ISFET イオンセンサ

勝 部 昭 明*

1. は じ め に

ISFET (Ion Sensitive Field Effect Transistor) は溶液の pH やイオン濃度を測定することのできる微小固体センサである。1970年 Bergverd によって ISFET の原理が発表されてから多くの研究が行われ⁽¹⁾, イオンセンサの他ガスセンサやバイオセンサなど多くの化学センサが開発された。そのうち pH センサなどはすでに実用化されている。ISFET はシリコン集積回路技術を活用した固体センサであるため、従来のガラス電極やイオン選択性電極に比べると、(1)微小化が容易であること、(2)高速にできること、(3)絶縁性の感应膜を使用できること、(4)電子回路を同一基板上に搭載でき多機能化ができること、(5)特性のそろったセンサを大量に生産可能であること、などの特徴を持つ。

このように多くの利点を持つが、一方イオンセンサは溶液の中に入れて使用されるため溶液からの絶縁や腐食などに対する十分な保護が必要となる。このため実用的なセンサを開発するにあたっては、出力の安定化にかかわる研究が必要である。本稿では ISFET イオンセンサの代表的な開発例を示すとともに実用化をターゲットとした研究例を紹介する。

2. ISFET の 構 造

図 1 に ISFET の基本構造を示す。MOSFET のゲート金属をイオン感应物質に置き換えた構造をもつものである。参照電極にバイアスをかけて FET のチャンネルを導通状態にしゲート絶縁膜表面に発生する電圧変化をチャンネルコンダクタ

図 1 ISFET の基本構造。

ンスの変化から測定するものである。ゲート絶縁膜表面にイオン感应材料を薄膜状に固定化することにより種々のイオンセンサが製作できる。

ISFET は溶液中で使うため、素子を溶液から絶縁する必要がある。また溶液からの腐食の防止も重要である。このためセンサの構造や封止のための工夫が必要であり、次のような手法が開発されている。(1)センサ全体を絶縁膜で覆う方法⁽²⁾, (2)PN 接合分離を用いる方法⁽³⁾, (3)SOS 基板や、SIS 基板を使う方法⁽⁴⁾, (4)素子の裏側からドレイン、ソースのコンタクトをとる方法⁽⁵⁾。図 2 はシリコンを針状に加工して先端に ISFET をつくり、全体を絶縁膜で覆った微小センサである。先端が 10 μm 以下のものも作られている。図 3 に接合分離型 ISFET の構造を示す。素子はシリコンから二重の PN 接合で絶縁がとってあり、表側もゲート感应部以外

* 埼玉大学教授；工学部情報システム工学科(〒338 浦和市下大久保255)

ISFET Ion Sensor; Teruaki Katsube (Department of Information and Computer Sciences, Faculty of Engineering, Saitama University, Urawa)

Keywords: ion sensitive field effect transistor, chemical sensor, ion sensitive membrane, semiconductor sensor, solid state chemical sensor, PH sensor

1995年9月7日受理

はポリシリコンで覆われた構造になっている。このため溶液との電気的絶縁は良好で、漏れ電流は1 nA 以下であり電解液中での動作は安定している。図4にSOS基板を用いたISFETを示す。これはISFETが4個集積化されたものであるが、素子の基板側は耐腐食性のサファイアで保護されており溶液中で使うのに適した構造である。図5はSIS(Si/Insulator/Si)基板を使ったものであるが、素子は上側のSiに作り、異方性エッチングにより下側のSiを削りゲートは下側に、ソース・ドレインは上側(溶液に接しない側)にとったものである。SOS構造と同じく素子は中央の絶縁膜で溶液から保護されており、配線がとりやすい構造になっている。

3. pHISFET

pH センサでは感応膜として SiO_2 , Al_2O_3 , Si_3N_4 ⁽⁶⁾, Ta_2O_5 ⁽⁷⁾

図2 微小に加工し全体を絶縁膜で保護したISFET。

図3 接合分離型ISFETの構造。

図4 SOS基板を用いた集積化ISFET。

図5 SIS構造を用いたISFET。

などの絶縁膜が使われる。溶液中では、これらの膜の表面にヒドロキシ基が発生し、これと水素イオンとの平衡反応によって界面電圧が変化する。このゲート電圧の変化が電界効果によってFETのチャネルコンダクタンスを変化させ、出力電流に変換される。絶縁膜には、初期には SiO_2 が使われたが、 SiO_2 はイオン透過性が大きく、応答のドリフトも大きく実用的には問題がある。現在は Si_3N_4 や Ta_2O_5 が最も広く使われている。これらの膜はRFスパッタ法や化学気相成長法(CVD法)で作られる。最近はいずれの欠陥の少ない膜をつくるため、低温で成膜可能な、プラズマCVDや光励起CVD、LPCVD法(低圧CVD法)⁽⁶⁾など新しい方法が使われるようになってきている。これらの方法で作られた Si_3N_4 膜や Ta_2O_5 膜はほぼネルンスト応答を示し、298 KでのpH感度は Si_3N_4 では50~55 mV/pH、 Ta_2O_5 では55~58 mV/pHである。応答速度は数ms程度で極めて早い。出力のドリフトも最近改善されてきており、3.6 ks(1 h)当り0.1 mV以下になっている。

一方ISFETと組合せて使う参照電極も小型化が行われている。しかし従来の銀塩化銀電極の小型化には限界があるため、IC技術と適合性のある参照電極も開発されている。図6はSi基板に異方性エッチングでマイクロプールを作りこの中にKClやハイドロゲルを満たした構造の微小電極である⁽⁸⁾。液側とはポーラスシリコン、または微細孔(10 μm)でコンタクトをとる。容量0.1 mm³のもので、ドリフト0.028 $\mu\text{V/s}$ の特性が報告されている。また全固体センサの製作のためにpH不感応性のISFET(REFET)が研究されている。図7に示すようにISFETとの差を測定するものである。IC技術により特性のそろったFETを作製することによりドリフトや雑音なども相殺できる。参照電極としても、表面電位が2つのFETで打ち消し合うので金属電極を使うことができる。pH不感応性の材料としてバリレン、テフロン、ポリスチレン等が試みられている。ゲートの SiO_2 表面に長鎖アルキルシランを固定化してpH感度をコントロールしようとする試みもある⁽⁹⁾。

現在ISFETは米国、ヨーロッパ、日本で各々数社から市販され、FETの知識が特になくても手軽に使えるようになっている。製品によって若干異なるが簡単な校正を行うことによりpH 1~12で精度0.1~0.01 pH程度の特性を持つ。図8に新電元工業製のpHISFETを示す。

図6 (a) 多孔質, (b) 微小孔, をもつ微小参照電極.

図7 不感応性 ISFET (REFET) を用いた ISFET の差動測定法.

4. 各種の ISFET イオンセンサ

ゲート絶縁膜上にイオン感応性薄膜を固定化することによりさまざまなイオンセンサが開発されている。イオン感応膜の製法には、真空蒸着法やスパッタ法、気相化学成長 (CVD) 法などのドライ法とキャスト法、ディップコート法などのウェット法がある。ドライ法による膜形成技術は半導体技術の発展とともに進歩しており、デバイス製作技術との適合性もすぐれた方法である。しかし高温処理やイオン衝撃を伴うことが多いため扱うことのできる材料の種類が制限され無機系の材料が主となる。これに対し、ウェット法では多種類のイオン感応材料を活用でき、ニュートラルキャリアやイオン交換体を含む有機膜を用いて多くのセンサが提案されている。しかし有機材料をウェット法でゲート絶縁膜につける技術は通常の半導体デバイス製造プロセスとはなじみにくいものであり、その開発のためには解決すべき課題も多い。表1にドライ法で作成されたイオンセンサの例を示す。これらは主に真空蒸着法や高周波スパッタ法で作られている。ただし NAS ガラス膜は金属アルコレート加水分解法⁽²⁾

図8 市販されている pHISFET.

やイオン打ち込み法で作られる。イオン打ち込み法は、Na や Al などを SiO_2 中に打ち込んで絶縁膜表面を改質するものである。この手法によれば、組成の精密な制御が可能で、またイオン感度を組成比によってコントロールすることも可能である⁽¹⁰⁾。

有機材料ではドライ法で作られるものは限られているが、最近カリックスアレンの真空蒸着膜を用いた Na^+ , Co^{2+} センサが報告されている⁽¹⁵⁾。また FET のゲートに Cu を真空蒸着でつけ、TCNQ (テトラシアノキノジメタン) のアセトニトリル溶液に浸して形成した Cu(I)TCNQ を用いた Cu^{2+} イオン ISFET の報告もある⁽¹⁶⁾。

有機膜を用いた ISFET の多くは、ポリマー等の支持膜にイオン感応材料を固定して作られる。この手法によれば、イオン選択性電極で開発された多種の材料が使用可能である。このため、医用や環境計測などを目的として多くのセンサが提案されている (表2 参照)。しかし実用化に関して課題もある。そのうち最も重要な問題はイオン感応膜の安定な固定化である。また IC 技術と適合性のある製膜技術の開発も必要である。この種のセンサは Janata らによって最初に提案されたもので⁽²⁴⁾、有機支持膜としては、可塑剤を含んだポリ塩化ビニル (PVC) が使われた。しかし PVC を用いたイオンセンサは、ゲート絶縁膜との密着性が良くなく、剥離がおきやすい。また固定化膜はきわめて薄いのでイオノフォアや可塑剤が徐々に流出することなどの問題がある。このため寿命に限界がある。これらを解決するために保留性の高いイオン感応膜の研究が活発に行われている。これらの中には、(1)イオン感応膜を機械的に支持する方法、(2)光硬化性の樹脂を用いて架橋する方法、(3)ゲート絶縁膜と密着性のよい有機膜を使う方法、(4)イオン感応材料を化学結合により高分子膜に結合する方法などがある。適当な可塑剤を選ぶことも重要である⁽¹⁷⁾。

また、PVC 膜をゲート絶縁膜である窒化ケイ素膜上に直接コーティングすると、膜中を炭酸ガスや有機イオンが透過して、窒化ケイ素膜近傍での pH 変化により絶縁膜/有機膜界面の電位が変動するという問題がある。この問題を解決するため絶縁膜と有機膜の間に緩衝液を含んだハイドロゲルを介在させた ISFET⁽²⁵⁾ や窒化ケイ素膜上に銀、塩化銀の層を形成させて、その上に PVC 膜をキャストした ISFET が提

表1 ドライ法で作製した ISFET イオンセンサ.

測定イオン	イオン感応膜材料	製 膜 法	文献
Na ⁺	NAS ガラス	イオン打ち込み	10
I ⁻	AgI	真空蒸着	11
F ⁻	LaF ₃	真空蒸着	12
Cu ²⁺	カルコゲナイドガラス	スパッタリング	13
I ⁻ , SCN ⁻	無アルカリ鉛ガラス	スパッタリング	14
Na ⁺ , Co ²⁺	カリックスアレン	真空蒸着	15
Cu ²⁺	Cu(I) TCNQ	真空蒸着	16

表2 有機膜 ISFET イオンセンサ.

測定イオン	イオン感応膜材料	文献
K ⁺	バリノマイシン	5
Na ⁺	ビスクラウンエーテル誘導体	17
Ca ²⁺	非環状ポリエーテルアミド誘導体	18
NH ₄ ⁺	ノナクチン	19
Cl ⁻	テトラセチルアンモニウム塩	17
NO ₃ ⁻	トリドデシルメチルアンモニウム硝酸塩	20
Ag ⁺	チオエーテル環状化合物	21
Ag ⁺ , Co ²⁺ , Cd ²⁺ , Pb ²⁺	カリックスアレン	22
グルコン酸	ドデシルメチルアンモニウム・グルコン酸	23

案されている.

図5は異方性エッチングを用いて, 機械的に有機膜を支持する構造としたものである⁽⁵⁾. 張合せ基板を用いてゲートを裏側に作って安定性の向上が同時に図られている. PVCにかわる材料として, シリコンゴム⁽¹⁹⁾やポリウレタン⁽²⁶⁾, 漆⁽²⁰⁾などを膜材料に用いた ISFET が提案されている. これらはゲート絶縁膜との密着性がすぐれた材料である. 例え

ばシリコンゴム中にイオノフォアとしてノナクチンを固定化したアンモニアセンサは, $10^{-2} \sim 10^0$ mol/m³ の範囲において感度 52 mV/pNH₄⁺ で, FIA 測定にも使用でき約 5.2 Ms (2ヶ月)以上にわたって安定であった⁽¹⁹⁾. ポリウレタン⁽²⁶⁾を用いた ISFET では, 光架橋によりイオノフォアの固定化が行われている. 光架橋性を利用すれば, フォトリソグラフィ技術が使えるため加工性に優れたセンサとなる.

共有結合によってイオン感応膜をゲート絶縁膜に結合したり, イオノフォアを支持膜に固定すれば安定性の向上が期待できる. この研究は分子設計の手法を取り入れようとするもので, 実用的なセンサを開発する立場からも注目されている. イオン感応膜とゲート絶縁膜を結合して安定化をはかった例としては, PVCに少量の OH 基を導入し, 四塩化ケイ素により PVC 膜とゲート絶縁膜とを結合させた例⁽²⁷⁾, PVC のかわりに, ポリ-HEMA (2-hydroxyethyl methacrylate)を用い, ゲート絶縁膜表面をオルガノシロキサンを介してイオン感応膜と光化学反応で結合した K⁺ センサ⁽²⁸⁾などがある. ゲート絶縁膜上にポリ-HEMA, ポリシロキサン, イオノフォアを順次化学結合で固定した K⁺ センサも開発されている⁽²⁹⁾. 図9にポリシロキサンによるイオノフォアとポリ-HEMA の結合状態を示す.

5. ISFET バイオセンサ

ISFET のゲート絶縁膜上に酵素や抗体, 微生物などを固定化したバイオセンサが開発されている. バイオセンサは生物体の有する分子認識機能や化学反応触媒反応を利用するセンサであり, 高感度で選択性にすぐれたセンサとなる. ISFET を用いることにより, 小型化, 集積化などが可能と

図9 ゲート上に固定された有機膜(p-HEMA)に結合された K⁺ イオノフォア.

なるので臨床計測などで多くの用途がある。一方酵素や抗体は活性が失われやすく、使用する量もわずかであるから安定に固定化する技術が重要である。これまでに酵素センサでは、尿素⁽⁹⁾、グルコース⁽³⁰⁾、ペニシリン、アセチルコリン⁽³¹⁾、アルコール⁽³²⁾などのセンサが開発されている。尿素センサでは、酵素としてウレアーゼを用いる。尿素はウレアーゼによって次式のように加水分解され pH が変化する。

尿素センサはこの pH 変化を ISFET で検出している。FET 酵素センサでは、pH 変化を測定するものが多いが、アンモニアの濃度変化を測定する尿素センサや溶存酸素を測定するグルコースセンサも報告されている⁽³³⁾。酵素の固定化には、アルブミンを固定化マトリックスとしてグルタルアルデヒドで架橋する方法が広く用いられている。安定性を向上するため、酵素をゲート絶縁膜表面に化学的に固定化する方法⁽⁹⁾や、ポリビニルブチラル膜等の新しいポリマーを使う方法も提案されている⁽³⁴⁾。高温でも失活しない好熱性の酵素を用いて安定性の向上をはかったセンサもある⁽³⁵⁾。

集積化センサを作製するには、ゲート絶縁膜上の微小面積に均一な酵素膜をつけるパターンニング技術が重要となる。図

図10 ISFET グルコースセンサ。

10に SOS 基板を用いた ISFET 酵素センサの構造を示す⁽³⁶⁾。一つのチップ上に 2 種類の ISFET と金電極が集積化されたものである。2 個の ISFET の 1 個は GOD (グルコースオキシダーゼ) を固定化したグルコースセンサであり、もう 1 つは酵素を含まないアルブミン膜がコートされたものである。金を参照極として使い、2 つの FET の応答の差をとることによってグルコース濃度の測定を行うものである。GOD 膜のパターニングはリフトオフ法で行う。まずフォトリソで半導体表面をコートし、ゲート表面に窓をあける。その上から架橋剤を含んだ酵素溶液をスピスコートする。酵素の架橋が終わった後、有機溶媒でフォトリソを溶かし、同時に不必要な酵素膜を取り除く。この方法によれば微細なパターンニングが可能である。酵素膜自身に光硬化性のレジストを付加してパターンニングする方法も提案されている⁽³⁰⁾。

6. 溶存ガスセンサ

CO₂ や O₂ などの溶存ガスセンサも ISFET を用いて開発されている。CO₂ センサとしては、図11に示すように、ガス透過膜と pHISFET を組合せた構造のセンサが実用化されている。ゲート絶縁膜上に直接ガス透過膜を固定化した CO₂ センサも報告されている。

O₂ ガスセンサでは、LaF₃ 薄膜を使うもの⁽³³⁾や、O₂ を還元し、この時生じる pH 変化を ISFET で測定するものなどが報告されている⁽³⁷⁾。

7. ISFET の応用

ISFET は、特に微量なサンプルによる計測や高速応答性を生かした新しい応用に期待がかけられている。応用分野も臨床計測や環境計測など多方面にわたっている。特に臨床計測用オンライン計測システムは、安定性や自動校正法、測定の高速度化、生体適合性などについて多くの報告がある。また ISFET の高速応答性を活用したフローインジェクション分析システムが種々の応用を目的として開発されている。最近ではマイクロポンプを一体化した自動分析システムも報告されている⁽³⁹⁾。

具体的な応用例としては、まず血液成分の分析に皮膚からの吸引によって採取される生体液を用いたセンサが開発され

図11 pHISFET とガス透過膜を組合せた pCO₂ センサの構造⁽⁴⁰⁾。

ている⁽³⁸⁾。微量(5 mm³)な生体液を自動的に吸引、採取、測定、分析ができるシステムになっている。また微生物の代謝による pH 変化を ISFET で測定する微生物測定用のセンサ、義歯に埋め込み口腔内歯垢中での pH 測定を行う虫歯研究用システム、ISFET を pH モニターに用いた酸化還元滴定実験システム、水耕栽培における水質管理システム、などが開発されている。また熱帯魚などの水槽の水質管理にも使用されている。

その他環境計測のためのセンサとして、酸性雨測定に使える pH センサ、硝酸センサが ISFET で開発されている⁽²⁰⁾。また農薬汚染の監視を目的とした殺虫剤のセンサが酵素(アセチルコリン)センサの活性疎外効果を用いて開発された⁽³¹⁾。

8. お わ り に

ISFET の研究報告は、1980年代を中心に膨大な数にのぼる。それに対応して多数のイオンセンサが開発され、その応用にも多くの期待がかけられた。これらの一部はすでに実用化されており、新しい応用分野も開拓されつつあるが、期待の大きさに比べれば実用化されたものはまだそれほど多くない。広い応用につながるためには、現在応答の安定化にかかわる研究が最も重要である。そのためには応用分野の研究と同時にセンシング機構の解明やイオン感応膜の安定な固定化等にかかわる基礎的な研究が必要である。このような研究は、現在日本よりはむしろ欧米で地道な研究が続けられている。ISFET の初期の開発には日本が大きな貢献をしており、技術の蓄積もあるため、日本での研究の活性化も期待したい。

文 献

- (1) P. Bergveld: IEEE Trans. Biomed. Eng., **17**(1970), 70.
- (2) 松尾正之, 江刺正喜: 応用物理, **49**(1980), 586.
- (3) 伊藤善孝: CHEMICAL SENSORS, **9**(1993), 53.
- (4) 栗山敏秀, 木村 純, 川名美江: 信学技報, **ED84-158**(1985), 19.
- (5) H. Yagi and T. Sakai: Sensors and Actuators B, **13-14**(1993), 212.
- (6) K. Chen, G. Li, H. Lu and L. Chen: Sensors and Actuators B, **12**(1993), 23.
- (7) M. Klein: Sensors and Actuators, **17**(1989), 203.
- (8) A. van den Berg, A. Grisel, H. H. van den Vlekert and N. F. de Rooji: Sensors and Actuators, **B1**(1990), 425.
- (9) P. Clechet, N. Jaffrezic-Renault and C. Martelet: *Chemical Sensor Technology*, Kodansha LTD(Tokyo), Vol. 4, (1992), 205.
- (10) T. Ito, H. Inagaki and I. Igarashi: IEEE Trans. Electron Devices, **ED-35**(1988), 56.
- (11) M. J. Schoning, M. Bruns, W. Hoffmann, B. Hoffmann and H. J. Ache: Sensors and Actuators B, **15-16**(1993), 192.
- (12) W. Moritz, B. H. van der Schoot, N. F. de Rooji, H. H. van den Vlekert and H. C. G. Ligtenberg: Sensors and Actuators B, **13-14**(1993), 217.
- (13) Yu. A. Tarantov, Yu. G. Vlasov, Yu. A. Mesentsev and Y. L. Averyanov: Sensors and Actuators, **B1**(1990), 390.
- (14) T. Nomura and K. Masui: Bull. Chem. Soc. Jpn., **65**(1992), 2338.
- (15) A. Bouazizi, H. Maaref, N. Jaffrezic-Renault, R. B. Chaabane, M. Gamoudi and G. Guillaud: Digest of Technical Papers Transducers'95-Eurosensors K, 490-PD12, (1995), 974.
- (16) S. Wakida, Y. Kohigashi, K. Higashi and Y. Ujihira: Digest of Technical Papers Transducers'95-Eurosensors K, 475-D12, (1995), 925.
- (17) K. Tsukada, Y. Miyahara, Y. Shibata and H. Miyagi: Sensors and Actuators B, **2**(1990), 291.
- (18) S. Wakida, M. Yamane and K. Hiirō: Sensors and Actuators, **2**(1988), 107.
- (19) S. Ufer and K. Cammann: Sensors and Actuators B, **7**(1992), 572.
- (20) 脇田慎一: センサ技術, **12**, No. 8 (1992), 33.
- (21) Z. Brzozka, P. L. H. M. Cobben, D. N. Reinhoudt, J. J. H. Edema, J. Buter and R. M. Kellogg: Anal. Chim. Acta, **273**(1993), 139.
- (22) P. L. H. M. Cobben, R. J. M. Egberink, J. G. Bommer, P. Bergverd, W. Verboom and D. N. Reinhoudt: J. Am. Chem. Soc., **114**(1992), 10573.
- (23) 日色和夫, 向井 浩, 脇田慎一, 丸亀和雄: BUNSEKI KAGAKU, **42**(1993), 509.
- (24) S. D. Moss, J. Janata and C. C. Johnson: Anal. Chem., **47**(1975), 2238.
- (25) W. P. R. V. Stauthamer, J. F. J. Engbersen, W. Verboom and D. N. Reinhoudt: Sensors and Actuators B, **17**(1994), 197.
- (26) A. Bratov, N. Abramova, V. Munoz, C. Dominguez, S. Alegret, J. Bartoli and Yu. Vlasov: Digest of Technical Papers Transducers'95-Eurosensors K, 222-PD6, (1995), 874.
- (27) D. J. Harrison, A. Teclemariam, L. L. Cunningham: Anal. Chem., **61**(1989), 246.
- (28) M. Battilotti, R. Colilli, I. Giannini and M. Giongo: Sensors and Actuators, **17**(1989), 209.
- (29) Z. Brzozka, H. A. J. Holterman, G. W. N. Honig, U. H. Verkerk, H. H. van den Vlekert, J. F. J. Engbersen and D. N. Reinhoudt: Sensors and Actuators B, **18-19**(1994), 38.
- (30) Y. Hanazato, M. Nakako, S. Shiono and M. Maeda: IEEE Trans. Electron Devices, **36**(1989), 1303.
- (31) H. Sakai, N. Kaneki and H. Hara: Sensors and Actuators B, **13-14**(1993), 578.
- (32) T. Kullick, U. Bock, J. Schubert, T. Scheper and K. Schugerl: Anal. Chim. Acta, **300**(1995), 25.
- (33) T. Katsube, T. Kubota, M. Shimizu, N. Matayoshi, N. Miura and N. Yamazoe: Jpn. J. Appl. Phys., **30**(1991), L871.
- (34) M. Gotoh, E. Tamiya and I. Karube: Sensors and Materials, **1**(1988), 25.
- (35) 川辺 健, 飯田武揚, 野口文雄, 三田村 孝, 勝部昭明, 富田耕右: 日本化学会誌, **1987**(1987), 1719.
- (36) T. Kuriyama: Digest of Technical Papers Transducers'95-Eurosensors K, 108-C1 (1995), 447.
- (37) C. S. Kim, D. H. Kwon and B. K. Sohn: Digest of Technical Papers Transducers'95-Eurosensors K, 472-PD11(1995), 913.
- (38) 兼吉昭雄, 村上志緒, 西田時次, 岩崎博信, 萱嶋信介, 荒井恒憲, 菊地 真: 信学技報, CPM95-27.
- (39) W. Gumbrecht, W. Schelter, B. Montag, M. Rasinski and U. Pfeiffer: Sensors and Actuators, **B1**(1990), 477.
- (40) 脇田慎一: 絶縁体材料, 「センサー材料のやさしい知識」, 春田正毅, 鈴木義彦, 山添 昇編, オーム社, P. 133(1995).