小特集 I. 気相合成ダイヤモンド薄膜の最近の動向

圧力センサー

—半導体ダイヤモンド薄膜の歪み抵抗効果—

北 畠 真*, 出 口 正 洋*

Pressure Sensors

—Piezoresistive Properties of p-Type CVD Diamond Films—

Makoto KITABATAKE* and Masahiro DEGUCHI*

Key Words : Diamond Films, p-Type, Microwave Plasma CVD, Pressure Sensors

良好な p 型半導体ダイヤモンド多結晶薄膜を形成するための CVD 成長条件の最適化と、最適化された B ドープ p 型半導体ダイヤモンド薄膜を用いた応用として、歪み抵抗素子および圧力センサーについてその形成方法と特性について概説する。

1. はじめに

ダイヤモンドは、新しい高機能電子デバイスを実現する次世代の半導体材料として注目されている。これはダイヤモンドの有する優れた電氣的・機械的特性に起因するものである。優れた物性値としては、例えば広いバンドギャップ(5.5 eV)、高い絶縁破壊電界(3.5×10^6 V/cm)¹⁾、高い電子・ホール移動度(> 1200 cm²/Vs)²⁾、高い熱伝導度(~ 20 W/cmK)³⁾、高いヤング率($E \sim 1 \times 10^{12}$ N/m²)⁴⁾などが挙げられ、高い化学的・機械的安定性をも兼ね備えている。上記物性が生かされる電子デバイスへの応用としては、大きな電流を制御する高耐圧のパワー素子、高速動作による高周波素子、高温・高圧下でも動作する半導体素子・センサーなどの、Si などの従来の半導体材料を用いた素子では適応不可能な領域での展開が期待される。

上記応用の実現のためにはダイヤモンド薄膜の合成技術の進展が不可欠で、CVD 成長^{5)~7)}が広く研究されている。半導体ダイヤモンド CVD 薄膜を応用したセンサーとして、放射線センサー⁸⁾・光センサー⁹⁾・温度センサー^{10), 11)}・圧力センサー^{12)~14)}などが報告されている。

この圧力センサーは、Si や Ge などの従来の半導体材料のセンサー¹⁵⁾では計測できない高温・放射線影響下・反応性雰囲気下での圧力の計測を可能とする。半導体特性が充分制御されたダイヤモンド半導体薄膜の成長技術の確立により達成されたダイヤモンド圧力センサー^{16)~19)}について、本論文で詳細を議論する。具体的には、ダイアフラム構造の中央部分の表面に、B ドープ p 型半導体ダイヤモンド薄膜の抵抗体を形成し、圧力センサーを構成した。ダイアフラム部分への圧力印可により、ダイアフラムが変形し、p 型半導体ダイヤモンド薄膜抵抗体に歪みが加わり、歪み抵抗効果により電気抵抗値が変化し、圧力が高感度で計測できた。半導体ダイヤモンドの歪み抵抗効果を利用した圧力センサーは、高温高圧下でも動作することも確認された。

2. ダイヤモンド CVD 薄膜

B ドープ半導体ダイヤモンド薄膜を、無機材研型のマイクロ波 CVD 装置⁷⁾を用いて成長させた。CVD 成長のための原料ガスは CO ガスを使用し、キャリアガスとして H₂ ガス、B のドーピングを行うためには B₂H₆ ガスを導入した。典型的な合成条件を表 1 に示す。上記成長条件下での B ドープの p 型ダイヤモンド薄膜の成長速度は、約 0.3 μ m/h であった。圧力センサーを構成する p 型半導体ダイヤモンド薄膜として、7 時間の CVD 成長により約 2 μ m の膜厚の CVD 薄膜を成長させた。

ダイヤモンド CVD 薄膜は、通常半導体薄膜として次

*松下電器産業(株) 中央研究所 (〒619-0237 京都府相楽郡精華町光台 3-4)
Central Research Labs., Matsushita Electric Industrial Co., Ltd. (3-4, Hikaridai, Seika-machi, Soraku-gun, Kyoto 619-0237)

表1 Bドーピング型ダイヤモンド薄膜CVD成長条件

基板	多結晶ダイヤモンド/Si ウェハ
原料ガス	CO/H ₂ /B ₂ H ₆
総ガス流量	110 sccm
CO/H ₂ 比	1.8 %
B/C 比	1000 ppm
ガス圧力	4000 pa
マイクロ波投入電力	300 W
基板温度	900°C

に示す代表的な3つの問題点を有していることが報告されている。

問題点1：表面伝導層

as-grown の状態で表面の電気抵抗が低く、表面導電層を有することが知られている。この表面導電層はp型の半導体層で、低いキャリア移動度を示し^{20),21)}、歪み抵抗効果も小さい。具体的には、as-grown ダイヤモンド薄膜の表面導電層の除去を行わない場合に、ダイヤモンドCVD薄膜表面導電層は活性化エネルギー： ϵ_A は0.05 eV、ホール移動度： μ_h は1 cm²/V・s以下と非常に小さな値をしめし、p型の半導体ダイヤモンドとして十分な歪み抵抗効果が得られず、圧力センサーを形成した場合に感度が著しく低下する。

問題点2：ドーピング濃度

高濃度のBドーピング型ダイヤモンド薄膜は移動度の小さいホールの不純物バンドでの伝導を示し、移動度の大きい本来のホールのバンド伝導とは異なる電気的特性を示す²²⁾。不純物バンドでの電気伝導に関しての歪み抵抗効果は小さい。具体的には10¹⁹ cm⁻³以上の高濃度のBのドーピングを行った場合には、 ϵ_A が0.20 eV以下、 μ_h が10 cm²/V・s以下と小さな値をしめす²⁰⁾。

問題点3：結晶粒界

多結晶のダイヤモンド薄膜は、多数のミクロン以下の結晶粒の繊維構造(columnar structure)により構成されており、高濃度の結晶粒界を含んでいる。結晶粒界におけるキャリアの散乱により移動度は減少し、単結晶に比べて多結晶のキャリア移動度は非常に小さい¹⁷⁾。結晶粒界は歪みを吸収する場合もあり、ダイアフラムの変形により加わるダイヤモンド薄膜抵抗体の実効的な歪みが小さくなる。具体的には、例えば熔融石英基板上に上記条件で多結晶ダイヤモンド薄膜を成長させた場合には結晶粒界の影響が顕著になり、 ϵ_A は0.15 eV、 μ_h は1 cm²/Vと小さな値をしめした。

上述の3つの問題点は、4章に詳説するようにダイアフラム表面に形成されるp型半導体ダイヤモンド薄膜

の歪み抵抗効果により機能する圧力センサーの感度を著しく低下させる。注意深い考察の結果、上記表1に示したCVD成長条件を最適化し、上記3つの問題点を克服し、感度の高い半導体ダイヤモンド薄膜圧力センサーを実現することができた。それぞれの問題点の考察と克服方法を次に示す。

問題点1：表面伝導層

as-grown のダイヤモンド薄膜をCVD成長後に酸素プラズマ処理し表面導電層をエッチングして除去することにより、本来のBドーピング型半導体ダイヤモンドの電気伝導を得た。酸素プラズマ処理は、酸素雰囲気5.3 paに13.56 MHz・100 Wの高周波を印可しプラズマ放電を励起し、酸素プラズマ中に3分間試料を設置することにより行った。

問題点2：ドーピング濃度

不純物バンドでの電気伝導は、Bドーピング型半導体ダイヤモンド薄膜に関しては、10¹⁹ cm⁻³以上の高濃度のドーピングを行った場合に観測されるため、10¹⁸ cm⁻³レベルのドーピング濃度のCVD成長ダイヤモンド薄膜を形成する必要がある。我々のダイヤモンドCVD成長条件では、ドーピングガスとしてB₂H₆を導入し、炭素源であるCOガスとのB/C比を1000 ppmに設定することにより、3×10¹⁸ cm⁻³のBがドーピングされたダイヤモンド薄膜が成長できた。ここでBのドーピング濃度はSIMS(Secondary Ion Mass Spectroscopy)により分析されたダイヤモンド結晶中のB濃度である。

問題点3：結晶粒界

ドーピング無しの多結晶のダイヤモンド成長層をSi基板表面に20 μm成長させた基板を用いて、その表面に上記Bドーピング型ダイヤモンド薄膜を成長させ、圧力センサーを構成する抵抗素子として用いた。上記多結晶ダイヤモンド基板は、研磨されて<0.1 μmの表面荒さに制御されている。ダイヤモンドのCVD成長に先立って、多結晶ダイヤモンド基板表面を硫酸とイオン交換水で洗浄した。多結晶ダイヤモンド基板の表面に現れるそれぞれのグレイン表面へのダイヤモンドCVD成長は、単結晶表面へのホモエピタキシャル成長と同等で、ミクロには良好なエピタキシャル成長ダイヤモンドCVD薄膜が形成されと考えられ、これらの研磨された多結晶ダイヤモンド基板上に成長させたダイヤモンド薄膜は、上述の多結晶ダイヤモンド薄膜の粒界の影響が小さく、単結晶ダイヤモンド基板上に成長させたホモエピタキシャル薄膜との電気的特性の差が小さかった。

上述の方法により問題点が克服され、圧力センサーの抵抗体として最適化され、表1の条件でCVD成長させたBドーピング型ダイヤモンド薄膜の電気的特性について次章で詳説する。

3. Bドーピング型ダイヤモンド薄膜の電気的特性

as-grownダイヤモンド薄膜の表面導電層は、すべての電気的特性評価の前に、前述の酸素プラズマ処理により取り除かれた。この処理済み基板表面にAu/Ti電極を電子ビーム蒸着により形成し、p型半導体ダイヤモンド薄膜に対するオーミック電極を形成した。ドーピングを行わないダイヤモンド薄膜の電気抵抗は $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上で絶縁体に近い。上記条件でBのドーピングを行い成長させたp型半導体ダイヤモンド薄膜は、電気抵抗がアンドープのダイヤモンド薄膜に比べて7桁以上も小さい値をとり、電気伝導性の薄膜となっていた。上記オーミック電極を用い、200から455 Kの間で温度を変化させて、van der Pauw法によりホール効果を測定し、電気抵抗率 ρ 、キャリア密度 p 、ホール移動度 μ_h を求めた。上述の問題点1, 2, 3の影響で、最適化前には、0.20 eV以下の小さな ϵ_A 、 $10 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 以下の小さな μ_h が計測された。しかし、問題点1, 2, 3が前章で述べたごとく克服され、表1に示した条件に最適化された結果、次に示すような $\epsilon_A = 0.31 \sim 0.33 \text{ eV}$ 、 $\mu_h = 36 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ のリーズナブルな値を示す、多結晶ダイヤモンドCVD薄膜が成長できた。

図1 表1に示した最適化された条件で成長させたBドーピング多結晶ダイヤモンドCVD薄膜(●)および単結晶ダイヤモンド基板上に成長させたホモエピタキシャルダイヤモンドCVD薄膜(○)の電気抵抗率 ρ の温度 T 依存

図1に、表1に示した最適化された条件で成長させたBドーピング多結晶ダイヤモンドCVD薄膜および単結晶ダイヤモンド基板上に成長させたホモエピタキシャルダイヤモンドCVD薄膜の電気抵抗率 ρ の温度依存を示す。図1で横軸は絶対温度 T の逆数とした。多結晶ダイヤモンドCVD薄膜・単結晶ホモエピタキシャルダイヤモンドCVD薄膜ともほぼ直線に乗る温度変化を示し、どちらの直線の傾きもほぼ同じであり、この場合の活性化

図2 図1の試料と同じ多結晶(●)および単結晶(○)ダイヤモンドCVD薄膜のキャリア密度 p の温度 T 依存

図3 図1の試料と同じ多結晶(●)および単結晶(○)ダイヤモンドCVD薄膜のホール移動度 μ_h の温度 T 依存

エネルギー ϵ_A は0.31~0.33 eVであった。この活性化エネルギーは、ダイヤモンド中のBアクセプターの不純物単位と一致しており²⁾、測定された温度範囲での電気伝導を司る主なキャリアは、Bアクセプターに起因するホールのバンド伝導であると考えられる。

図2, 3は、図1の試料と同じ多結晶および単結晶ダイヤモンドCVD薄膜のキャリア密度 p 、ホール移動度 μ_h の温度依存である。300 Kにおける p は、多結晶が $7 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 、単結晶が $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ であり大きな差はない。多結晶ダイヤモンド基板のそれぞれのグレイン表面に成長するダイヤモンド薄膜は、ミクロには単結晶表面に成長するダイヤモンド薄膜と同等の物であると考えられる。一方、300 Kにおける多結晶の μ_h は $36 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ で、単結晶の μ_h の1/10程度の値を示す。これは、電気伝導パス中に存在する多結晶グレインの結晶粒界の影響によると考えられるが、上記問題点1, 2, 3による特性劣化の場合の μ_h の値に比べれば3倍以上の良好な値である。この高性能半導体多結晶ダイヤモンドCVD薄膜を用いて、次章で述べるように圧力センサーを形成し、高い歪み抵抗効果が確認された。

4. 圧力センサーの形成

歪み抵抗効果は、電気抵抗が、印可される歪みによって変化する現象で、SiやGeなどの半導体材料について主に研究されてきた¹⁵⁾。電気抵抗の変化は、p型半導体材料の価電子帯の構造が歪みにより変化することに起因することが報告されている²³⁾。十分な歪みを抵抗素子に

与えるために、通常ダイアフラムやカンチレバー構造の表面に歪み抵抗素子が形成される。図4に示すような円形のダイアフラムの場合、ダイアフラム表面でのradial strain $\epsilon_r(r)$ とtransverse strain $\epsilon_t(r)$ は、次式のように表される。

$$\epsilon_r(r) = \frac{3P}{8Et^2} \{a^2(1+\nu) - r^2(3+\nu)\} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\epsilon_t(r) = \frac{3P}{8Et^2} \{a^2(1+\nu) - r^2(1+3\nu)\} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 r はダイアフラムの中心からの距離、 a はダイアフラムの半径、 t はダイアフラムの厚み、 ν はダイアフラムの構成材料のポアソン比、 E は上記材料のヤング率、 p はダイアフラムの表面と裏面の圧力差である。 $\epsilon_r(r)$ と $\epsilon_t(r)$ は、ダイアフラムの中心($r=0$)において共に最大値をとり、

$$\epsilon_r(0) = \epsilon_t(0) = \frac{3a^2(1+\nu)}{8Et^2} P \quad \dots\dots\dots(3)$$

となる。歪み抵抗素子材料の感度を表すゲージ率: K は、電気抵抗の変化率($\Delta R/R_0$)を印可した歪み ϵ で割った値と定義され、

$$K = \frac{\Delta R/R_0}{\Delta L/L_0} = \frac{\Delta R/R_0}{\epsilon} \quad \dots\dots\dots(4)$$

のように表される。ここで、 $\Delta L/L_0$ は歪み抵抗素子の長さの変化率である。歪み抵抗素子の歪の関数としての $\Delta R/R_0$ は、次に示すような二つの項、歪み抵抗素子の形状の変化に起因する項 $(1+2\nu)\epsilon$ と、歪み抵抗素子の構成材料の電気抵抗変化の項 $(\Delta\rho/\rho_0)$ で表される。

$$\Delta R/R_0 = (1+2\nu)\epsilon + \Delta\rho/\rho_0 \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここで、歪み抵抗効果を有する半導体材料の電気抵抗変化は主に上式の第二項 $(\Delta\rho/\rho_0)$ で決まり、半導体材料の価電子帯の構造が歪みにより変化し、p型半導体の電気抵抗を変化させると考えられる。上記電気抵抗と歪みとの関係から求められたp型Siのゲージ率 K は150程度と報告されている¹⁹⁾。一方、ダイアフラムやカンチレバー上に形成されたBドープp型多結晶ダイヤモンドの K は6~300、ホモエピタキシャル単結晶ダイヤモンドの場合は550以上のゲージ率が室温下で報告されている^{12)~14), 24), 25)}。本報告では、後述のように室温で1000程度のゲージ率を確認した。

2章, 3章で述べたBドープp型半導体ダイヤモンド薄膜を用いて、ダイアフラム上に図4に示したように歪み抵抗素子を形成した。図4にあるように、ダイアフラムの歪み量が最も大きくなる中央部に、センサーとして機能するダイヤモンド薄膜抵抗素子が配置されている。リソグラフィー技術により、いくつかの余分なダイヤモンド抵抗素子も同時に形成した。下地のダイヤモンド/Si基板は絶縁性であり、それぞれのダイヤモンド薄膜抵抗素子の間の電気抵抗は $10 \text{ G}\Omega$ 以上ありそれぞれ絶

図4 円形のダイアフラム上に形成されたp型ダイヤモンド薄膜歪み抵抗素子によりれた圧力センサー

図5 ダイヤモンド歪み抵抗素子の形成方法の概略

縁されていた。これらのダイヤモンド薄膜抵抗素子のうち、歪みの影響を受けない位置に配置されている抵抗素子は、電気抵抗の温度変化分をモニタするためのリファレンスとして用いることもできる。

ダイヤモンド歪み抵抗素子の形成方法の概略を図5に示す。Bドーピングダイヤモンド薄膜の成長後、その表面に3 μm の膜厚のAl薄膜を形成し、フォトリソグラフィ/エッチング技術を用いてAl薄膜をパターンニングし、ダイヤモンド薄膜のパターンニングをするためのエッチングマスクとして用いた。上記Alマスクの上から酸素プラズマのRIE(reactive ion etching)を用いてエッチングすることによりダイヤモンド薄膜歪み抵抗素子を形成した。この場合の一般的RIEの条件は13.56 MHzのRFパワー150 W、酸素圧力5.3 paであり、ダイヤモンド薄膜のエッチングレートはAlマスクに比べて4倍大きく2 $\mu\text{m}/\text{h}$ であった。p型ダイヤモンド薄膜のパターンを形成した後、Alマスクを取り除き、圧力センサーの歪み抵抗素子部分として、幅50 μm ・長さ500 μm 厚さ2 μm のダイヤモンドの抵抗素子を形成した。このダイヤモンド抵抗素子の両端はボンディングパッドとして広いダイヤモンド薄膜が残されており、この表面にフォトリソでパターンを形成し、Au/Tiオーミック電極を形成した。最後に、ダイヤモンド抵抗素子の下に当たるSi基板を、裏面からエッチングして表面の400 μm だけ残し、2mm直径のダイアフラム構造を形成した。

図6 高圧ガスチャンバー内に設置された、Bドーピング型ダイヤモンド薄膜歪み抵抗素子圧力センサー

図7 圧力 p 印可時の上記歪み抵抗素子の電気抵抗の変化率 $\Delta R/R_0$

測定温度が27, 100, 150, 200 $^{\circ}\text{C}$ の場合の温度依存性も同時に示した

5. Bドーピングp型ダイヤモンドCVD薄膜の歪み抵抗効果と圧力センサー感度

ダイヤモンド/Si基板に形成されたダイアフラム上に構成されたBドーピングp型ダイヤモンド薄膜歪み抵抗素子を図6のように高圧ガスチャンバー内に設置し、圧力センサー感度および歪み抵抗効果を評価した。高圧ガスチャンバーは200 $^{\circ}\text{C}$ 程度までは昇温可能で、歪み抵抗効果の温度依存性も評価できる²⁶⁾。図7に圧力 p 印可時の上記歪み抵抗素子の電気抵抗の変化率 $\Delta R/R_0$ を示す。測定温度が27, 100, 150, 200 $^{\circ}\text{C}$ の場合の温度依存性も同

図8 ゲージ率 K の温度 T 依存

時に示した。圧力 p の印可により、ダイアフラム表面に構成されている歪み抵抗素子に圧縮歪みに加わり、歪み抵抗素子の電気抵抗 R が減少する。 p に対する $\Delta R/R_0$ の変化の傾きは、室温では $0.30\%/1\text{Mpa}$ 、 200°C では $0.25\%/1\text{Mpa}$ 程度であった。圧力に対するダイアフラムの歪みを式(3)(4)を用いて transverse strain を無視して計算し、計算された歪みと電気抵抗の変化率から求めたゲージ率の温度依存を図8に示した。異なる圧力(歪み量)に対するゲージ率 K は 20% 程度の変化を含むが、室温におけるゲージ率は 1000 を示した。この値は、Siについて報告されているゲージ率 150 の 6 倍以上にあたる。また、 200°C においても 700 程度の値を示し、Bドーピング型ダイヤモンド CVD 薄膜歪み抵抗素子が、圧力センサー(歪みセンサー)として、広い温度範囲で十分な感度を有していることが確認された。

6. まとめ

ダイヤモンド CVD 成長条件を最適化することにより、問題点1：表面導電層、問題点2：ドーピング濃度、問題点3：結晶粒界を克服し、良好な p 型半導体特性を示す、Bドーピング型半導体ダイヤモンド多結晶薄膜を得た。上記最適化された Bドーピング型半導体ダイヤモンド多結晶薄膜を、フォトリソグラフィ/RIE 技術を用いてパターンニングし、歪み抵抗素子をダイアフラム上に形成し、圧力センサーを構成した。この Bドーピング型半導体ダイヤモンド多結晶薄膜による歪み抵抗素子のゲージ率は、室温で $K=1000$ を、 200°C の高温下でも $K=700$ を示し、高温下での使用可能な高感度の圧力センサーとしての動作を確認した。

(1999-5-12 受理)

文 献

- 1) G. A. Baraff ; *Phys. Rev.*, A 26, 133 (1964)
- 2) A. T. Collins and A. W. S. Williams ; *J. Phys. C, Solid State Phys.*, 4, 1789 (1971)
- 3) J. E. Graebner, M. E. Reis, L. SeiBles, T. M. Hartnett, R. p. Miller and C. J. Robinson ; *Phys. Rev. B*, 70, 3702 (1994)
- 4) H. J. Mcskimin and p. Andreatch ; *J. Appl. Phys.*, 43, 2944 (1972)
- 5) B. V. Spitsyn, L. L. Boilov and B. V. Derjaguin ; *J. Cryst. Growth*, 52, 219 (1981)
- 6) S. Matsumoto, Y. Sato, M. Kamo and N. Setaka ; *Jpn. J. Appl. Phys.*, 21, L 183 (1982)
- 7) M. Kamo, Y. Sato, S. Matsumoto and N. Setaka ; *J. Cryst. Growth*, 62, 642 (1983)
- 8) D. R. Kania, M. I. Landstrass, M. A. plano, L. S. pan and S. Han ; *Diamond Relat. Mater.*, 2, 1012 (1993)
- 9) L. S. pan, p. pianrtta, D. R. Kania, O. L. Landon, K. V. Ravi and L. S. plano ; *Proc. 1st Int. Symp. on Diamond and Diamond-like Films*, p. 424 (1990)
- 10) J. p. Bade, S. R. Sahaide, B. R. Stoner, J. A. Von Windheim, J. T. Glass, K. Miyata, K. Nishimura and K. KoBashi ; *Diamond Relat. Mater.*, 2, 816 (1993)
- 11) J. G. Ran, C. Q. Zheng, J. Ren and M. Hong ; *Diamond Relat. Mater.*, 2, 793 (1993)
- 12) M. Aslam, I. Taher and A. Masood ; *Appl. Phys. Lett.*, 60, 2923 (1992)
- 13) I. Taher, M. Aslam, M. A. Tamor, T. J. potter and R. C. Elder ; *Sensors and Actuators A*, 45, 35 (1994)
- 14) J. L. Davidson, D. R. Wur, W. p. Kang, D. L. Kinser and D. V. Kerns ; *Diamond Relat. Mater.*, 5, 86 (1996)
- 15) C. S. Smith ; *Phys. Rev.*, 94, 42 (1954)
- 16) M. Deguchi, M. KitaBatake, T. Hirao ; *Proceedings of 6th European Conference on Diamond, Diamond-like and Related Materials 1995, Diamond and Related Materials* 5, p. 728 (1996)
- 17) M. Deguchi, M. KitaBatake, T. Hirao ; *Thin Solid Films*, 267 (1996)
- 18) M. Deguchi, N. Hase, M. KitaBatake, H. Kotera, S. Shima, H. Sakakima ; *Diamond Films and Technology*, 6, (2), 77 (1996)
- 19) M. Deguchi, N. Hase, M. KitaBatake, H. Kotera, S. Shima, M. Kitagawa ; *Diamond and Related Materials*, 6, 367 (1997)
- 20) M. Deguchi, Y. Mori, N. Eimori, Y. Show, M. KitaBatake, A. Hatta, T. Ito, A. Hiraki, T. Izumi and T. Hirao ; *Proc. 2nd Int. Conf. on Application of Diamond Films and Related Materials*, p. 793 (MYU, Tokyo, 1993)
- 21) H. Nakahata, T. Imai and N. Fujimori ; *Proc. 2nd Int. Symp. on Diamond Materials*, Vol. 91-8, p. 487 (The Chemical Society, New Jersey, 1991)
- 22) M. Werner ; *Phys. Stat. Sol. (a)*, 154, 385 (1996)
- 23) Y. Kanda ; *Sensors and Actuators A*, 28, 83 (1991)
- 24) W. Wanlu, X. Jiang and C. p. Klages ; *Chinese Science Bull.*, 40, 209 (1995)
- 25) O. Dorsch, K. Holzner, M. Werner and E. OBermeier ; *Diamond Relat. Mater.*, 2, 1096 (1993)
- 26) M. KitaBatake, M. Deguchi ; *Sensors and Materials*, 11, 1 (1999)