

# LSIプロセスにマッチしたフルシリサイドゲート技術

Fully Silicided Gate Technology Compatible with LSI Fabrication Process

土屋 義規

吉木 昌彦

■ TSUCHIYA Yoshinori

■ YOSHIKI Masahiko

フルシリサイドゲート (FUSI) 電極は、不純物添加により電界効果型トランジスタ (FET) の動作しきい値を決定する仕事関数を容易に変調できることから、次世代以降の金属ゲート電極構造として有望視されている。しかし、これまで仕事関数変調の物理的起源は明らかにされていなかった。

これに対して東芝は、新たな不純物の添加方法と SPring-8<sup>(注1)</sup> 放射光を使った高度分析技術を用いることで、ゲート絶縁膜界面における不純物偏析位置が仕事関数変調方向を決定することを突きとめた。それにより、FUSI 電極における仕事関数変調を包括的に理解し、FUSI ゲート電極界面の設計指針を得ることに成功した。

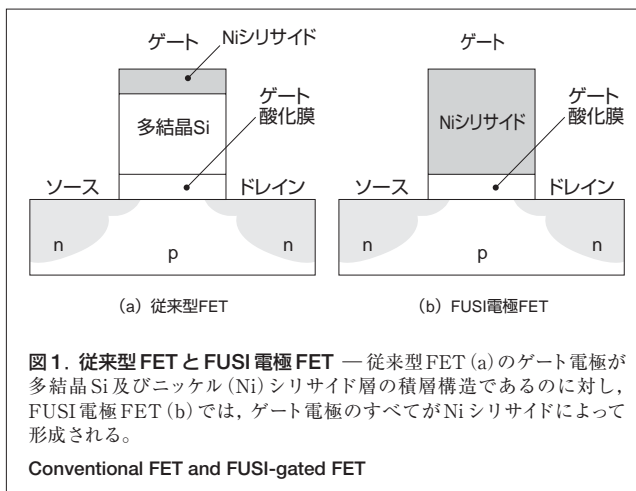
Fully silicided (FUSI) gate technology is a promising candidate for metal gate electrodes because the work function, which determines the threshold voltage of a field-effect transistor (FET), can be easily controlled with impurity doping. However, the physical mechanism has not yet been fully understood.

Toshiba has elucidated that the pileup position of impurities at the interface determines the modulation directions, by developing a new impurity incorporation method and utilizing the SPring-8 synchrotron radiation facility. On the basis of these results, we have proposed a comprehensive model and provided a guideline for the design of FUSI gate interfaces.

## 1 まえがき

シリコン (Si) ULSI (Ultra LSI) の高性能化は、その構成素子である電界効果型トランジスタ (FET) の微細化により成されてきた。なかでもゲート絶縁膜の薄膜化の勢いはすさまじく、これまでと同じペースでトランジスタ性能を向上させるには、2010年ごろに1 nmのゲート酸化膜が必要となる<sup>(1)</sup>。これに対し、従来の多結晶Siゲート電極では、本質的に生じる界面空乏層のため、実効的なゲート酸化膜を0.2～0.5 nm程度厚くしてしまう。これはゲート酸化膜厚が1 nmの場合、20～50%のゲート酸化膜厚の増加に相当し、FETの性能を決める駆動電流を直接的に小さくしてしまう。そのため、将来の高速デバイス実現のためには、ゲート絶縁膜の薄膜化と併せて解決しなければならない技術的課題と言える。

これに対し、空乏層の生じない金属材料をゲート電極に用いることで、空乏化をゼロにすることが可能である。近年、様々な金属材料及びそれらをULSI製造プロセスに適合させる検討がされている。その中で、もっとも現在のULSI製造プロセスにマッチした構造として、フルシリサイドゲート (FUSI: Fully Silicided gate) 技術がある<sup>(2)</sup>。FUSI技術は、従来型FETのゲート電極上部に形成されるシリサイド層をゲート電極/絶縁膜界面まで形成するだけで実現でき、



新たな金属材料の導入の必要がない(図1)。

また、FUSI電極技術では、金属ゲート電極の課題であるしきい値電圧制御についても、簡便な制御方法が提案されている。具体的には、FUSI電極形成前の多結晶Si中にあらかじめ不純物元素を入れておくと、その不純物元素の種類と量に応じて電極の仕事関数が変調され、FETのしきい値電圧を制御できる。ボロン (B) を添加すると仕事関数は大きくなり、リン (P)、ヒ素 (As) 及びアンチモン (Sb) を添加すると仕事関数は逆に小さくなることが知られている。

しかし、それにより実際に実現できている仕事関数制御

(注1) 世界最高性能 (2006年5月現在) の大型放射光施設 (兵庫県)。

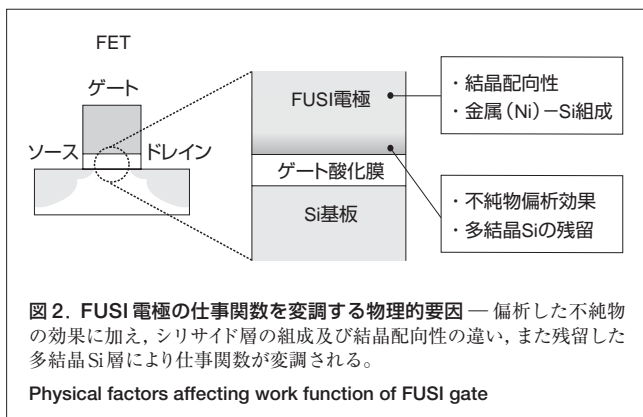
幅は、低しきい値電圧で動作する高性能FETには不十分である。また、界面偏析した不純物量の増大に伴って、仕事関数の変調量が大きくなることは示されているものの、その物理的起源は明らかにされていない。

このような状況において、東芝は今回、新たな不純物の添加方法と高度分析技術を用いることで、仕事関数変調効果を包括的に理解し、FUSI電極の実用化のための構造設計の指針を得た。ここでは、実験データを基に、FUSI電極における不純物添加による仕事関数変調の物理的起源について述べる<sup>(3)</sup>。

## 2 仕事関数変調の物理的要因

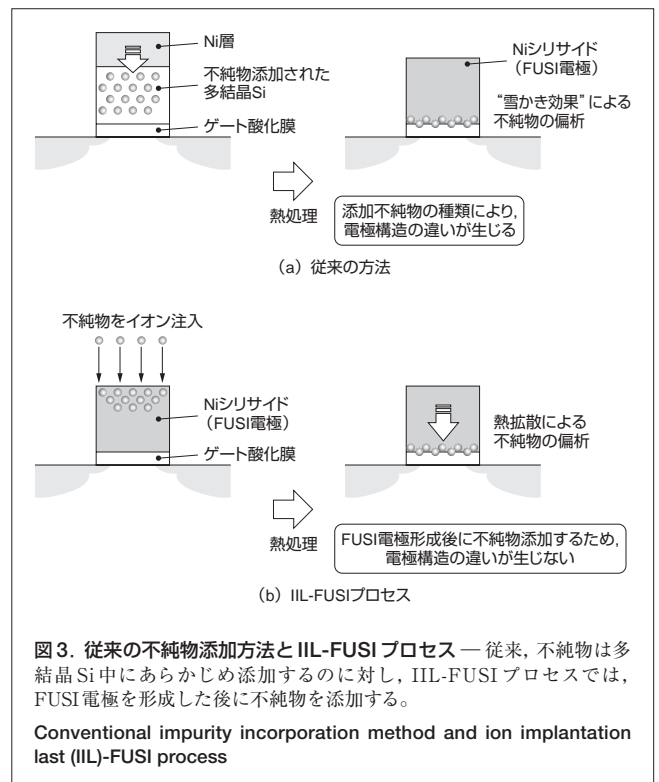
不純物の添加によりFUSI電極の仕事関数を変調する物理的要因を図2に示す。まず、前述した、偏析不純物による効果が挙げられる。多結晶Si中に添加された不純物の多くは、古くからシリサイド形成に伴う界面偏析、いわゆる“雪かき効果”<sup>(4)</sup>として知られている現象により、FUSI電極/ゲート酸化膜界面に偏析する。ただし、その場合、添加する不純物の種類によりシリサイド反応過程に違いが生じ、形成するシリサイド層の組成と結晶配向性が異なってしまう。また、FUSI電極形成の条件によっては、多結晶Siがすべてシリサイドに変化せずに一部の領域で残留する可能性がある。これらの要因はすべて、界面の電子密度を変化させ仕事関数を変調させる可能性があるため、仕事関数変調の主要因の抽出と、それによる正確な仕事関数変調量の見積りのためには、それぞれの要因を切り分けて検証する必要がある。

そこで、今回、不純物の添加方法を工夫することで、不純物の界面偏析効果だけを抽出することを試み、その変調効果を評価することで前記の要因の切り分けを行った。



## 3 界面偏析した不純物の効果の抽出

従来の不純物添加方法と、今回、物理的要因を切り分けた



めに新たに用いた方法の模式図を図3に示す。従来の方法では、不純物が多結晶Si中にあらかじめ添加されているために、形成されるシリサイド層の膜構造に差異が生じる。そこで、FUSI電極を形成した後に不純物をイオン注入し、その後、熱拡散によりFUSI電極/ゲート絶縁膜界面に導入する方法を用いた。このようにして不純物を界面偏析させる方法を、IIL (Ion Implantation Last)-FUSIプロセスと呼ぶことにする。

IIL-FUSIプロセスにより不純物(As)をFUSI電極に添加した際の、熱処理前後の深さ方向プロファイルを図4に示す。イオン注入直後にはニッケル(Ni)-FUSI電極の表面近傍に分布しているAs原子は、その後の熱処理によりシリサイド中を拡散し、FUSI電極/ゲート酸化膜界面に偏析していることが確認できる。また、X線回折分析により、IIL-FUSIプロセス前後でシリサイド層の膜構造変化がないことを確認しており、このプロセスによりシリサイド層の構造を変えずに不純物を界面に導入することに成功した。つまり、IIL-FUSIプロセスにより作製したFUSI電極の仕事関数変化は、界面に偏析した不純物による効果だけを抽出できていると言える。

次に、IIL-FUSIプロセスと従来FUSIにおいて、界面に導入した不純物が仕事関数変化に与える効果の大きさを比較する。図5は、IIL-FUSIプロセス(プロット)と従来方法(破線)の場合の、仕事関数変調量と界面不純物濃度の関係を示したものである。どちらの不純物偏析方法の場合にも、仕事関数は界面不純物濃度に比例して大きくなり、その依存性

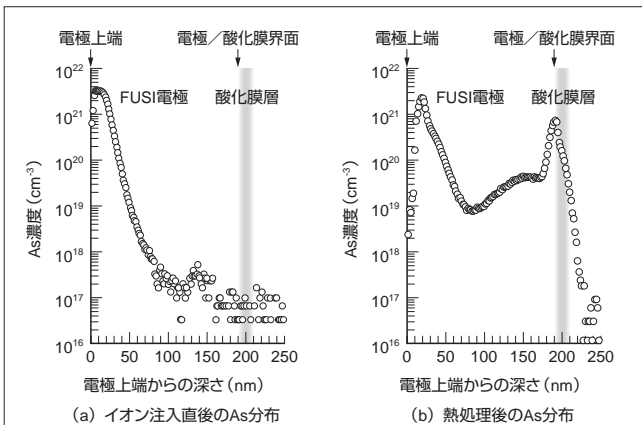


図4. 熱処理前後のAs原子の深さ方向プロファイルーシリサイド電極にイオン注入することにより導入されたAsは、熱処理により、FUSI電極/ゲート酸化膜界面に偏析する。

In-depth profile of As atoms before and after annealing

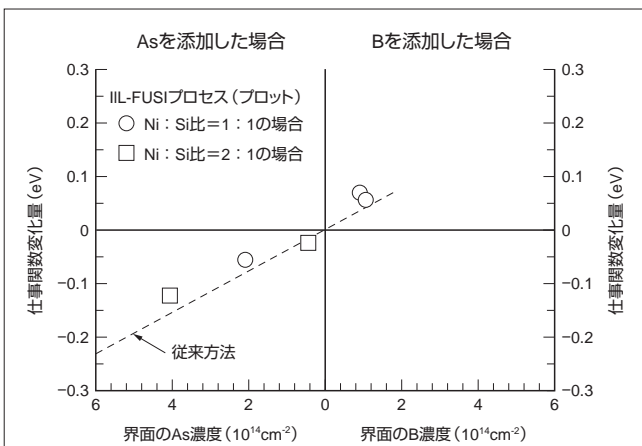


図5. 界面に導入した不純物量と仕事関数変化の関係ー不純物偏析方法によらず、同じ界面不純物濃度の場合の仕事関数変調量は一致している。つまり、仕事関数変調量は界面の不純物量だけで決まっている。

Dependence of work function modulation on impurity density at interface

はそれぞれの方法で一致している。また、IIL-FUSIプロセスの結果から、電極のNi-Si組成にも依存しない。このことから、仕事関数変調量は界面の不純物量だけで決まっており、従来方法の場合に生じる、添加不純物種に依存する膜構造の違いが仕事関数値へ与える影響は、偏析不純物の効果に比べて非常に小さいと考えられる。

#### 4 化学結合状態分析による不純物偏析位置の評価

前章で述べた界面偏析した不純物の具体的な仕事関数への作用の詳細を明らかにするには、不純物の正確な界面存在位置を知ることが重要と考えられる。

これまでに、SIMS(二次イオン質量分析法)あるいは

TEM(透過型電子顕微鏡)による分析が検討されてきたが、深さ方向の分解能や感度の点から、不純物の正確な偏析位置を特定するのは困難であった。今回、XPS(X線光電子分光法)によって不純物原子の化学結合状態を評価することで、その存在位置を明らかにする新たな位置同定手法を試みた。ここでは、界面偏析したB及びPを分析した結果について述べる。

Bの分析には裏面研磨によってSi基板を除去した後、薄い絶縁膜側から界面を測定する方法(裏面XPS)を用いた(図6(a))。この方法では、分析対象のシリサイド/酸化膜界面にダメージを与えることなく界面の状態評価が可能である。Bについては少なくとも3種類の結合状態が認められ、それぞれSi又はNiと結合したB、部分的に酸素(O)と結合したB、及び結合手のすべてをOと結合したBに帰属される(図6(b))。これらのBは界面に偏析していることから、それぞれシリサイド/ゲート酸化膜界面のシリサイド側、界面ジャスト、ゲート絶縁膜側に存在すると考えられる。

一方、Pの分析には、SPring-8放射光リングにより発生される高エネルギーのX線(硬X線)を使用した。硬X線を用いることで、通常のXPSでは分析できない結合状態評価に適した原子の内殻準位を分析することができる(HX-PES:硬X線光電子分光法)(図7(a))<sup>(5)</sup>。図7(b)にP1sのスペクトルを示す。Si及びNiと結合したPによる主ピークのほか、

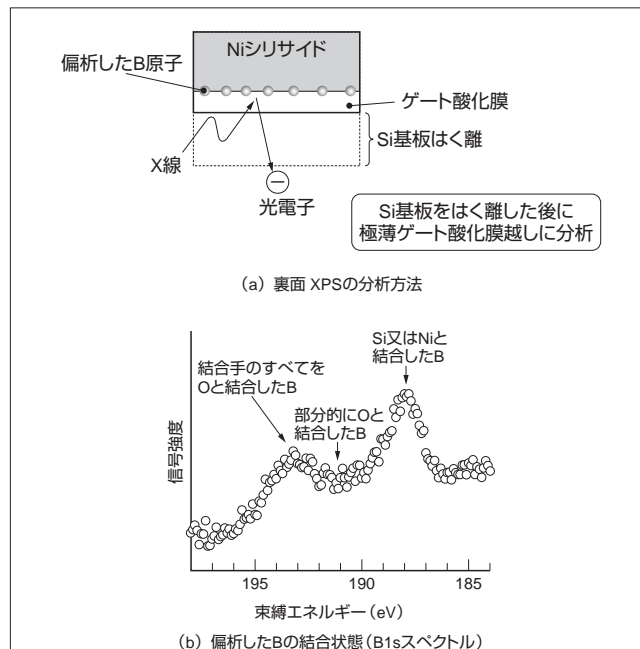
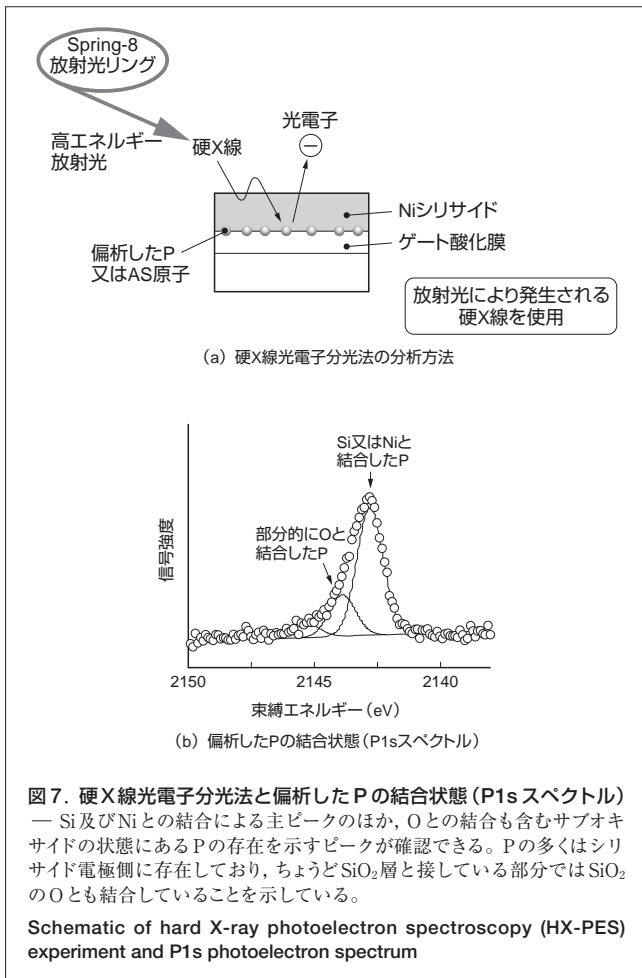


図6. 裏面XPSの分析方法と偏析したBの結合状態(B1sスペクトル)ーBについては少なくとも3種類の結合状態が認められ、それぞれ、シリサイド/ゲート酸化膜界面のシリサイド側、界面ジャスト、ゲート絶縁膜側に存在するB原子に対応する。

Schematic of backside X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) experiment and B1s photoelectron spectrum





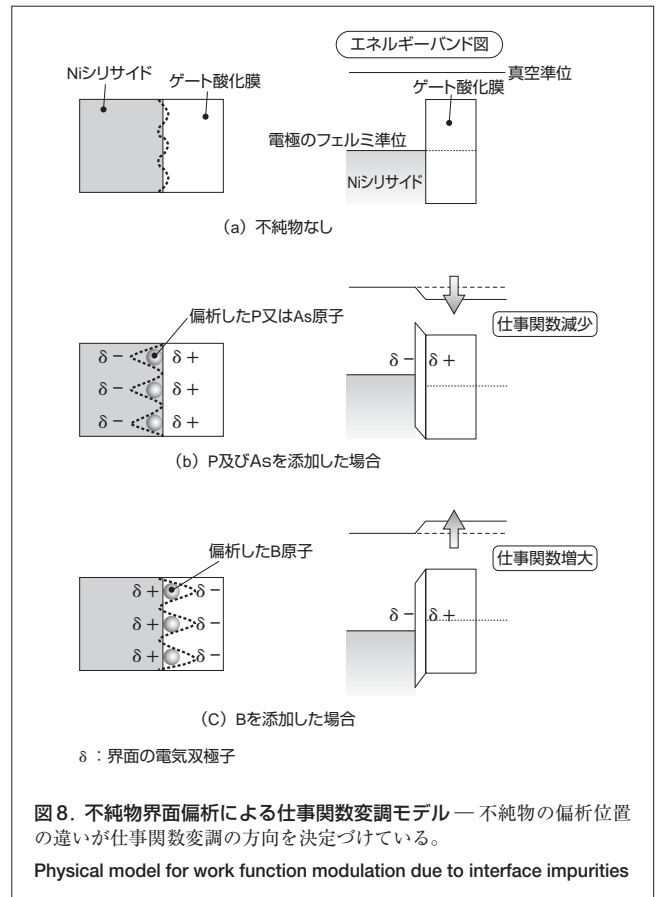
高束縛エネルギー側にサブオキシサイドの状態 (部分的にOと結合した状態)にあるPの存在を示すピークが確認できる。このため、界面に偏析してきたPの多くはシリサイド電極側に存在しており、ちょうどゲート酸化膜層と接している部分ではOとも結合していると考えられる。Pと同様にAsも、主にシリサイド電極側に分布し、ゲート絶縁膜との界面においてその一部がOと結合していることを示唆する結果が得られている。

以上の結果から、BとP、Asを比較すると、不純物の多くがシリサイド電極側においてSiやNiと結合していること、また一部が界面でサブオキシサイドを形成していることまでは同じであるが、界面のゲート酸化膜側にまで入り込んでいるかどうかには大きな違いがある。

これらの結果を基に、不純物の種類による仕事関数の変調方向の違いが何に起因するかを次章において議論する。

## 5 仕事関数変調モデル

P又はAs、及びBが界面に存在する場合に、界面の電子分布がどのように変調されるかを、図8に模式的に示す。



いずれの不純物もその電気陰性度は、Ni及びSiのそれよりも大きく、このことは添加された不純物の周りに電子が強く引き付けられることを示している。

前章の偏析位置分析から、Pは界面に対して電極側に分布しており、まさに界面でゲート絶縁膜と接しているP原子は界面の電子分布を変調させる。この場合、Pを添加することで界面の電子分布は電極側へ偏り、ゲート絶縁膜側に正電荷が誘起されゲート電極/絶縁膜界面に電気二重層が形成される。その結果、チャンネル領域から見た場合、ゲート電極の仕事関数が相対的に減少する。Asの場合も同様である。

一方、Bの場合は、その一部がゲート絶縁膜中に進入して界面偏析している。BもやはりSiやNiより電気陰性度が大きいことから、電子分布はBの存在する側、つまりゲート絶縁膜側へ偏り、PやAsの場合とは逆に、ゲート絶縁膜側に負電荷が誘起された電気二重層が形成される。このため、PやAsとは逆に、チャンネル領域から見た場合、ゲート電極の仕事関数が相対的に増加する。

以上の考察から、不純物の偏析位置の違いが仕事関数変調の方向を決定づけていると考えられる。また、この物理モデルに基づき、不純物添加による仕事関数の変化量を界面の不純物量で整理すると、ゲート電極及び絶縁膜の種類が異なる場合でも、その変化量が統一的に整理することができる。

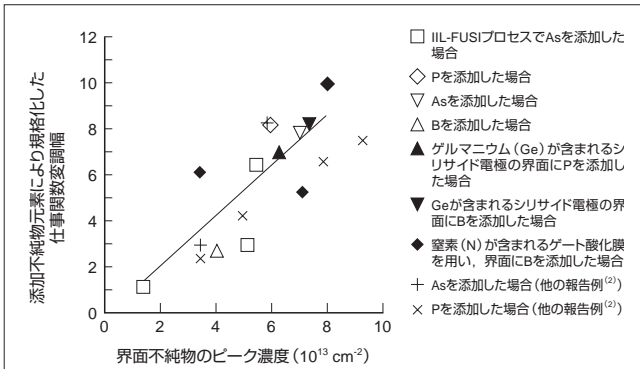


図9. 規格化した仕事関数変調量と界面不純物濃度の関係—今回提案した物理モデルに基づき、図の縦軸は不純物の原子半径及び電気陰性度により規格化されている。ゲート電極及び絶縁膜の種類が異なる場合でも、その変化量を統一的に整理することができる。

Normalized work function modulation range vs. peak impurity density at interface

ことから、この物理モデルの妥当性が確認できる(図9)。

## 6 あとがき

新たな不純物の添加方法と高度分析技術を用いることで、これまで明らかにされていなかった不純物添加によるFUSI電極の仕事関数変調の物理的起源を突きとめ、仕事関数変調を包括的に説明できる物理モデルを提案し、その妥当性を確認した。

この研究から、不純物の添加量だけでなく、その偏析位置の正確な制御が仕事関数の変調幅を増大させるために必須であることが新たにわかった。

当社では、今回得られた知見を基に、FUSI電極/ゲート絶縁膜界面を積極的に制御し、高性能FETに用いることが可能なFUSI電極の開発を進めている。

## 文献

- (1) 2004年度ITRSロードマップ (<http://public.itrs.net/>).
- (2) J. Kedzierski, et al. Threshold Voltage Control in NiSi-Gated MOSFETs through SITS. IEEE-Trans. Electron Devices. **52**, 2005, p.39 - 46.
- (3) Y. Tsuchiya, et al. Physical Mechanism of Work Function Modulation due to Impurity Pileup at Ni-FUSL/SiO (N) Interface. Tech. Dig. IEDM. 2005, p.637 - 640.
- (4) M. Wittmer, et al. The redistribution of implanted dopants after metal-silicide formation. J. Appl. Phys. **49**, 1978, p.5827 - 5834.
- (5) 小林 啓介, ほか. 物質科学のための高分解能X線光電子分光. 日本物理学会誌. **60**, 8, 2005, p.624 - 631.



土屋 義規 TSUCHIYA Yoshinori

研究開発センター LSI基板技術ラボラトリー。  
MOSデバイスの研究・開発に従事。応用物理学会会員。  
Advanced LSI Technology Lab.



吉木 昌彦 YOSHIKI Masahiko

研究開発センター LSI基板技術ラボラトリー研究主務。  
材料分析による各種デバイスの研究・開発に従事。応用物理学会会員。  
Advanced LSI Technology Lab.