Si 系材料薄膜の高度評価技術

——SiO₂/Si 界面構造への適用例——

特集解説

正 員 服 部 健 雄 (武蔵工業大学工学部)

1. はじめに

プレーナ技術を用いてシリコン表面に形成された Si 系デバイスの微細化が進んだ結果、極微構造デバイスの形成、原子層または分子層単位のプロセス制御、極微構造デバイスを高い歩留りで製造するためのウルトラクリーン技術⁽¹⁾の開発などが必要となりつつある。それに伴い、表面および界面近傍の極微量不純物の面内および深さ方向分布、化学結合状態、サブミクロンレベルの微小領域の応力分布、原子層単位の凹凸など、必要とされる測定内容が従来にも増して高度なものとなりつつある。まず、表面の評価対象と評価技術に関しては、極微量不純物の分布と二次イオン質量分析計 (SIMS; Secondary Electron Microscope)、極微量不純物と全反射蛍光 X 線分析、微小領域の結晶構造と空間分解能が μm レベルの反射高速電子回折 ($\mu\text{-RHEED}$, $\mu\text{-Reflection High Energy Electron Diffraction}$)^{(2)~(4)}、吸着脱離と昇温脱離分析 (TDS; Thermal Desorption Spectroscopy)⁽⁵⁾、化学結合状態とフーリエ変換赤外全反射減衰分光法 (FT-IR-ATR; Fourier Transform Infrared Attenuated Total Reflection Spectroscopy) および X 線光電子分光分析法 (XPS; X-ray Photoelectron Spectroscopy, ESCA; Electron Spectroscopy for Chemical Analysis と同じ)、ラフネスと走査トンネル顕微鏡 (STM; Scanning Tunneling Microscope) および原子間力顕微鏡 (AFM; Atomic Force Microscope)、デバイスの不良箇所とオーグ電子顕微鏡 (AEM; Auger Electron Microscope) などがある。

一方、界面の評価対象と評価技術に関しては長い研

究の歴史がある。すなわち、1960 年に金属酸化物半導体電界効果トランジスタ (MOS FET) が発表されて以来、SiO₂/Si 界面および界面近傍の不完全構造が素子特性の不安定性、素子特性の劣化、界面準位や界面固定電荷をもたらすことから、種々の評価技術を用いて SiO₂/Si 構造が調べられてきた^{(6)~(15)}。また、デバイス寸法の微細化とともに酸化膜に占める界面遷移領域の割合が無視できないものとなり、この点からも界面構造を明らかにすることが重要な課題となってきた。更に、1972 年に登場した設計寸法 $8\mu\text{m}$ の 4 kbit DRAM ではゲート酸化膜の膜厚が 100 nm であったものが、1988 年に登場した設計寸法 $0.43\sim 0.50\mu\text{m}$ の 16 Mbit DRAM では 15 nm と、集積密度が 4 倍となるごとに膜厚は 73% 薄膜化され、設計寸法 $0.14\sim 0.18\mu\text{m}$ の 1 Gbit DRAM では 6 nm となることが予想されている。

このように酸化物の膜厚が激減した結果、酸化膜に原子スケールの完全性という極めて厳しい要求がなされるようになった。しかし、これまでに行われた多くの研究にもかかわらず界面構造は未だに解明されていないので、理想的な界面構造を予測することはもとより、今後の酸化プロセスの改良によりどの程度の界面が実現できるかを予測することもできない。その最大の原因は、酸化前のウェーハの平坦性を測定できる適当な手段がなかったこと、自然酸化膜の形成を抑止する方法が見い出されていなかったこと、初期酸化機構が解明されていなかったために酸化膜の膜厚を原子層単位で精度よく制御することが困難であったことなどである。しかし、最近になってこれらの点に関してようやく解決の糸口がつかめつつある⁽¹⁾。

本稿では、SiO₂/Si 界面構造を解明するために用いられてきた各種の評価技術について述べるとともに、今後必要とされる評価技術についても展望したい。これらの評価技術は、シリコン熱酸化膜のみならず、種々の Si 系材料薄膜にも適用できると考えられる。

Advanced Characterization Techniques for Silicon Related Thin Films—Their applications to SiO₂/Si interface structure—

By Takeo Hattori, Member (Musashi Institute of Technology)

キーワード: 評価技術, SiO₂/Si 界面, 遷移領域, 不完全構造, 界面構造の安定性

なお、極薄ゲート絶縁膜としてはONO膜のような複合絶縁膜も検討されている⁽¹⁶⁾。

不完全な界面構造の最も感度の良い検出方法に、界面単位密度や界面固定電荷密度を見積ることのできる容量-電圧特性測定法、界面およびその近傍のダングリングボンドを検出する電子スピン共鳴 (ESR; Electron Spin Resonance) 法がある⁽⁶⁾。これらの方法は構造欠陥を高感度で検出できる方法ではあるが、構造欠陥の近傍の構造を検出することはできない。構造欠陥はSiO₂/Si界面近傍に主として存在すると考えられるので、構造欠陥の生成要因を解明するには、界面の平坦性、界面の組成および構造遷移領域、界面近傍の酸化膜中のSi-Si結合、Si-H結合、結晶質SiO₂、シリコン基板の洗浄過程で形成される自然酸化膜が熱酸化膜の膜質に及ぼす影響、界面構造の安定性などを明らかにする必要がある。

これらの解明には、次のような各種の評価技術⁽¹⁰⁾、すなわち、

①界面の平坦性やステップを検出できる透過電子顕微鏡による断面観察 (断面TEM)法、STMやAFMによる二次元表面および界面観察法

②組成および構造遷移領域を検出できるイオン後方散乱法 (RBS) および電子分光法

③サブオキサイド、Si-H結合などを検出できる電子分光法、赤外吸収測定法、真空紫外域における反射測定法

④界面近傍の酸化膜中の結晶質SiO₂を検出できる断面TEM法、電子回折法、微小角入射X線散乱法

⑤界面構造の安定性を検討できる電子分光法などが用いられてきた。以下に、その適用例を述べることにする。

2. 表面および界面の平坦性の検出⁽¹⁰⁾

酸化前のシリコン表面の構造制御は、デバイス構造の微細化に伴います重要な問題となりつつある。フッ酸によって表面の酸化膜を除去したシリコン表面のダングリングボンドは水素原子で終端され水素化されており⁽¹⁷⁾、この表面の酸化反応に対する安定性⁽¹⁸⁾と相まって原子層単位で構造制御可能な表面として注目されている。しかし、この表面には原子ステップやキンクと呼ばれる原子層単位の凹凸が極めて多く、その結果、各種の水素化シリコンの構造が存在することが明らかにされている。その後、(111)面の場合には、40%フッ化アンモニウム処理⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾または沸騰した純水⁽²¹⁾により処理すると表面の選択的エッチングより新たに生じたダングリングボンドが水素で終端され

て、monohydrideだけで覆われたステップ密度の極めて少ない平坦な表面が得られることが明らかにされた。(100)面に関しては、原子スケールで平坦な水素終端した表面を溶液処理により実現する方法は未だに見い出されていない⁽²²⁾。

界面にはステップがあるものの、原子スケールで平坦であることは、断面TEMによっても明らかにされた。界面における原子層単位の凹凸は、低速電子回折法、XPS、光学的方法⁽⁹⁾、STM、AFMなどを用いて調べられている。特に、STMやAFMの出現により表面や界面における原子層単位の凹凸をその形状も含めて測定できるようになった。その結果、このような凹凸と界面構造の関係を明らかにすること⁽²³⁾⁽²⁴⁾、更に界面単位の禁制帯内の分布と不完全構造との対応⁽²⁵⁾、透過電子顕微鏡観察により見い出された界面のシリコン基板側に埋め込まれた形で存在する直径3nm以上のシリコンクラスタ⁽²⁶⁾の界面近傍における分布を明らかにすることなどが当面の課題である。

3. 組成遷移領域の検出⁽¹⁰⁾

SiO₂からSiへの組成変化の検出は、RBS、オージェ電子分光法 (AES) およびXPSなどを用いて行われている。図1はRBSにより得られた結果である⁽²⁷⁾。この図によれば、組成変化は急しゅんに起り、

それぞれのデータは、酸化膜を希フッ酸によりエッチングして得たものである。実線は、組成がSiO₂の場合を示す。また、斜線を施した部分はSi基板表面のSi原子配置がバルクの場合と同じと仮定したときのSi面密度を示す。この値と実験値を外挿して求める酸素量がゼロ (膜厚がゼロ) の場合の面密度との差は、Si基板側の界面近傍における構造遷移領域の存在を示している。

図1 1.0 MeV⁴He⁺イオンをSi(111)面上に<100>方向から入射させたときに得られるSiとOの面密度の関係

界面に隣接する約1分子層を除いては酸化膜は SiO_2 のみからなることが見出されている。また、界面近傍の酸化膜中には約1分子層の Si-Si 結合を含む酸化物、いわゆるサブオキシドが存在することが後述するようにXPSにより明らかにされている。原子スケールで平坦な水素終端した $\text{Si}(111)$ 面上に形成された界面組成遷移領域の形成過程に関する検討結果⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾は、

①界面遷移領域が形成されるまでに酸化速度が3段階に分かれること

②それぞれの段階における($\text{O}1s$ スペクトル強度/ $\text{Si}2p$ スペクトル強度)の酸化時間依存性は、酸化反応の進行に伴い界面に蓄積される応力を緩和するために酸素原子がシリコン原子に対して移動することなどを示唆している。

4. 構造遷移領域の検出

前述の組成遷移領域に加えて、界面の両側に構造遷移領域が存在する。すなわち、基板側には、バルクのシリコンの原子配置とは異なる2原子層のシリコンからなる構造遷移領域が界面に接して存在することがRBSにより明らかにされている⁽²⁷⁾。また、図2に示す酸化膜厚の化学エッチング時間依存性は、非晶質 SiO_2 側の界面近傍に Si-O-Si の結合角がバルクの SiO_2 中のそれとは異なった構造が存在することを示唆している⁽³⁰⁾⁽³¹⁾。いま、エッチング速度が変化し始める膜厚が構造遷移領域に等しいと仮定すると、次の知見が得られる。すなわち、酸素をアルゴンで希釈した

り熱処理すると界面近傍の応力が緩和されて、その結果、構造遷移領域の厚みが減少する。また、面密度が大きいほど構造遷移領域の厚みが大きくなる⁽¹¹⁾⁽³⁰⁾。最近、Ireneらは酸化膜と同じ屈折率を有する有機溶液中に酸化膜を浸すことにより酸化膜表面における多重反射をなくして界面遷移領域からの信号のみを偏光解析法を用いて抽出し、構造遷移領域の熱処理による変化として理解される結果を得ている⁽³²⁾⁽³³⁾。

5. 界面近傍の不完全構造の検出

界面近傍の酸化膜中の不完全構造のうち、 Si-Si 結合、 Si-H 結合、 Si の未結合手の検出について述べる。

5.1 Si-Si 結合⁽⁶⁾⁻⁽¹⁵⁾

Si^{2+} と表わされる $\text{Si-O}_x\text{Si}_{4-x}$ ($x=1, 2, 3, 4$)の結合形態を有するサブオキシド。換言すれば界面または酸化膜中の Si-Si 結合は、XPSによる $\text{Si}2p$ 光電子スペクトルの非破壊測定、シリコンの最近接原子配置を反映する部分収率分光法(Partial Yield Spectroscopy)またはX-ray Absorption Near-Edge Structure)、電子エネルギー損失分光法⁽³⁴⁾などより検出されている。更に、サブオキシドの存在する位置は、XPSにおいて光電子の射出角を変化させて実効的検出深さを変化させる方法や励起X線源のエネルギーを変化させて検出深さを変化させる方法などを用いて行われた。なお、界面の組成遷移領域の検出を偏光解析法、赤外吸収測定法により試みた研究もある⁽¹⁰⁾。

図3は(100)と(111)面上に形成した膜厚0.5 nmのシリコン熱酸化膜について $\text{Si}2p$ 光電子スペクトルである⁽³⁵⁾。この図は、サブオキシド Si^{1+} , Si^{2+} , Si^{3+} が明瞭に分離検出されること、およびサブオキシドの組成が結晶面方位に依存することを示している。更に、膜厚を変化させたときのサブオキシドスペクトル強度の変化より、これらサブオキシドが界面近傍に存在することもわかる。更に、膜厚2分子層程度の酸化膜の場合、酸化前のシリコン表面が平坦でないときには Si^{3+} が増加する。また、酸化温度が高くなっても Si^{3+} が増加する⁽³⁶⁾。

図4はシリコン熱酸化膜の真空紫外域反射スペクトルである⁽³⁷⁾⁻⁽⁴⁰⁾。 SiO_2 の光吸収端以下の光子エネルギー領域において、熱酸化膜の反射スペクトルが熔融石英のそれからずれていることが見られる。このスペクトルに薄膜端面の多重反射を考慮したクラマース・クローニッヒ解析を適用した結果、このずれが SiO_2 の光吸収端以下の光子エネルギー領域における光吸収の増加に起因していることが明らかとなっ

熱処理しない酸化膜のエッチング速度が膜厚が5 nm以下で増加し、熱処理した酸化膜ではこのような変化が見られないのは、熱処理により界面近傍の応力が緩和されたことを示唆している。

図2 深さ方向分析における SiO_2 膜厚の化学エッチング時間依存性

図 3 0.1 Torr の酸素雰囲気中 850°C において 10 秒間酸化して得られた膜厚 0.5 nm の酸化膜の Si 2p_{3/2} 光電子スペクトル

図 4 膜厚 4.5 nm の熱酸化膜の真空紫外域における反射スペクトルの深さ方向変化

た。この光吸収のうち、Si-Si 結合に起因した光吸収の深さ方向変化より、界面から 1.4 nm 以内の酸化膜中に面密度約 $7 \times 10^{18} \text{ m}^{-2}$ の Si-Si 結合が存在するこ

図 5 FT-IR-ATR 法により測定した熱硝酸溶液およびアンモニア過水中で形成した自然酸化膜の赤外吸収スペクトル

とを見出した。

5.2 Si-H 結合

酸化膜中の Si-H 結合の存在は、赤外吸収測定により明らかにすることができる。すなわち、図 5 に示すように、熱硝酸溶液中で形成した自然酸化膜中には Si-H 結合が存在するのにに対して、アンモニア過水（アンモニア水と過酸化水素水の混合溶液）中で形成した自然酸化膜中には Si-H 結合はほとんど存在しない⁽⁴¹⁾。この違いを手掛かりに Si-H 結合に対応した Si 2p スペクトル、すなわち、図 6 中の Si²⁺ スペクトルを見出した。この Si²⁺ スペクトル強度から見積られる Si-H 結合量は赤外吸収スペクトル強度から見積られるそれとほぼ一致する。更に、熱硝酸溶液中で形成した自然酸化膜中に存在する Si-H 結合が膜中にほぼ均一に分布していることが、光電子の酸化膜表面からの脱出角を変化させる角度分解 Si 2p 光電子スペクトル測定により明らかにされた⁽⁴¹⁾。その後、硫酸過水（硫酸と過酸化水素水の混合溶液）中で形成した自然酸化膜および界面のいずれにおいても Si-H 結合量が極めて少ないことを見出した。そこで、硫酸過水中で形成した自然酸化膜を Si-H 結合の少ない参照試料として用いて、自然酸化膜中の Si-H 結合に由来する赤外吸収スペクトルおよび Si 2p 光電子スペクトルが抽出された^{(42)~(44)}。

5.3 Si の未結合手^{(6)~(15)}

構造欠陥と関係づけられる界面や酸化膜中のキャリア捕獲準位密度は、MOS コンデンサの容量-電圧特性測定により明らかにされている。現在では、チャネ

〔 Si^{2+} スペクトルが酸化膜中の Si-H 結合に対応した $\text{Si} 2p$ スペクトルである。〕

図 6 熱硝酸溶液およびアンモニア過水中で形成した自然酸化膜の $\text{Si} 2p_{3/2}$ 光電子スペクトル

ル面積が $1\mu\text{m}^2$ 以下の小さな MOSFET を用いることによって、界面に存在する一つの捕獲準位への電子の捕獲がリアルタイムで観測できるようになった。また、自然酸化膜中の電子捕獲準位やそのクラスタの形成が STM により見い出されている。このようなキャリヤ捕獲準位と関係づけられる酸化膜中の構造欠陥は、ESR 法により明らかにされている。代表的な構造欠陥には、Pb センタと E' センタがある。Pb センタは、 $\cdot\text{Si}=\text{Si}_3$ で表わされる界面に局在する Si の未結合手で禁制帯中の特定のエネルギー位置に界面準位を形成する。また、 E' センタは、 $\cdot\text{Si}=\text{O}_3$ で表わされる酸化膜中に存在する Si の未結合手で、酸化膜中の酸素空位をはさむ Si-Si stretched bond が正孔を捕獲することにより生ずる。

6. 界面近傍における結晶質 SiO_2 の検出⁽¹⁰⁾

SiO_2/Si 界面のステップ近傍の酸化膜中に結晶質 SiO_2 が存在することが、断面 TEM、電子回折⁽⁴⁵⁾、微小角 X 線散乱などにより見い出されている。更に、 $\text{Si}(100)$ の清浄表面上の (2×1) の超構造は、その上に MBE 法で SiO_2 を形成しても保持されること⁽⁴⁶⁾ が、微小角 X 線散乱によって確認されている。

7. 界面構造の形成とその制御法⁽⁴⁷⁾

希フッ酸処理により水素終端したシリコン表面をアルゴンガス中で 300°C まで加熱する。次に、アルゴ

〔膜厚 5.1 nm の場合のエネルギー障壁は、 300°C で作成した preoxide を介して熱酸化膜を形成した場合の方が通常の熱酸化法で形成した場合に比べて大きい。〕

図 7 SiO_2/Si 界面における Si および SiO_2 の伝導帯端のエネルギー差

ンを酸素ガスに切り換えて酸化温度 300°C において酸化して膜厚約 0.4 nm の熱酸化膜を形成する。このようにして形成した熱酸化膜をアルゴン中 900°C において加熱しても酸化膜厚は増加しない。この酸化膜を通して 900°C で形成した膜厚 5.1 nm の熱酸化膜の SiO_2/Si 界面における伝導帯端のエネルギー差、いわゆるエネルギー障壁は図 7 に示すように通常の熱酸化法で形成される酸化膜の場合よりも高くなる。この結果は、高温の熱酸化膜形成前に表面に存在する酸化膜の膜質が高温熱酸化膜の膜質を左右することを示唆している。従って、 300°C で形成される熱酸化膜の構造を明らかにすることが当面の課題である⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾。酸化反応が進展するには酸素と水分とが共存することが必要であり⁽⁴⁸⁾⁽⁴⁹⁾、水分含有量の少ない超高純度ガスを用いて酸化を行うことが酸化膜厚の原子スケールの制御には必要である。

8. 界面構造の安定性の評価

超清浄酸化法により形成した酸化膜の蒸発温度は、通常酸化法により形成した酸化膜の場合に比べて低くなる⁽⁵⁰⁾。これは不純物により界面構造が安定化されることに基づくものであるとして理解される。ここに、加熱に伴う酸化膜の組成変化は UPS により⁽⁵⁰⁾、加熱による酸化膜の分解は TDS により⁽⁵¹⁾ 測定された。

9. まとめと今後の課題

SiO_2/Si 界面構造の評価に関する研究は、酸化する前のウェーハの平坦化法、シリコン表面の清浄化法、

界面構造の形成過程、極薄熱酸化膜の膜質制御、酸化膜厚の原子スケール制御、酸化膜厚中の H の分布など 1987 年当時にあげた課題⁽⁵²⁾に関する検討が進み、いよいよ高品質の極薄熱酸化膜形成を具体的に検討できる段階に近づきつつある。しかし、酸化膜中での OH の分布の測定とそれらの量の制御など未解決の課題もある。これらの課題が解決されれば、偏光解析法、赤外～紫外域における反射測定法、透過電子顕微鏡による観察などを用いたプロセスパラメータのリアルタイム測定によるプロセスの精密制御に関する研究^{(53)~(56)}を一歩進めて、酸化反応により生成される酸化物の化学結合状態のリアルタイム測定による SiO₂/Si 界面構造の制御が次の課題の一つとなろう。

ところで、シリコン表面を水素終端することにより常圧下においてもシリコンの清浄表面を保持できることが見出された。その結果、新しいプロセスや表面物理が誕生する機運が熟しつつある。このような新分野を開拓するには常圧下においてリアルタイムで測定可能な各種の表面分析器の開発が望まれる。表面分析器ではないが、高純度ガス中の sub-ppb～数百 ppb のレベルの水分などの極微量の不純物分析を常圧下においてリアルタイムで行うことのできる質量分析計 (APIMS; Atomospheric Pressure Ionization Mass Spectrometer)⁽⁵⁷⁾⁽⁵⁸⁾は、その一例である。

(平成 4 年 8 月 20 受付)

文 献

- (1) T. Ohmi: *Extended Abstracts of Intern. Symp. on Semiconductor Manufacturing Technology*, p. 3 (1992)
- (2) K. Tsubouchi, K. Masu, M. Tanaka, Y. Hiura, T. Ohmi, N. Mikoshiba, S. Hayashi, T. Marui, A. Teramoto, T. Kajikawa, & H. Soejima: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **28**, L2075 (1989)
- (3) K. Masu, K. Tsubouchi, Y. Hiura, T. Matano, & N. Mikoshiba: *ibid.*, **30**, L56 (1991)
- (4) K. Tsubouchi, K. Masu, N. Shigeeda, T. Matano, Y. Hiura, & N. Mikoshiba: *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 1221 (1990)
- (5) N. Yabumoto & Y. Komine: *IEICE Trans. Electronics*, **E75-C**, 770 (1992)
- (6) E. H. Nicollian & J. R. Brews: *MOS Physics and Technology* (1982) John Wiley & Sons, New York と引用文献
- (7) F. J. Grunthaner & P. J. Grunthaner: *Materials Science Reports*, **1**, 65 (1986)
- (8) C. R. Helms & B. E. Deal, ed.: *The Physics and Chemistry of SiO₂ and the Si-SiO₂ Interface* (1988) Plenum Press, New York
- (9) 谷口研二・浜口智尋: 電学誌, **108**, 793 (昭 63)
- (10) 服部健雄: 西沢潤一編, 「超 LSI 技術 13 デバイスとプロセスその 3」半導体研究 30, 第 3 章, p. 79 (昭 64) (財)半導体研究振興会
- (11) T. Hattori: *Solid State Electronics*, **33**, 297 (1990)
- (12) T. Hattori: *Thin Solid Films*, **206**, 1 (1991)
- (13) 服部健雄: 宮崎栄三編, 「表面科学の基礎と応用」, 日本表面科学会設立 10 周年記念, III 応用編, 第 2 章, 第 5 節, p. 732 (平 4)
- (14) 庭野道夫・宮本信雄: 放射光, **4**, 121 (平 3)
- (15) C. R. Helms & B. E. Deal, ed.: *The Physics and Chemistry of SiO₂ and the Si-SiO₂ Interfaces* (1992) Plenum Press, New York, to be published
- (16) T. Morimoto, H. S. Momose, M. Tsuchiaki, Y. Ozawa, K. Yamabe, & H. Iwai: *Extended Abstracts of 1991 Intern. Conf. on Solid Devices and Materials*, Yokohama, p. 23 (1991)
- (17) E. Yablonobitch, D. L. Allara, C. C. Chang, T. Gmitter, & T. B. Bright: *Phys. Rev. Lett.*, **57**, 249 (1986)
- (18) T. Takahagi, I. Nagai, A. Ishitani, H. Kuroda, & Y. Nagasawa: *J. Appl. Phys.*, **64**, 3516 (1988)
- (19) G. S. Higashi, R. S. Becker, Y. J. Chabal, & A. J. Becker: *Appl. Phys. Lett.*, **58**, 1656 (1991)
- (20) P. Jakob, P. Dumas, & Y. J. Chabal: *Appl. Phys. Lett.*, **59**, 2968 (1991)
- (21) S. Watanabe, M. Sigeno, N. Nakayama, & T. Ito: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **30**, 3575 (1991)
- (22) M. Niwano, Y. Takeda, Y. Ishibashi, K. Kurita, & N. Miyamoto: *J. Appl. Phys.*, **71**, 5646 (1992)
- (23) Y. One & M. Tab: *Extended Abstracts of The 1992 Intern. Conf. on Solid State Devices and Materials*, Tsukuba, p. 196
- (24) M. Udagawa, M. Niwa, & I. Sumita: *ibid.*, p. 108
- (25) T. Sugano, J. J. Chen, & T. Hamano: *Surf. Sci.*, **98**, 154 (1980)
- (26) T. Sakurai & T. Sugano: *J. Appl. Phys.*, **52**, 2889 (1981)
- (27) R. Haight & L. C. Feldman: *J. Appl. Phys.*, **53**, 4884 (1982)
- (28) T. Hattori, H. Nohira, Y. Tamura, & H. Ogawa: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31**, L638 (1992)
- (29) H. Nohira, Y. Tamura, H. Ogawa, & T. Hattori: *IEICE Trans. Electronics*, **E75-C**, 757 (1992)
- (30) T. Hattori, H. Yamagishi, N. Koike, K. Imai, & K. Yamabe: *Appl. Surf. Sci.*, **41/42**, 416 (1989)
- (31) H. Yamagishi, N. Koike, K. Imai, K. Yamabe, & T. Hattori: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **27**, L1398 (1988)
- (32) V. A. Yakovlev & E. Irene: *J. Electrochem. Soc.*, **139**, 1450 (1992)
- (33) V. A. Yakovlev, Q. Liu, & E. A. Irene: *J. Vac. Sci. Technol.*, **A10**, 427 (1992)
- (34) N. Aoto, E. Ikawa, N. Endo, & Y. Kurogi: *Surf. Sci.*, **234**, 121 (1990)
- (35) F. J. Himpsel, F. R. McFeely, A. Taleb-Igrahimi, J. A. Yarmoff, & G. Hollinger: *Phys. Rev.*, **B38**, 6084 (1988)
- (36) F. J. Himpsel, D. A. Lapano-Smith, J. F. Morar, & J. Bevk: reported at 2nd Intern. Symp. on the Physics and Chemistry SiO₂ and Si-SiO₂ Interface, Annual Meeting of 181st Electrochem., St. Louis (1992)
- (37) N. Terada, T. Haga, N. Miyata, K. Moriki, M. Fujisawa, M. Morita, T. Ohmi, & T. Hattori: *Phys. Rev.*, **B46**, 2312 (1992)
- (38) N. Terada, T. Haga, N. Miyata, K. Moriki, M. Fujisawa, M. Morita, T. Ohmi, & T. Hattori: *Appl. Surf. Sci.*, **56-58**, 832 (1992)
- (39) T. Haga, N. Miyata, K. Moriki, M. Fujisawa, T. Kaneoka, M. Hirayama, T. Matsukawa, & T. Hattori: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **29**, L2398 (1990)
- (40) N. Miyata, K. Moriki, M. Fujisawa, M. Hirayama, T. Matsukawa, & T. Hattori: *ibid.*, **28**, L2072 (1989)
- (41) K. Sugiyama, T. Igarashi, K. Moriki, Y. Nagasawa, T. Aoyama, R. Sugino, T. Ito, & T. Hattori: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **29**, L2401 (1990)
- (42) H. Ogawa & T. Hattori: *Appl. Phys. Lett.*, **61**, 577 (1992)
- (43) H. Ogawa & T. Hattori: *IEICE Trans. Electronics*, **E75-C**, 774 (1992)
- (44) H. Ogawa, N. Terada, K. Sugiyama, K. Moriki, N. Miyata, T. Aoyama, R. Sugino, T. Ito, & T. Hattori: *Appl. Surf. Sci.*, **56-58**, 836 (1992)
- (45) F. Rochet, M. Froment, C. D'Anterrosches, H. Roulet, G. Dufour, & R. Calsou: *Solid State Electronics*, **33**, 135 (1990)

- (46) I. Hirose, K. Akimoto, T. Tatsumi, J. Mizuki, & J. Matsui: *J. Crystal Growth*, **103**, 150 (1990)
- (47) T. Ohmi, M. Morita, A. Teramoto, K. Makihara, & K. S. Tseng: *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 2126 (1992)
- (48) M. Morita, T. Ohmi, E. Hasegawa, M. Kawakami, & K. Suma: *Appl. Phys. Lett.*, **55**, 562 (1989)
- (49) M. Morita, T. Ohmi, E. Hasegawa, M. Kawakami, and M. Ohwada: *J. Appl. Phys.*, **68**, 1212 (1990)
- (50) C. Heimlich, M. Kubota, Y. Murata, T. Hattori, M. Morita, & T. Ohmi: *Vacuum*, **41**, 793 (1990)
- (51) Y. Kobayashi, Y. Shinoda, & K. Sugii: *Extended Abstracts of 21st Conf. on Solid State Devices and Materials*, Tokyo, 1989 (Business Center for Academic Societies Japan, Tokyo, 1989) p. 401
- (52) 服部健雄: 応用物理, **56**, 1412 (昭 62)
- (53) H. Z. Massoud, J. D. Plummer, & E. A. Irene: *J. Electrochem. Soc.*, **132**, 1745 and 2685 (1985)
- (54) H. Z. Massoud & J. D. Plummer: *J. Appl. Phys.*, **62**, 3416 (1987)
- (55) E. A. Irene: *Extended Abstracts of 21st (1990 Intern.) Conf. on Solid State Devices and Materials*, Sendai, 1989 (Business Center for Academic Societies Japan, Tokyo, 1989) p. 861
- (56) F. M. Ross & J. M. Bibson: *Phys. Rev. Lett.*, **68**, 1782 (1992)

- (57) Y. Mitsui, H. Kambara, M. Kojima, H. Tomita, K. Katoh, & K. Satoh: *Anal. Chem.*, **55**, 477 (1983)
- (58) 三井泰裕: 応用物理, **56**, 1466 (昭 62)

服 部 健 雄 (正員)

昭和 12 年 3 月 8 日生。34 年 3 月東京工業大学理工学部電気工学科卒業, 36 年 3 月同大学院修士課程修了, 36 年 4 月~48 年 3 月 RCA 基礎研究所研究員, その間 44 年 7 月~45 年 6 月 RCA デービッド・サーノフ・リサーチセンタ客員研究員, 47 年 5 月理学博士 (東京工業大学), 48 年 4 月武蔵工業大学工学部助教授。54 年 4 月同教授, 現在に至る。固体中のプラズマの輸送現象, SiO_2/Si 界面の構造などに関する研究に従事。