

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04647

研究課題名（和文）酸化物半導体センサの超薄膜化による機能向上

研究課題名（英文）Improvement of gas sensing properties of metal oxide semiconductors in the form of ultra-thin film

研究代表者

安達 裕 (ADACHI, Yutaka)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・電子・光機能材料研究センター・主幹研究員

研究者番号：30354418

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、粉末やナノ構造体の代わりに、エピタキシャル薄膜を酸化物半導体ガスセンサの母体材料として用いて、添加不純物とガス・センシング特性の関係を明らかにし、ガス選択性に優れた酸化物半導体ガスセンサの設計指針を得ることを目的とした。ZnO薄膜に酸性度の異なる不純物を添加したときのセンサ特性を調査したところ、Mgを添加したときに最も優れたエタノールガス選択性を示した。また、添加不純物の酸性度がそれより高くなっても、低くなってもガス選択性が低下する傾向があることもわかった。この結果は、添加不純物の酸性度を考慮することが、ガス選択性に優れたガスセンサを設計する際に重要であることを示している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

半導体ガスセンサの重要な課題の一つは、ガス選択性の向上である。その課題解決のため、母体材料である粉末・ナノ構造体に貴金属や金属酸化物を添加することが、これまでに数多く試みられてきた。しかし、粉末やナノ構造体の場合、不純物を添加すると粒子サイズなどセンサ特性に影響を与える他のパラメータも変わってしまうため、添加不純物が本当にガス選択性の向上に寄与しているのかは明確ではなかった。本研究では、センサ母体材料としてエピタキシャル薄膜を用いたので、添加不純物の役割をより明確にすることができた。また、この結果は小型でガス選択性に優れたガスセンサの設計に寄与し、携帯型呼気分析装置などへの適用が期待される。

研究成果の概要（英文）：This study was carried out to clarify the relationship between doped impurities and gas sensing properties of oxide semiconductor gas sensors. Epitaxial films were used as oxide semiconductor gas sensors, instead of powders or nanostructures to make the role of doped impurities more visible. The sensing characteristics of ZnO epitaxial films doped with different kinds of impurities were investigated. It was found that the best ethanol gas selectivity was obtained when Mg was doped, and that gas selectivity tended to decrease when the acidity of doped impurities was higher or lower than that of Mg. This result suggests that it is important to consider the acidity of the doped impurity in designing gas sensors with excellent gas selectivity.

研究分野：酸化物薄膜合成

キーワード：酸化亜鉛薄膜 エタノール 三酸化タングステン薄膜 アセトン エピタキシャル成長 不純物添加 ガス選択性 膜厚依存性

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

酸化亜鉛(ZnO)や酸化スズ(SnO₂)に代表される酸化物半導体ガスセンサは、より簡便な疾病診断・予防に利用できるハンディ型呼気分析装置のガス・センシング部への応用が期待されている。スマートフォンなどの携帯機器に接続して使用できるような小型のガス分析装置を実現するためには、小型・低消費電力のセンサ素子が必要であるが、この点に関しては、MEMSテクノロジーの適用により十分実用可能なレベルの半導体ガスセンサが実現されている。半導体ガスセンサに残された重要な課題の一つは、ガス選択性の向上である。呼気中に含まれるガスの種類は500種類以上であると言われており、それらの中から目的とするガス種のみを検知しなければならない。酸化物半導体ガスセンサは小型化には適しているが、ガス選択性には難があることが知られており、呼気分析装置への応用に向けて、その欠点の改善に焦点が当てられている。

酸化物半導体ガスセンサは、検出対象ガスの半導体表面での化学反応、あるいは化学吸着によって生じる半導体材料の電気抵抗変化を利用するガスセンサである。従って、酸化物半導体ガスセンサのガス選択性向上は、表面での化学反応・吸着を促進、あるいは抑制するための不純物(PtやPdなどの貴金属、あるいはCuOやCoOなどの酸化物)を、母体材料である酸化物粉末・ナノ構造体の表面に添加・担持することにより試みられてきた。現在までに、目的とするガスに対するセンサ特性向上の報告が数多くなされているが、なぜ、検出対象ガスに対する選択性を高めるためにその不純物が選ばれたのか、なぜ、その不純物が検出対象ガスのみでのセンサ応答を改善するのか、という点に関しては詳しく述べられていないことが多い。そのため、新たに選択性の高いセンサを作製しようと考えたときに、どのような方針で添加不純物を使用すればよいのかわからず、経験則に従って探索していくしかない状況にある。

そのような状況のなかで Jinkawa らは、SnO₂ ガスセンサに添加した不純物元素の酸性度・塩基性度と、エタノールに対するセンサ応答特性に、ある程度の相関があることを報告した¹⁾。もし、添加不純物の酸性度・塩基性度と検出対象ガスのセンサ応答との間に何らかの相関があるのであれば、添加不純物の選択に指針ができることになる。しかし、この報告では、添加不純物の酸性度・塩基性度とセンサ応答値とは完全には相関していなかった。これは、粉末やナノ構造体の場合、不純物添加のためにプロセス条件に変更が加えられると、母体材料の組成だけでなく、粒子サイズ、形状(すなわち、粒子表面に露出している結晶面)、母体材料中に含まれる欠陥構造、粒子同士の接合状態など、センサ特性に影響を与える他のパラメーターも変わってしまうためと思われる。従って、添加不純物の酸性度・塩基性度とセンサ応答の相関をより明確にするためには、粒子サイズや粒子形状などセンサ特性に影響を及ぼすパラメーターは変えずに、添加不純物の種類・量のみを変化させたサンプルでセンサ特性を測定する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、粉末やナノ構造体の代わりに、エピタキシャル薄膜を酸化物半導体ガスセンサ母体材料として用い、添加不純物の酸性度・塩基性度とガス・センシング特性の関係を明らかにし、多様なガス種に対応できるガス選択性に優れた酸化物半導体ガスセンサの設計指針を得ることを目的とした。

エピタキシャル薄膜はコストや感度などの面から、粉末やナノ構造体と比べて酸化物半導体ガスセンサとしての研究はほとんどなされてきていない。しかし、本研究ではあえてエピタキシャル薄膜を使用する。その利点は以下にある。

- 膜厚と面内粒径、すなわち粒子サイズが制御しやすい。
膜厚のみならず、薄膜面内方向の粒径もバッファー層の導入や成長温度の選択などで制御が可能である。従って、ガス・センシング特性に大きく影響する粒子サイズを同一にして比較することができる。
- 特定の結晶面のみが最表面になっている。
センサ母体材料の結晶粒表面に、どの結晶面が露出しているかは、センシング特性に大きく影響を及ぼす。従って、比較のためには、単一の結晶面のみが表面に露出しているセンサ材料を使用することが重要である。
- 粒子間の接合状態がほぼ同じサンプルが作製できる。
エピタキシャル薄膜の場合、薄膜面内方向の結晶方位も揃ったものが作製できるので、粒子間の接合状態がほぼ同じものが作製できる。

従って、エピタキシャル薄膜を用いれば、添加不純物の種類・量のみが異なり、他のパラメーター、粒子サイズや表面に露出している結晶面などが、ほぼ同じサンプルを得ることができる。これらサンプルを使えば、不純物添加効果がより鮮明に明らかになることが期待できる。

3. 研究の方法

エピタキシャル薄膜センサはパルス・レーザー・デポジション(PLD)法で作製した。成長条件は表1に示したものをを使用した。作製した薄膜の結晶構造、配向性はX線回折法(XRD)法で、表

面形状と面内方向の粒径は走査プローブ顕微鏡、膜厚の評価はX線反射率法で評価した。

図1に、本研究で使用したセンサ特性測定装置の概略図を示す。チャンバー内に設置したヒーターにサンプルを取り付け、所定の温度まで加熱し、そこに空気と検知対象ガスを流して、サンプルの抵抗変化を測定する。サンプル薄膜の表面には、金の楕形電極を作製し、電極間に1Vの直流電圧を印加して測定を行った。本研究では式(1)に示すように、空気中での抵抗値 R_a を、検知対象ガスが含まれる雰囲気中での抵抗値 R_g で割った値をセンサ応答値 S として定義した。

$$S = R_a / R_g \quad (1)$$

4. 研究成果

(1) 添加不純物の酸性度とエタノールガス・アセトンガス応答との相関性

添加不純物の酸性度とエタノールおよびアセトンガスに対するセンサ応答特性との関係を調べるため、ZnOにMgO、CaO、CoO、Sc₂O₃を添加したエピタキシャル薄膜を作製し、それら薄膜の評価を行った。薄膜の作製には無添加および10 mol%のCaO、MgO、CoOおよび5 mol%のSc₂O₃を添加したZnOセラミックス・ターゲットを用い、薄膜中の金属元素組成比がZn:M=9:1(M=金属元素)になるようにした。基板にはサファイアを用い、(0001)結晶面上に薄膜を蒸着した。

表1 薄膜センサ成長条件

Laser	KrF excimer
Wavelength	248 nm
Repetition rate	5 Hz
Pulse width	~20 ns
Laser fluence	~1 J/cm ²
Distance between substrate and target	5 cm
Temperature	525
O ₂ pressure	2 × 10 ⁻³ Pa

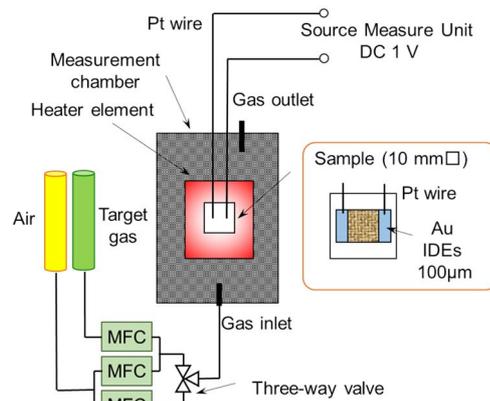


図1 センサ特性測定装置の概略図

図2に作製した薄膜のXRD測定結果を示す。すべての薄膜において、サファイア(0001)基板からの回折ピークとウルツァイト構造の0002回折ピークのみが観察された。この結果は、添加した不純物が固溶したウルツァイト構造のZnO薄膜のみが成長していて、添加不純物の析出などは生じていないことを示している。また、XRD面内スキャンの測定から、薄膜面内方向も結晶方位が揃っており、すべての薄膜がエピタキシャル成長していることが確認された。

これらサンプルを用いて、40ppmのエタノールおよびアセトンに対するセンサ応答特性を調査した。膜厚による影響を抑制するため、サンプルの膜厚は11~15nmの範囲内に揃えたものを測定に使用した。サンプルを350℃に加熱した状態で測定したセンサ特性を図3に示す。無添加および添加不純物がCaO、MgO、およびSc₂O₃の場合、エタノールに対するセンサ応答のほうがアセトンに対する応答よりも大きい傾向を示した。一方、添加不純物がCoOの場合

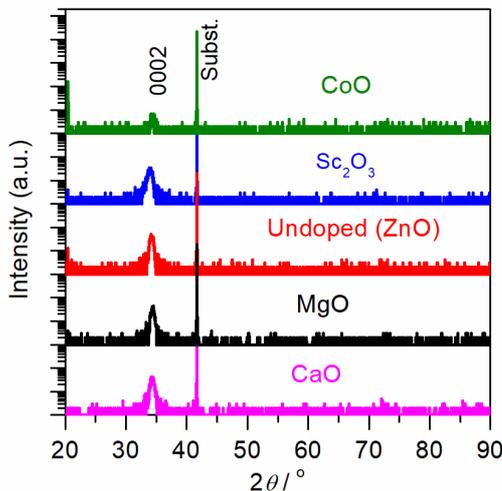


図2 不純物を添加したZnO薄膜のXRD 2 / スキャン・プロファイル

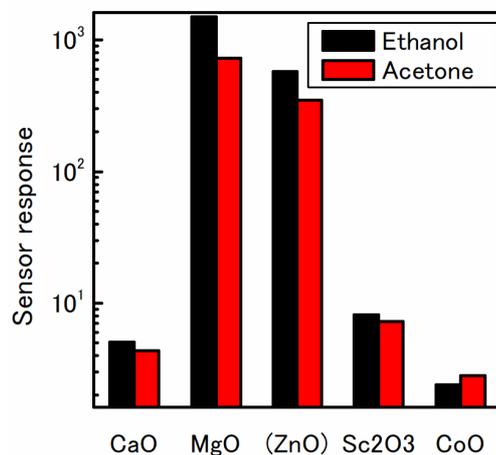


図3 40 ppm エタノールおよびアセトンガスセンサ応答値と添加不純物種の関係

合、エタノールに対する応答よりもアセトンに対するセンサ応答のほうが大きかった。

図4に、アセトン応答値 S_{acetone} に対するエタノール応答値 S_{ethanol} の比と、添加不純物の関係を表したグラフを示す。この応答値の比が大きいほど、エタノールガスに対する選択性が高いことを示しており、一方、値が1以下の場合にはアセトンに対するガス選択性が優れていることを示している。横軸の添加不純物は金属元素の電気陰性度の小さい順に左から並んでいる。金属元素の電気陰性度と酸性度・塩基性は相関があり²⁾、電気陰性度が大きいほど酸性度は高くなる関係がある。従って、このグラフの横軸は、右側にいくほど元素の酸性度は高くなることを示している。図4の結果は、MgOを添加したときにエタノールに対するガス選択性が最大になり、Mgより酸性度が低い不純物を添加しても、高い不純物を添加しても、エタノールガス選択性は低下していく傾向である

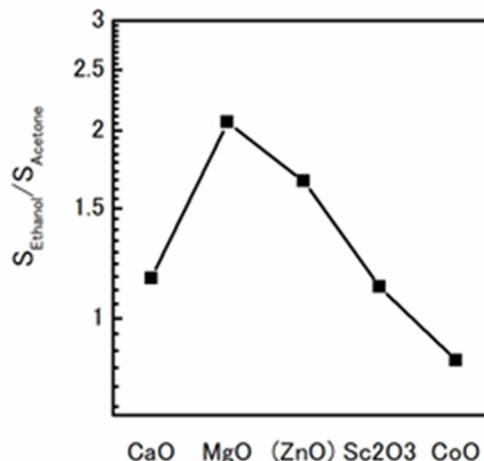


図4 40 ppm エタノールガスセンサ応答値/アセトンガスセンサ応答値と添加不純物の関係

ことを示している。このような傾向を示した理由として、Mgよりも酸性度の高い不純物を添加するとセンサ表面とエタノールとの結合が弱まり（相対的にアセトンとの結合が強まり）、エタノールに対するセンサ応答が低下した可能性が考えられる。一方、Mgよりも酸性度の低い、すなわち塩基性の高い不純物を添加した場合、センサ表面とエタノールとの結合が強すぎてセンサ表面に吸着したエタノール分子が動くことができず、酸化反応が抑制されてセンサ応答が低下した、と考えることができる。現在のところ、この仮説を証明する証拠はないが、添加不純物の酸性度・塩基性とガス選択性に相関があることはこの結果から明らかである。従って、添加不純物の酸性度・塩基性がガス選択性に優れたガスセンサの設計指針に重要なファクターである、ということは本結果から言うことができる。

(2) 酸化亜鉛へのMgの添加効果

エタノールに対して優れたガス選択性を示したMg添加ZnOガスセンサのガス選択特性をさらに調査するため、エタノールと水素ガスに対する応答性の比較も行った。図5に、サファイア(0001)基板上に作製した無添加およびMgを19 mol%添加したZnOエピタキシャル薄膜のセンサ特性測定結果を示す。この図から、Mgを添加することにより、水素とエタノールどちらのガスに対しても応答値が増大することがわかる。この結果だけを見ると、ガス選択性はMg添加では改善されないように見えるが、応答値がMg添加によって何倍になっているかに注目すると、エタノールは2.7倍にしかなっていないのに対し、水素に対しては8倍になっている。このことは、Mgの添加は、エタノールよりも水素に対する応答を向上させる機能が大きいことを示唆している。

(3) 酸化タングステンへのSiの添加効果

WO_3 はエレクトロクロミック材料や触媒材料として知られている酸化物半導体材料であるが、ガスセンサ材料としても古くから研究がなされており、特に窒素酸化物に対する検知特性が優れていることが報告されていた。しかし2008年にWangらが、Crを添加した WO_3 がアセトンに対して優れた検知特性を示すことを報告し³⁾、それに続いてRighettoiniらもSiを添加した WO_3 がアセトンに対して優れたガス選択性を示すことを報告した⁴⁾。彼らは、アセトンガス選択性向上の起源が、本来、低温相である β 相の WO_3 が生成しているためである、と主張しているが、添加した不純物による効果の可能性も否定できない。そこで本研究では、配向性、面内結晶方位、および膜厚がほぼ同じで、Si添加の有無のみが異なる WO_3 薄膜を作製し、そのガス・センシング特性を測定することにより、Si添加によるセンサ特性向上のメカニズムを明らかにすることを試みた。

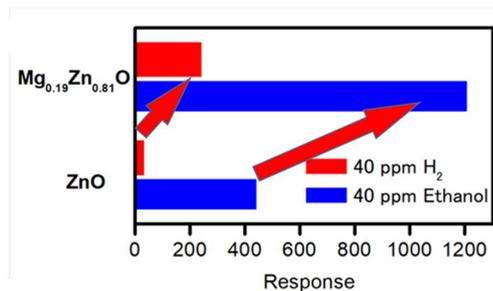


図5 無添加およびMg添加ZnO薄膜の40 ppm エタノールおよび水素ガスに対するセンサ応答値

無添加および2.5 mol%のSiを添加した WO_3 エピタキシャル薄膜をサファイア(10 $\bar{1}$ 2)面上に作製し、それらのセンサ特性を測定した。作製した薄膜をXRDで測定した結果、不純物添加の有無に関わらず、室温で

安定な構造である 相のWO₃が成長していることがわかった。図6に膜厚を約12nmにそろえた無添加およびSi添加WO₃薄膜の、40ppmエタノール、アセトンおよび水素ガスに対するセンサ応答特性を示す。測定温度200から350の範囲での応答値は、無添加およびSi添加サンプルいずれもエタノール、アセトン、水素の順に大きい傾向を示した。一方、150ではSi添加サンプルのアセトン応答値がエタノール応答値よりも大きな値を示し、無添加薄膜とは異なる傾向を示した。この結果は、Si不純物添加にはアセトンガス選択性を向上させる効果があることを示している。

(4) センサ応答と膜厚の相関性

以上の研究から、不純物添加が半導体ガスセンサの特性改善に大きな効果があることが明らかになったが、薄膜型センサの場合、膜厚もセンサ応答値に大きく影響する。図7(a)に、膜厚とセンサ応答値の関係を示したグラフを示す。膜厚が薄くなると急激に応答値が大きくなる傾向が、この図からわかる。本研究で用いたサンプルはエピタキシャル薄膜であるため、図7(b)で示すように、薄膜表面からの空乏層厚さの変化が、センサ抵抗値の変化をもたらすと考えられる。従って、薄膜中に占める空乏層の厚みの割合が大きくなるほど応答値が大きくなること予測され、そのため、膜厚減少に伴い、センサ応答値が増大していったものと考えられる。この結果は、センサ特性を比較するには膜厚の制御が重要であることを示唆しており、この結果に基づいて本研究では、センサ特性の比較は同じ膜厚を持つサンプル同士で行っている。また、薄膜型センサであっても膜厚を制御することにより、高感度なセンサが得られることも本結果は示している。

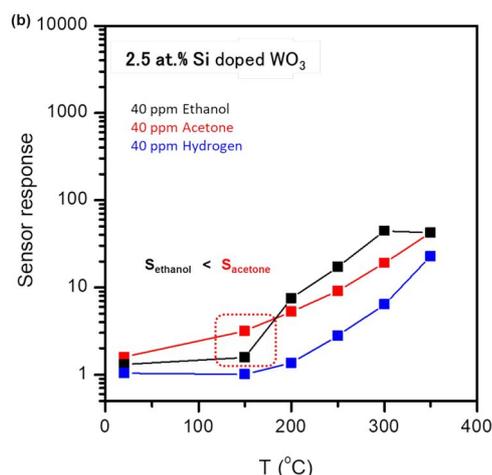
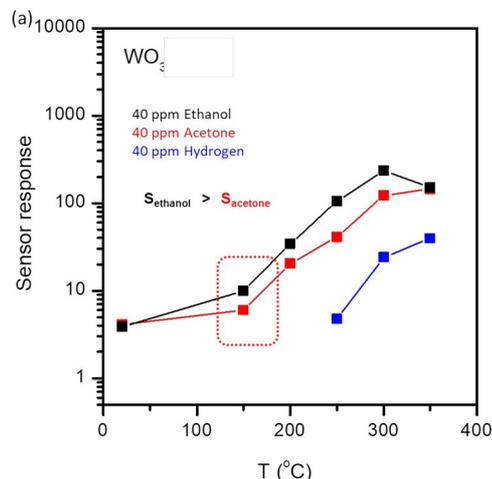


図6 (a)無添加および(b)Si添加WO₃薄膜の40ppmエタノール、アセトンおよび水素ガスに対するセンサ応答特性

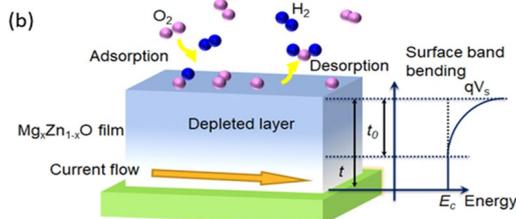
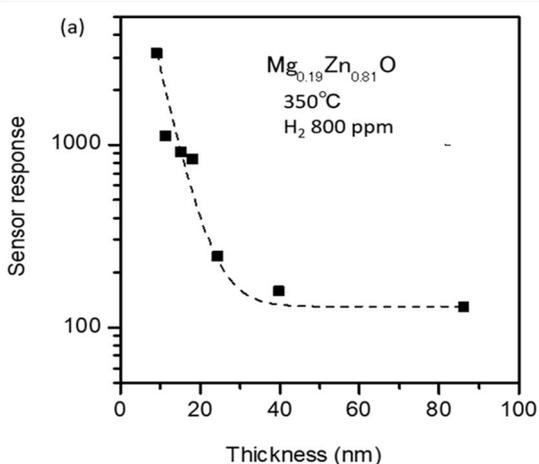


図7 (a)19 mol.% Mg添加ZnO薄膜センサの膜厚と800ppm水素ガスに対するセンサ応答値の関係 (b)半導体ガスセンサ表面での反応とセンサ応答のモデル図

<引用文献>

- 1) T. Jinkawa, et al. *J. Mol. Catal. A Chem.* 152 (2000) 200.
- 2) K. Tanaka, et al. *J. Catal.* 8 (1967) 1.
- 3) L. Wang, et al, *Chem. Mater.* 20 (2008) 4795.
- 4) M. Righettoni, et al, *Chem. Mater.* 22 (2010) 3152.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Adachi Yutaka	4. 巻 132
2. 論文標題 Effect of Si addition on epitaxial growth and gas sensing properties of tungsten oxide films	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of the Ceramic Society of Japan	6. 最初と最後の頁 227 ~ 231
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2109/jcersj2.23121	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Tashiro Aika, Nakamura Toshihiro, Adachi Yutaka, Wada Yoshiki, Uchino Takashi	4. 巻 109
2. 論文標題 Fermi-edge singularity and related emission from degenerate semiconductors: Transition from a spontaneous to a stimulated process	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 075302-1 ~ 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.109.075302	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 齋藤紀子、安達 裕、鈴木 拓	4. 巻 39
2. 論文標題 酸化亜鉛ガスセンサの結晶面効果	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Chemical sensors	6. 最初と最後の頁 108 ~ 119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tashiro Aika, Adachi Yutaka, Uchino Takashi	4. 巻 133
2. 論文標題 Excitonic processes and lasing in ZnO thin films and micro/nanostructures	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 221101-1 ~ 33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0142719	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Adachi Yutaka	4. 巻 28
2. 論文標題 Enhancement of H2 gas sensing properties of ZnO films by Mg alloying	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Surfaces and Interfaces	6. 最初と最後の頁 101597-1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.surfin.2021.101597	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Suzuki T. T., Ohgaki T., Adachi Y., Sakaguchi I.	4. 巻 131
2. 論文標題 Polarity reversal of resistance response to trace H2 gas in the air between asymmetrically shaped electrodes on rutile-TiO2 single crystal	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 034501-1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0078296	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計24件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Yutaka Adachi
2. 発表標題 Effect of Mg Addition on Gas Sensing Properties of ZnO Films
3. 学会等名 STAC - D2MatE 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Taku T. Suzuki, Yutaka Adachi, Takeshi Ohgaki, Isao Sakaguchi
2. 発表標題 Molecular sensing surfaces reproduced in vacuum by pulsed-jet technique for low-energy He+ scattering experiments
3. 学会等名 24th International Workshop on Inelastic Ion-Surface Collisions (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Taku T. Suzuki, Yutaka Adachi, Takeshi Ohgaki, Isao Sakaguchi
2. 発表標題 Operando analysis of gas sensing surfaces by LEIS combined with pulsed jet technique
3. 学会等名 IBA & PIXE 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 安達 裕
2. 発表標題 無添加およびSi添加酸化タンゲステン薄膜のエピタキシャル成長と結晶構造の膜厚依存性
3. 学会等名 日本セラミックス協会第36回秋季シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 安達 裕
2. 発表標題 無添加およびSi添加WO ₃ 薄膜のエピタキシャル成長と結晶構造
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田代 愛佳, 安達 裕, 内野 隆司
2. 発表標題 縮退 ZnO:Ga薄膜の電子-正孔プラズマによる低閾値室温誘導放出発光
3. 学会等名 2023年第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田代 愛佳, 安達 裕, 内野 隆司
2. 発表標題 縮退 ZnO:Ga薄膜中の光吸収過程における多体効果と誘導放出発光
3. 学会等名 日本セラミックス協会2023年年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田代 愛佳, 安達 裕, 内野 隆司
2. 発表標題 Ga ドープ ZnO 薄膜の光学特性に及ぼすバンドギャップ変調効果
3. 学会等名 第61回セラミックス基礎科学討論会. 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 安達 裕, 鈴木 拓
2. 発表標題 酸化タングステン薄膜のエピタキシャル製膜とガス応答特性
3. 学会等名 2022年第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安達 裕
2. 発表標題 酸化タングステン薄膜のガス応答特性
3. 学会等名 第42回電子材料討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田代 愛佳, 安達 裕, 内野 隆司
2. 発表標題 縮退GaドーピングZnOナノ薄膜のフェルミエッジ異常の観察
3. 学会等名 2022年第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田代 愛佳, 安達 裕, 内野 隆司
2. 発表標題 縮退ZnO:Ga薄膜中のフェルミエッジ異常吸収と励起子生成
3. 学会等名 日本セラミックス協会第35回秋季シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安達 裕
2. 発表標題 Si添加酸化タングステン薄膜の結晶構造と配向性
3. 学会等名 2022年第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木 拓, 安達 裕, 大垣 武, 坂口 勲
2. 発表標題 点接触Pt/TiO ₂ 単結晶から構成される半導体ガスセンサの水素に対する抵抗応答と、バイアス極性に応じたその極性反転
3. 学会等名 2022年 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田代 愛佳, 安達 裕, 内野 隆司.
2. 発表標題 縮退ZnO:Ga薄膜中のフェルミエッジ異常と励起子生成
3. 学会等名 2022年第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田代 愛佳, 安達 裕, 内野 隆司
2. 発表標題 縮退ZnO:Ga薄膜におけるフェルミエッジ異常 の観察
3. 学会等名 日本セラミックス協会2022年年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安達 裕, 鈴木 拓
2. 発表標題 Mg添加によるZnO薄膜の雰囲気ガス応答特性向上のメカニズム
3. 学会等名 2021年第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木 拓, 安達 裕, 大垣 武, 坂口 勲
2. 発表標題 Crystal plane dependent ethanol gas sensing of ZnO studied by low-energy He ⁺ ion scattering combined with pulsed jet technique
3. 学会等名 第22回「イオンビームによる表面・界面の解析と改質」特別研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木 拓, 安達 裕, 大垣 武, 坂口 勲
2. 発表標題 Crystal plane dependent ethanol gas sensing of ZnO studied by low-energy He ⁺ ion scattering combined with pulsed jet technique
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Surface Science (ISSS9) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木 拓, 安達 裕, 大垣 武, 坂口 勲
2. 発表標題 Electrical Resistance Response of a ZnO Single-Crystalline Substrate to Trace Ethanol Under Pulsed Air Jet Irradiation
3. 学会等名 AVS 67th international symposium & exhibition (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木 拓, 安達 裕, 大垣 武, 坂口 勲
2. 発表標題 He ⁺ LEIS analysis combined with pulsed jet technique of gas sensing mechanism on semiconductor gas sensor surfaces
3. 学会等名 IBA&PIXE-SIMS2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田代 愛佳, 安達 裕, 内野 隆司
2. 発表標題 ZnO:Ga 薄膜の誘導放出機構
3. 学会等名 2021年第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木 拓, 安達 裕, 大垣 武, 坂口 勲
2. 発表標題 酸化亜鉛の結晶面方位とエタノールセンシングとの関係 ~パルスジェット+低速He+イオン散乱分光による最表面分析
3. 学会等名 応用物理学会 第82回秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田代 愛佳, 安達 裕, 内野 隆司
2. 発表標題 Ga添加ZnO薄膜のランダムレーザー発振と光増幅機構
3. 学会等名 日本セラミックス協会第34回秋季シンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------