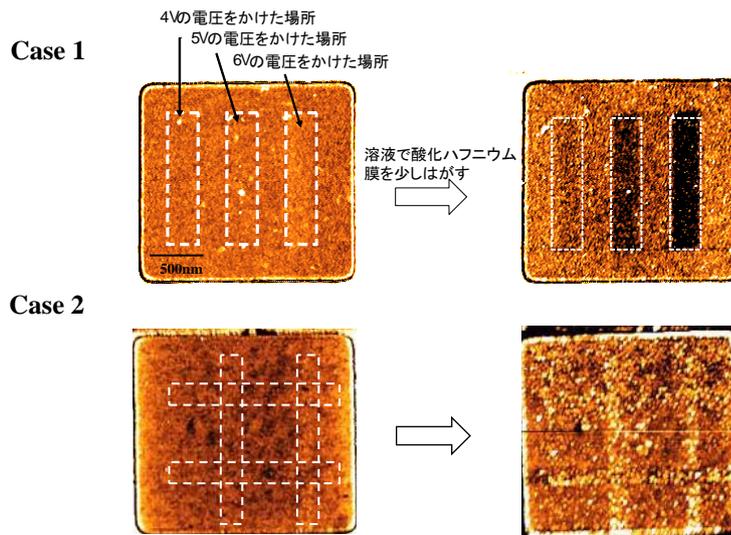


絶縁膜に電圧をかけ続けると、  
いずれ絶縁破壊を起こす



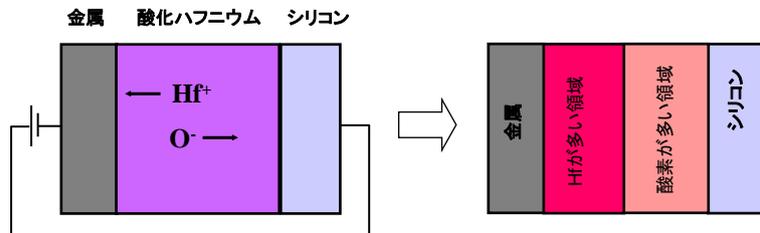
従来の酸化シリコンでは、電荷の  
蓄積が信頼性劣化の主な原因とさ  
れてる。

## 電圧印加による膜組成、構造変化 —酸化ハフニウム—



## イオンの移動による膜組成、構造変化

例えば...



電圧印加による原子の移動は、イオン結合性の高い金属酸化物ならではの現象  
今後は、原子の移動を抑制し、劣化を遅くしたり回避したりする種々の方法が提案される

## Experimental tool

### Atomic force microscope (AFM)

