Effect of NO₂ Gas Adsorption on Electrical Properties of Pyrolyzed Polymer

Keisuke Naka Student Member (Ritsumeikan University, rm009994@se.ritsumei.ac.jp)

Takeshi Hashishin Non-member (Ritsumeikan University, hasisin@se.ritsumei.ac.jp)

Jun Tamaki Member (Ritsumeikan University, juntre@se.ritsumei.ac.jp)

Satoshi Konishi Member (Ritsumeikan University, konishi@se.ritsumei.ac.jp)

Keywords : pyrolyzed polymer, gas sensor, NO₂, carbon material

1. Pyrolyzed Polymer

This paper deals with pyrolyzed polymer which is a traditional material in carbon technology but new material in MEMS field. Pyrolyzed polymer has advantages among carbon materials from the aspect of compatibility with MEMS because its structures can be transformed from those of polymer MEMS. This work presents the effect of NO₂ gas adsorption on electrical properties of pyrolyzed polymer.

Fabrication process of the sensor consists of patterning of photoresist and following pyrolysis process. Pyrolyzed polymer derived from photoresist OFPR-800 (Tokyo Ohka Kogyo Co. Ltd.) was used as the absorbent of the sensor. Photolithography of photoresist followed patterning of Cr / Au electrode on insulating Silicon substrate. Pyrolysis process was carried out between 700 °C and 800 °C by taking account of both conductivity control and process compatibility with MEMS.

2. Experimental Results

2.1 Dynamic Response Figure 1 shows the dynamic response of the sensor obtained at 730 °C pyrolysis. Operating temperature and NO₂ concentrations were 150 °C and 2.0 ppm, respectively. The resistance of the sensor drastically decreased when the sensor was exposed to NO₂ gas. The resistance gradually returned to the original value as the ambient was replaced with air. This dynamic response is similar to that of NO₂ gas sensor using carbon nanotubes. The obtained result corresponds to the result of Hall effect measurement, which was indicated that pyrolyzed OFPR-800 is p-type semiconductor. For an advanced understanding about pyrolyzed polymer as absorbent of NO₂ gas sensors, the influence of pyrolysis temperature, NO₂ concentrations and operating temperature on the sensor sensitivity were examined as follows.

2.2 Pyrolysis Temperature Dependence Figure 2 shows pyrolysis temperature dependence on the sensitivity to 4.0 ppm NO₂ gas at 180 °C operation. The sensitivity is defined as shown in eq. 1. R_g and R_a are the resistance in NO₂ gas and in air, respectively. Lower pyrolysis temperature contributes to higher sensitivity. The sensitivity of the sensor pyrolyzed at 700 °C amounted to -22.2 %.

$$\text{Sensitivity} = (R_g - R_a) / R_a \times 100 \quad (1)$$

2.3 NO₂ Concentrations and Operating Temperature Dependence Figure 3 shows the sensitivity of the sensor obtained at 730 °C pyrolysis according to NO₂ concentrations at various operating temperature. High NO₂ concentrations contributes to high sensitivity. The sensitivity of the response to the gas molecule seems to be related to the amount of electron

charge transfer. Above all, it is remarkable that the sensor could detect 0.02 ppm NO₂ gas. In addition, high operating temperature improved the sensitivity to gas mixture of NO₂. high ambience temperature is likely to improve the absorption of gas mixture of NO₂ to pyrolyzed OFPR-800.

From these results, we could understand attractive features of pyrolyzed polymer for gas sensor that low temperature pyrolysis and high operating temperature contribute to higher sensitivity against gas mixture of NO₂.

Fig. 1. Dynamic response of the developed sensor

Fig. 2. pyrolysis temperature vs. sensitivity

Fig. 3. NO₂ concentrations vs sensitivity at various operating temperature

パイロポリマーの電気特性における NO₂ ガス吸着効果

学生員 中 圭介* 非会員 橋新 剛*
正 員 玉置 純* 正 員 小西 聡*

Effect of NO₂ Gas Adsorption on Electrical Properties of Pyrolyzed Polymer

Keisuke Naka*, Student Member, Takeshi Hashishin*, Non-member, Jun Tamaki*, Member,
Satoshi Konishi*, Member

This paper deals with a pyrolyzed polymer as a kind of carbon materials obtained by pyrolysis of polymers. Through a combination of micromachining of polymers and following pyrolysis process, we can obtain pyrolyzed polymer MEMS structures for various applications. This work focuses on the effect of NO₂ gas adsorption on electrical properties of pyrolyzed polymers. The resistance of the sensor is dramatically decreased when the sensor is exposed to the NO₂ gas. It is found that low pyrolysis temperature and high operating temperature contribute to higher sensitivity against gas mixture of NO₂.

キーワード：パイロポリマー，ガスセンサ，NO₂，炭素材料

Keywords : pyrolyzed polymer, gas sensor, NO₂, carbon material

1. はじめに

炭素は化学結合の多様性により多くの同素体を有している。炭素を主成分とする材料は炭素材料と呼ばれ、炭素元素の多様性から様々な特性を示す。炭素材料の研究開発は幾つかの変遷を経ながら行われてきたが、最近の科学技術の発展により炭素材料の可能性が大きく注目を集めている。特にカーボンナノチューブ（CNT）はその特異な構造と突出した特性から、単電子トランジスタや SPM 用の探針、更にはガスセンサなど新しい機能デバイスへの応用研究が盛んに行われている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

炭素材料は炭化水素などの炭素を含有したガスを用いた CVD 法で基板上に堆積させる手法⁽⁴⁾や、有機ポリマー材料を不活性な雰囲気中で熱処理することで生成される。後者はパイロポリマーと呼ばれ、ポリマーを成型加工した後に熱処理を施して所望の形状が得られるという大きな特徴がある。パイロポリマーに関する研究は古くから行われており、中でもポリマー薄膜からのグラファイトフィルムやそれに相当する炭素薄膜の合成に関する研究が数多く報告されている⁽⁵⁾。本研究室はポリマーの成型加工にマイクロ・ナノマシニング技術を利用し、炭素材料としての特性と MEMS としての微小化・アレイ化・集積化という特徴を生かした機能デバイスの実現を目指している⁽⁶⁾。パイロポリマーを

MEMS 分野へ導入するにあたり、その熱処理温度と MEMS プロセス技術との整合性が重要となり、炭素材料の生成においては低温である 1000 °C 以下での生成が必要となる。MEMS 技術を利用したパイロポリマーの応用研究はこれまでに幾つか報告されている。アレイ状に形成した SU-8 の支柱構造を熱処理して得られるパイロポリマーをリチウムイオンバッテリーの電極への利用を目指したもの⁽⁷⁾や、パリレン-C 薄膜を熱処理して得られるパイロポリマーの温度特性を利用したイメージセンサへの応用が報告されている⁽⁸⁾。これらの研究ではパイロポリマーの機能材料としての評価とその応用可能性が提示され始めた段階である。炭素材料の多様性を踏まえると、パイロポリマーのマイクロ機能デバイスへの応用は非常に有望であると考えられる。我々はパイロポリマーの MEMS 材料としての応用可能性を見出すために、MEMS 分野で利用されているポリマー材料から種々の条件でパイロポリマーを生成し、その電気特性や機械特性の評価、更にはパイロポリマーによるマイクロ・ナノ構造体の実現に取り組んできた⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。特性評価を通じてパイロポリマーの特性は温度や湿度などの測定環境の影響を受けやすいことが明らかになった。これはパイロポリマーが様々なセンサ材料として応用可能であることを示している。そこで本研究では、パイロポリマーのガスセンサ材料への応用を取り上げる。本稿ではパイロポリマーによるガスセンサの実現に向けて、パイロポリマーの電気特性におけるガス吸着効果について検討する。被検ガスには代表的な環境基準ガスである二酸化窒素（NO₂）を用いる。

* 立命館大学
〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1
Ritsumeikan University
1-1-1, Noji-higashi, Kusatsu, Shiga 525-8577

2. パイロポリマーによるガスセンサ

〈2・1〉 ガス検出原理 SnO_2 や WO_3 などの金属酸化物半導体による半導体ガスセンサは、厚膜や薄膜状に形成した金属酸化物の両端に電極を設置して構成される。金属酸化物にガスが吸着すると、吸着ガスと半導体の間で電子の授受が生じ、このときの導電率の変化によって被検ガスが検出される⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。大気中や窒素雰囲気中などの基準環境から被検ガスを含有した環境に変化したときのパイロポリマーの導電率変化をモニタリングすることで、パイロポリマーがガスセンサ材料としての機能を果たすと考えられる。

本研究で提案するガスセンサの構成は図1に示すとおりである。電気絶縁を得た基板上に設置した2つの電極間にパイロポリマーのパターンを形成して構成される。パイロポリマーの表面積が大きいほど、被検ガスとパイロポリマー表面の相互作用の影響が強くなると考えられる。そこで本研究では表面積を大きくするために、センサ部には図1のような折り返しパターンを採用した。また折り返し構造によりセンサ抵抗値を大きくすることで、ガス応答時の抵抗値変化の絶対値を大きくすることが出来る。パイロポリマーのパターン形成はマイクロマシーニング技術によるポリマーパターンの形成と、それに引き続く熱処理で実現できる。本研究ではフォトリソグラフィによってパターンニングが可能であるフォトレジスト (OFPR-800 50cp, 東京応化工業株式会社) を熱処理するポリマー材料として用いた。

ここで重要な事項として、パイロポリマーの電気特性と表面構造が挙げられる。パイロポリマーの特性は熱処理するポリマーの組成や熱処理条件に強く依存することが知られている。そこで基板上に形成した薄膜状のパイロポリマ

図1 パイロポリマーによるガスセンサの概略図
Fig. 1. Schematic drawing of the proposed gas sensor with pyrolyzed polymer.

表1 パイロポリマーの熱処理条件

Table 1. Pyrolysis conditions for pyrolyzed polymer.

Pyrolysis temperature	670 °C – 1000 °C
N ₂ flow	1.0 L / min
Ramp rate	10 °C / min
Cooling rate	2.0 °C / min
Holding time	-

ーを用いて、熱処理温度とパイロポリマーの電気特性および表面構造の関係について検証した。熱処理条件は表1に示すとおりである。尚、特性評価は試料を熱処理雰囲気から取り出した後、十分に時間が経過した状態で実施した。

〈2・2〉 パイロポリマーの電気特性 図2に各温度で生成したパイロポリマーの室温における比抵抗を示す。680 °C の熱処理で得られたパイロポリマーの比抵抗は $3.1 \times 10^1 \Omega\text{cm}$ と高い比抵抗を示したが、800 °C の熱処理では $2.4 \times 10^{-2} \Omega\text{cm}$ と飛躍的に減少した。800 °C から 1000 °C での熱処理においては、比抵抗は緩やかに減少する結果となった。800 °C までの熱処理で大きな比抵抗変化が生じていることから、導電性を示し始める温度から 800 °C までの熱処理温度がガスセンサの特性に影響することが考えられる。

また OFPR-800 を熱処理して得られるパイロポリマーのキャリアタイプを検証するためにホール効果測定を実施したところ、1000 °C 以下の熱処理の場合においては正のホール係数を示した。よって本研究で用いるパイロポリマーは p 型の導電型を有していることが示唆された。

〈2・3〉 パイロポリマーの表面構造 各温度で生成したパイロポリマーの表面構造を検討するためにラマン分光分析を実施した。本測定では RENISHAW 製顕微ラマン分光

図2 パイロポリマーの比抵抗と熱処理温度の関係
Fig. 2. The resistivity vs. pyrolysis temperature.

図3 パイロポリマーのラマンスペクトル
Fig. 3. The Raman spectra of pyrolyzed OFPR-800 as a function of pyrolysis temperature.

システム (JRS-SYSTEM2000, Ar レーザー:514 nm) を使用した。

単結晶グラファイトの場合は 1600 cm^{-1} 付近に、ダイヤモンドの場合は 1350 cm^{-1} 付近に鋭いピークを示すことが知られている。図 3 に各温度で生成したパイロポリマーのラマンスペクトルを示す。各薄膜試料とも 1350 cm^{-1} と 1600 cm^{-1} 付近に 2 つのブロードなピークが観測された。よって OFPR-800 を $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下で熱処理して得られるパイロポリマーはアモルファス炭素と結晶性の低い炭素材料が混在している状態であることが示唆される。さらに熱処理温度の上昇とともに、 1600 cm^{-1} 付近のピークの相対強度が明らかに小さくなる結果が得られた。低温熱処理では OFPR-800 の熱分解があまり進行していないために OFPR-800 中に存在しているベンゼン環の形跡に起因して 1600 cm^{-1} 付近のピークが大きくなっていると考えられる。熱処理温度増加に伴い熱分解の進行することで乱層構造が発達し、 1600 cm^{-1} 付近のピークの相対強度が小さくなったと思われる。

3. ガスセンサの製作

上記のとおり本ガスセンサでは大きな表面積と大きな抵抗値を得るために、図 4 に示す折り返し構造を採用した。パイロポリマーのラインパターン幅は $50\text{ }\mu\text{m}$ とし、各ラインのスペースは $90\text{ }\mu\text{m}$ とした。パイロポリマーを用いたガスセンサの製作プロセスは次の通りである。本製作では、厚さ $500\text{ }\mu\text{m}$ 、結晶方位 (100)、抵抗率 $1\text{--}10\text{ }\Omega\text{cm}$ のボロンドープ p 型シリコン基板を使用した。硫酸過水および BHF でシリコン基板を十分に洗浄した後水蒸気酸化を $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$

図 4 パイロポリマーによるセンサ部の概要図

Fig. 4. Schematic drawing of pyrolyzed OFPR-800 absorbent of the gas sensor.

図 5 製作したパイロポリマーによるガスセンサ

Fig. 5. The developed gas sensor with pyrolyzed OFPR-800.

で 3 時間行い、絶縁膜であるシリコン酸化膜を形成した。次に Cr / Au 電極をリフトオフプロセスで形成するためのフォトリソグラフィを行った。その後、真空蒸着により Cr / Au をそれぞれ $4.0\text{ nm} / 110\text{ nm}$ の厚さで堆積した。アセトンおよびエタノール中で超音波洗浄を行い、不要部分のフォトリソレジストと金属膜を除去することで電極パターンの完成となる。引き続きセンサ部となる OFPR-800 のパターンをフォトリソグラフィによって形成した。ワイヤボンディングで Au 線を引き出し、最後に石英チューブ炉内で熱処理を施してパイロポリマーを用いたガスセンサの完成となる。昇温レートなどの諸熱処理条件は基礎特性評価で行った熱処理条件と同様である。製作したガスセンサを図 5 に示す。全体サイズは $4.0\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ とした。

4. ガスセンサの評価実験

〈4.1〉 評価方法 ガス流通系測定装置の概要図を図 6 に示す。本研究では被検ガスとして NO_2 を用いた。製作したセンサ素子は温度コントローラを備えた石英チューブ内に設置する。基準ガスおよび被検ガスはマスフローコントローラとバルブを介して石英チューブに接続している。被検ガスとなる NO_2 の濃度は Air, O_2 および $\text{NO}_2 + \text{N}_2$ の 3 種類のガスの流量比で制御する。このときのトータルガス流量は 100 sccm とした。センサの応答は図 6 に示す回路を使用し、センサ素子に直列に接続したリファレンス抵抗 R_t の電圧変化から測定した。本実験では印加電圧 V_{in} を 1.0 V とした。センサの検出感度は(1)式に示すように、被検ガス導入前後におけるセンサ抵抗値の変化率で定義する。(1)式中の R_{gas} は被検ガス中でのセンサの抵抗値、 R_{air} は空気中でのセンサの抵抗値である。

$$\text{Sensitivity} = (R_{gas} - R_{air}) / R_{air} \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

パイロポリマーによるガスセンサの NO_2 ガスに対する基本的な応答特性の知見を得るために、 $730\text{ }^{\circ}\text{C}$ で熱処理を施したガスセンサを用いて過渡応答曲線を得た。実験は熱処理を行った後、十分に時間が経過した状態で行い、動作温度は $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 NO_2 濃度は 2.0 ppm とした。図 7 に得られた過渡応答曲線を示す。室温におけるガスセンサの抵抗値は $2.3\text{ M}\Omega$ であったが、パイロポリマーは負の抵抗温度係数を有しているために、 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ では $1.54\text{ M}\Omega$ となった。流通ガスを Air 100 sccm から NO_2 混合ガス 100 sccm に切り替えると急激にセンサ抵抗値が減少した。逆に NO_2 混合ガスから Air に切り替えると、センサ抵抗値はゆっくりと元の抵抗値に戻る傾向を示した。 NO_2 ガス分子がパイロポリマー表面で吸脱着することにより、可逆的に電気抵抗が変化していると考えられる。得られた応答曲線は p 型の導電型を示す半導体 CNT による NO_2 ガスセンサの場合と類似した検出特性を示した⁽³⁾。ホール係数評価から OFPR-800 によるパイロポリマーは p 型の導電型であることが示唆されている。よってガス応答特性とパイロポリマーの導電型は整合性のある結果となった。しかしながら、被検ガス導入前のセンサ抵抗値

図 6 実験概要図

Fig. 6. Schematic diagram of experimental set up.

図 7 ガスセンサの過渡応答曲線

Fig. 7. Dynamic response of the sensor.

と Air 置換による NO_2 脱離後のセンサ抵抗値が一致しない結果となった。これは流通ガス中に含まれる O_2 の吸着によって、被検ガス導入前後でパイロポリマーの表面状態が変化したことが影響していると考えられる。今後 O_2 がパイロポリマーに及ぼす影響について検討する必要がある。以上の結果を踏まえて、詳細な応答特性を検証するためにパイロポリマーの熱処理温度、動作温度、 NO_2 濃度の検出感度への依存性について実験を行った。

〈4・2〉 パイロポリマーの熱処理温度の依存性 本評価では大きく比抵抗が変化している 700°C から 800°C の温度範囲で熱処理を施したガスセンサを用いて熱処理温度の依存性を検証した。図 8 に実験結果より得られたパイロポリマーの熱処理温度とセンサ検出感度の関係について示す。熱処理温度が小さくなるにつれて、 NO_2 ガスに対する応答感度は大きくなる傾向を示し、 700°C で熱処理を施した

図 8 センサ検出感度と熱処理温度の関係

Fig. 8. The sensitivity vs. pyrolysis temperature.

図 9 センサ検出感度と動作温度の関係

Fig. 9. The sensitivity vs. operating temperature.

ガスセンサでは抵抗変化率 -22.2% が得られた。しかしながら、熱処理温度が小さくなるにつれてノイズが大きくなり、センサとしての動作が不安定になった。

〈4・3〉 動作温度の依存性 金属酸化物半導体によるガスセンサは動作温度によって検出感度が変化することが知られている。パイロポリマーについても同様の影響が予想されるため、動作温度が検出感度に及ぼす依存性について検証した。本検証では、 730°C 熱処理のガスセンサを使用し、動作温度は室温、 150°C 、 180°C の 3 パターンで行った。図 9 にセンサ検出感度と動作温度の関係を示す。室温動作での検出感度は -3.52% であったが、 150°C では -9.17% 、 180°C では -16.14% と動作温度の増加とともに検出感度が向上した。高い動作温度ほど NO_2 ガス分子とパイロポリマー表面の反応性が増幅され、検出感度が向上したと考えられる。一般的な金属酸化物による半導体ガスセンサの場合は素子を 300°C 程度に加熱する必要がある。対してパイロポリマーによるガスセンサは CNT によるガスセンサと同様に 200°C 以下という比較的低い温度での動作が可能である点が大きな利点といえる。

〈4・4〉 NO_2 ガス濃度の依存性 730°C 熱処理のパイロポリマーによるガスセンサを用いて NO_2 濃度が検出感度に及ぼす影響を検証した。 NO_2 ガス濃度は 0.02 ppm から 4.0

ppm の範囲で実験を行い、動作温度は 150 °C とした。図 10 に実験から得られた NO₂ 濃度とセンサ検出感度の関係を示す。NO₂ 濃度が増加するに伴いセンサ抵抗値の変化は大きくなる傾向を示し、4.0 ppm の場合は-9.17 % となった。さらに本評価では 0.02 ppm という非常に低濃度の場合においても、僅かではあるが-0.82 % の抵抗変化が確認できた。

〈4・5〉 比抵抗と検出感度の関係 図 11 にパイロポリマーの比抵抗と NO₂ の検出感度の関係を示す。検証実験の条件は動作温度 180 °C、NO₂ 濃度 4.0 ppm である。センサ材料であるパイロポリマーの比抵抗が大きいほど NO₂ ガスに対する検出感度が大きいことがわかる。

〈4・6〉 考 察 パイロポリマーは絶縁体であるポリマー材料に熱処理を施して導電材料へと変化する。その過程において、図 2 に示したようにパイロポリマーは 10¹ Ωcm オーダーから 10⁻³ Ωcm オーダーと半導体領域の比抵抗を示す。比抵抗が小さくなるにつれてパイロポリマーの電気特性は金属的な挙動が強くなることが推察され、結果として検出感度が小さくなったと考えられる。逆に大きな比抵抗を有するパイロポリマーほど半導体的な性質を示し、NO₂ ガスに対する検出感度が向上したと考えられる。

図 10 センサ検出感度と NO₂ 濃度の関係

Fig. 10. The sensitivity vs. NO₂ concentrations.

図 11 パイロポリマーの比抵抗とセンサ検出感度の関係

Fig. 11. The sensitivity vs. the resistivity of pyrolyzed OFPR-800.

5. ま と め

本研究ではポリマー材料を熱処理して得られるパイロポリマーのガスセンサ材料への応用に向けて、パイロポリマーの電気特性における NO₂ ガス吸着効果について検討した。700 °C から 800 °C の熱処理で得られるパイロポリマーを用いて NO₂ ガスに対する応答特性を検証したところ、p 型半導体 CNT によるガスセンサの応答特性と類似した結果が得られた。パイロポリマー生成温度と NO₂ ガスに対する検出感度の相関について検討し、低温生成ほど大きな感度が得られた。また動作温度依存性を検討し、パイロポリマーの比較的低温でのガス検出可能性を見出した。さらに本実験では 0.02 ppm という非常に低濃度の NO₂ ガスに対しても抵抗変化が確認できた。

Cantalini らは p 型半導体 CNT によるガスセンサの応答特性として、基準環境を空気とした時、NO₂ の場合はセンサ抵抗値が減少、アンモニア(NH₃)、ベンゼン(C₆H₆)やエタノール(C₂H₅OH)の場合は抵抗値が増加する結果を報告している。更に NO₂ とその他のガスの混合雰囲気においてもセンサ抵抗値が減少し、NO₂ が優先的に CNT 表面に吸着することも報告している⁽¹³⁾。本稿で取り扱ったパイロポリマーと CNT では、p 型導電性を示す点とラマンスペクトルが同様の傾向を示す点において類似性がある。よってパイロポリマーにおいても CNT の場合と同様の傾向が得られることが期待できる。今後、その他のガスとの選択性について検証し、パイロポリマーのガスセンサ材料としての更なる評価に取り組む予定である。

パイロポリマーを MEMS 機能材料として応用するためにはより低温での熱処理が重要となる。本研究で明らかになった低温熱処理が高感度化に寄与する点は、非常に有望な結果であると言える。更なる熱処理温度の低温化と検出感度の高感度化が実現することにより、パイロポリマーのガスセンサ材料への応用が十分に期待できる。

謝 辞

本研究の一部は平成 17 年度科学研究費補助金 (No.17710119)、および文部科学省 21 世紀 COE プログラム「マイクロ・ナノサイエンス・集積化システム」の支援を受けて実施された。

(平成 18 年 1 月 20 日受付, 平成 18 年 11 月 24 日再受付)

文 献

- (1) K. Liu, M. Burghard, S. Roth, and P. Bernier : "Conductance spikes in single-walled carbon nanotube field-effect transistor", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.75, No.16, pp.2494-2496 (1999)
- (2) T. Ono, H. Miyashita, and M. Esashi : "Electric-field-enhanced growth of carbon nanotubes for scanning probe microscopy", *Nanotechnology*, Vol.13, No.1, pp.62-64 (2002)
- (3) W. S. Cho, S. I. Moon, Y. D. Lee, Y. H. Lee, J. H. Park, and B. K. Ju : "Multiwall Carbon Nanotube Gas Sensor Fabricated Using Thermomechanical Structure", *IEEE Elect. Device Lett.*, Vol.26, No.7, pp.498-500 (2005)

- (4) H. A. Yu, T. Kaneko, S. Otani, Y. Sasaki, and S. Yoshimura : "A carbonaceous thin film made by CVD and its application for a carbon/n-type silicon (C/n-Si) photovoltaic cell", Carbon, Vol.36, No.1-2, pp.137-143 (1998)
- (5) M. Murakami, K. Watanabe, and S. Yoshimura : "High-quality pyrographite films", Appl. Phys. Lett., Vol.48, No.23, pp.1594-1596 (1986)
- (6) S. Konishi, M. Liger, T. A. Harder, and Y. C. Tai : "Parylene-Pyrolyzed Carbon For MEMS Applications", Proc. of 17th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'04), pp.161-164, Maastricht, Netherlands (2004)
- (7) C. Wang, G. Jia, L. H. Taherabadi, and M. J. Madou : "A Novel Method for the Fabrication of High-Aspect Ratio C-MEMS structures", J. Microelect. Systems, Vol.14, No.2, pp.348-358 (2005)
- (8) M. Liger, S. Konishi, and Y. C. Tai : "UNCOOLED ALL-PARYLENE BOLOMETER", Proc. of 17th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'04), pp.593-596 Maastricht, Netherlands (2004)
- (9) K. Naka, H. Nagae, M. Ichiyangi, O. C. Jeong, and S. Konishi : "Investigation of Pyrolyzed Polyimide Thin Film as MEMS Material", Journal of Semicon Tech Science, Vol.5, No.1, pp.38-44 (2005)
- (10) K. Naka and S. Konishi : "Design and Fabrication of Pyrolyzed Polymer Micro and Nano Structures", 2005 Proc. of International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS2005), pp.103-108, Nagoya, Japan (2005)
- (11) C. Cobianu, C. Savaniu, A. Arnautu, R. Iorgulescu, D. Dascalu, G. Leo, M. Mazzer, R. Rella, P. Siciliano, S. Capone, and L. Vasanelli : "A SnO₂ microsensor device for sub-ppm NO₂ detection", Sensors and Actuators B: Chemical, Vol.58, No.1-3, 21, pp.370-374 (1999)
- (12) J. Tamaki, A. Miyaji, J. Makinodan, S. Ogura, and S. Konishi : "Effect of micro-gap electrode on detection of dilute NO₂ using WO₃ thin film microsensors", Sensors and Actuators B: Chemical, Vol.108, No.1-2, pp.202-206 (2005)
- (13) C. Cantalini, L. Valentini, I. Armentano, L. Lozzi, J. M. Kenny, and S. Santucci : "Sensitivity to NO₂ and cross-sensitivity analysis to NH₃, ethanol and humidity of carbon nanotubes thin film prepared by PECVD", Sensors and Actuators B: Chemical, Vol.95, No.1-3, pp.195-202 (2005)
- (14) K. Naka, T. Hashishin, J. Tamaki, and S. Konishi : "Pyrolyzed Polymer as Absorbent of Nitrogen Dioxide Sensor", Proc. of 19th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'06), pp.518-521, Istanbul, Turkey (2006)

中 圭 介 (学生員) 1980 年 12 月 25 日生。2003 年 3 月立命館大学理工学部機械工学科卒業。2005 年 3 月同大学院博士課程前期課程修了。現在、同大学院博士課程後期課程在学中。主としてパイロポリマーの MEMS 応用に関する研究に従事。

橋 新 剛 (非会員) 1971 年 9 月 4 日生。1996 年龍谷大学理工学部物質化学科卒業。1998 年立命館大学大学院博士課程前期課程修了, 2000 年同後期課程修了, 博士 (工学)。同年 4 月より龍谷大学ハイテクリサーチセンター博士研究員。2001 年 4 月より長崎大学工学部助手。2004 年 4 月より立命館大学理工学部ポスドク研究員, 現在に至る。無機材料合成と微構造観察を専門とするが, 現在はナノ繊維材料の構造制御とデバイス化に従事。日本セラミックス協会, CVD 研究会, 炭素材料学会, 電気化学会員。

玉 置 純 (正員) 1961 年 1 月 28 日生。1988 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。工学博士。同年 4 月より九州大学大学院総合理工学研究科助手。1996 年立命館大学理工学部化学科助教授。2002 年より同応用化学科教授。主として半導体ガスセンサ, 液相法による酸化物薄膜合成, 酸化物触媒の研究に従事。日本化学会, 触媒学会, 電気化学会, 日本セラミックス協会, 電気学会, 日本 MRS, 米 MRS, 米 Electrochemical Society 会員。

小 西 聡 (正員) 1968 年 12 月 23 日生。1991 年東京大学工学部電子工学科卒業。1993 年同大学大学院博士課程前期課程修了, 1996 年同後期課程修了, 博士 (工学)。同年 4 月より立命館大学理工学部専任講師。1999 年 4 月より同助教授。2006 年 4 月より同教授, 現在に至る。1993 年より 3 年間日本学術振興会特別研究員。2002 年より 1 年間カリフォルニア工科大学客員研究員。MEMS 全般に関する研究を行う中で, 特にマイクロアクチュエータとその応用に関する研究を重視。機械学会, 応用物理学会, 日本ロボット学会, IEEE 会員。