

令和 2 年 5 月 29 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H03869

研究課題名(和文) 触媒反応生成ハイパーソニック水分子ビームによる単分子層制御エピタキシャル成長技術

研究課題名(英文) Monomolecular controlled epitaxial growth technique using hypersonic H₂O beam generated by a catalytic reaction

研究代表者

安井 寛治 (Yasui, Kanji)

長岡技術科学大学・工学研究科・教授

研究者番号：70126481

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：白金ナノ粒子表面での水素と酸素の触媒燃焼反応を用いて高温水分子を生成、ラバールノズルからハイパーソニックビームとして噴出、有機金属(DMZn)ガスと反応させ、酸化亜鉛(ZnO)前駆体を生成することで0.2nm/pulse以下の単分子層厚での成長制御に成功した。次に単分子厚で制御された超格子構造デバイスにおいて内部電解の発生しない非極性ZnO膜の作製を行いその強い偏光特性を見出した。ヘテロ接合構造形成のためにZnOへのMgの添加を試みた。更にp型ZnO結晶膜の作製のために一酸化窒素を加熱Ir表面で分解し原子状窒素を供給することで10¹⁹ cm⁻³の窒素の取り込みに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題により触媒反応により生成した高温の水分子をラバールノズルから噴出しハイパーソニックビームを形成し有機金属ガスと反応させ外部エネルギーを使用せずに金属酸化物プリカーサーを生成する、それを基板に供給することで外部エネルギー無しで金属酸化物薄膜の堆積技術が実現した。この技術を用いることにより低温で高品位の金属酸化物結晶膜の作製が可能になり、省エネルギー性に優れたCVD法が実現した。更にミリ秒幅のパルスガス供給技術と複合させることにより分子層厚レベルでの半導体薄膜の成長技術が構築された。

研究成果の概要(英文)：ZnO films were grown by a reaction between dimethylzinc and a hypersonic water beam produced by a Pt-catalyzed reaction between hydrogen and oxygen gases. For a pulse duration of 1 ms, the deposition rate was 0.18 to 0.19 nm per pulse. The thickness of the deposited film could therefore be controlled to less than the thickness of a single molecular layer using this new process. Next, non-polar ZnO films were grown on r-plane sapphire substrates. The ZnO films exhibited linearly polarized emission. Although Mg incorporation was tried, MgZnO film could not be grown by the reaction between the hypersonic H₂O beam and metal source gases but were grown by the reaction between oxygen and the metal source gases. Finally, nitrogen doping to the ZnO films investigated to grow p-type films. By the addition of atomic nitrogen generated on a heated Ir wire, nitrogen content on the order of 10¹⁹ cm⁻³ in the films was obtained by SIMS measurement.

研究分野：電気電子材料

キーワード：触媒反応 ハイパーソニックビーム エピタキシャル成長 金属酸化物

1. 研究開始当初の背景

近年、窒化物半導体(GaN/GaInN)を用いた白色発光ダイオード(LED)の発光効率 30%以上と蛍光灯のそれを超え、また素子の低価格化が進んだことで白色 LED による照明機器の巨大な市場が形成されている。ただ GaN/GaInN 系 LED には希少元素であるインジウム(In)が多く使用されており、今後希少元素を用いない LED により長寿命で高効率の照明機器の開発が望まれている。現在、次世代の白色 LED 用紫外光源用デバイスの候補として酸化亜鉛系(ZnO/MgZnO)デバイスが注目されている。窒化物半導体による白色 LED の製造法として有機金属気相化学堆積 (MOCVD) 法が用いられているが、半導体結晶薄膜の堆積には基板加熱のための電気エネルギーに依存しており、高温での成長が必要であり、省エネルギー性に劣っている。申請者は、窒化物半導体を用いて実用化された白色 LED に代わる高品質で希少元素を用いない紫外 LED や紫外レーザーダイオード(LD)の作製技術構築を目指して新しい CVD 法について研究してきた。結果、白金触媒表面で水素・酸素の燃焼反応により高温の水分子(H₂O)を生成しラバールノズルを介して真空チャンパー内にハイパーソニックビームとして噴出し、金属原料ガスと反応させることで高エネルギー金属酸化物プリカーサを形成し膜堆積を行う技術を開発した。この技術により分子線エピタキシー(MBE)法に匹敵する高品位の ZnO 結晶膜の低温成長に成功したが[1]、紫外 LED および LD の作製には分子層レベルで結晶膜の層厚制御が必要である。また発光効率向上のための結晶方位の制御、ヘテロ接合形成のための MgZnO 膜の作製も必要とされる。更にデバイスの実用化のためには pn 接合構造形成が必要である。

2. 研究の目的

本研究課題は、触媒反応により形成した高エネルギー-H₂O ハイパーソニックビームを用いて ZnO 系紫外発光デバイスの省資源・省エネルギー作製技術を構築することを目的としている。

- (1) 急峻なヘテロ接合界面およびその積層である超格子構造の形成を目指し、分子層厚さで制御された ZnO 膜の堆積を実現するため有機金属ガスのミリ秒幅パルス供給実験を行う。
- (2) ZnO 結晶膜への Mg 添加により MgZnO 結晶膜を作製し、MgZnO/ZnO ヘテロ接合構造を形成する。
- (3) 超格子デバイスの発光効率を向上させることを目指して非極性 ZnO 結晶膜を作製し特性評価を行う。
- (4) ZnO 膜への窒素ドーピングにより p 型 ZnO 結晶膜を作製し、n 型 ZnO 膜との pn 接合構造を形成する。

3. 研究の方法

H₂O ハイパーソニックビームを用いて ZnO 系紫外発光デバイス製造のための分子層レベルの層厚制御した ZnO 膜堆積、ヘテロ接合構造の製作、pn 接合の形成技術を構築するため以下の実験を行った。

- (1) 有機金属 (DMZn) ガスのミリ秒パルス供給により、1 パルス当たりの ZnO 結晶膜堆積速度を c 軸長の半分の 0.2nm 以下で制御するため様々なパルス幅で供給し堆積速度を評価した。
- (2) 金属原料ガスとして DMZn に加え、EtCp₂Mg ガスをマグネシウム源に用い MgZnO 膜の作製を行ない電子プローブマイクロアナリシス(EPMA)を用いて膜中への Mg の取り込み量を評価した。
- (3) 非極性の ZnO 結晶を用いて量子井戸を形成した場合、電子と正孔の分離は発生せず波動関数の重なりが大きくなるため発光効率の向上が期待される。そこで r 面サファイア基板上に ZnO 膜を成長させ、非極性 ZnO 膜の成長を試み、作製した ZnO 膜の特性を評価した
- (4) p 型 ZnO 結晶膜の作製を目指し、ZnO 膜への窒素のドーピングを試みた。窒素原料ガスとして NO ガスを用い DMZn ガスと共に供給し、更にドーピング量を増加させるため加熱した Ir ワイヤ表面に供給し分解、原子状窒素の供給を行う実験を行った。

4. 研究成果

(1) 分子層厚さで制御された ZnO 膜の堆積実験

真空チャンパー内の触媒反応容器に白金(Pt)触媒を担持したジルコニア粒子を充填し、そこへ高純度水素(H₂, 99.9999%)および高純度酸素(O₂, 99.9995%)を供給、Pt 触媒表面で反応させ、高温の水分子を生成する。この高温水分子をガス噴出ノズル(ラバールノズル)から真空チャンパー内に噴出させ、スキマーコーンにより高エネルギー水分子を選別した後、電磁パルスバルブによってミリ秒幅でパルスの供給されたジメチル亜鉛(DMZn, 99.9999%)と気相中で反応させ、高エネルギー-ZnO プリカーサを生成し基板に供給した。

実験条件として、電磁パルスバルブのパルス幅やパルス周波数を変えることで1パルス当りのDMZnガス量を変化させて膜堆積を行い、ZnO膜の堆積速度を調べた。その際、基板温度は500°Cに固定し、堆積時間は0.5-60minで変化させた。作製したZnO膜について、段差計によって膜厚を測定し堆積速度を評価すると共に、原子間力顕微鏡(AFM)によって表面モフォロジーを観察し、1パルス当りの堆積厚さの評価と平均面粗さについて調べた。

表1にDMZnガスのパルス幅を1msと2ms、周波数を2Hzと4Hz、堆積時間を15分と30分で堆積した時の膜厚と膜厚から換算した1パルス当たりの堆積厚さを示す。パルス幅1msの堆積膜厚は0.18~0.19nm、2msの場合は0.36~0.39nmであった。ZnOの単分子層厚は0.26nmであるため、パルス幅1msの条件では1パルス当たり単分子層以下の厚さで堆積出来た。

DMZnガス供給のパルス幅を1ms、周波数を4Hzに固定し0.5から15minの範囲で堆積したところ膜厚は直線的に変化し、30秒まで1パルス当たりの堆積速度は殆ど変化しなかった。膜厚と堆積時間中の総パルス数から求めた1パルス当たりの膜厚を表2に示す。表から分かるように、1パルス当たりの堆積厚さは0.17nmから0.21nmと若干ばらつきは見られるものの、単分子層厚さ以下での堆積制御が出来ていることが分かった。

AFM測定による平均面粗さは、どの膜厚においても膜厚の約1/20以下であった。このことから数nmの厚さとなる数秒の堆積膜において1分子層厚以下の平均ラフネスの界面が形成できると推察された。以上のことから1ミリ秒のパルス幅でDMZnガスを供給するパルスガス供給法により分子層厚レベルで平滑な接合界面が形成できることが分かった。

(2) MgZnO 膜の作製

金属原料ガスとしてDMZnに加え、

EtCp₂Mgガスをマグネシウム源に用いH₂Oビームとの反応によりZnO膜へのMgの添加を試みた。得られた結晶膜についてはEPMAを用いて膜中へのMgの取り込み量を評価した。初めにZnO膜と同様に高エネルギーH₂Oビームに向かいDMZnとともにEtCp₂Mgガスをマグネシウム源として供給し結晶膜の堆積を行ったが、膜中へのMgの取り込みを確認出来なかった。そこで触媒反応を用いたCVD法により高エネルギーH₂OビームとDMZnを用いてZnO結晶膜を堆積後、水素ガスをストップし、酸素ガスビームを真空チャンパーに噴出、そこにDMZnとEtCp₂Mgガスを供給するMOCVD法を用いて結晶膜堆積を行ったところ少量のMgの取り込みが確認された。ただEPMAによる定量分析でMg組成は、1原子%以下でありZnO膜と大きなバンドギャップ差を有するヘテロ接合界面は形成出来なかった。

(3) 非極性 ZnO 結晶膜の作製と偏光特性

基板にr面サファイアを用いて成長させた。AFM像からa面配向と考えられるストライプ状の表面構造が確認された。また、基板温度が上がると共にストライプ幅が大きくなった。X線回折パターンからもa面成長しており、ドメインの長軸方向はr面サファイアの[10-12]軸方向であり、エピ成長させたZnO膜のc軸方向であることが分かった。更に得られた結晶膜から発光の強い偏光特性を見出し、その偏光強度や偏光角依存性を詳細に調べた。その結果、強い偏光角依存性を示す結晶膜の作製条件を見出した。

図1に室温で測定したPLスペクトルを示す。点線は直線偏光子をドメインの短軸方向([1-100]軸方向)に平行にセットした場合、実線は直線偏光子をドメインの長軸方向([0001]軸方向)に平行にセットした場合に観測されたスペクトルである。どのスペクトルも3.3eV付近にバンド端発光のピークが、2.3eV

表2 1パルス当たりの膜厚の堆積時間依存性

Pulse width [ms]	Frequency [Hz]	Deposition Time [min]	Thickness [μm]	Thickness /pulse [nm/pulse]
1	4	0.5	20	0.17
1	4	1	40	0.17
1	4	2	90	0.19
1	4	3	150	0.21
1	4	5	230	0.19
1	4	15	670	0.19

表1DMZnガスのパルス幅、周波数に対する堆積速度依存性

Pulse width [ms]	Frequency [Hz]	Deposition time [min]	Thickness [μm]	Thickness /pulse [nm/pulse]
1	2	60	1.4	0.19
1	4	30	1.3	0.18
2	2	30	1.3	0.36
2	4	15	1.4	0.39

付近に深い準位に由来するグリーン発光のピークが観測されたが、[1-100]軸方向に偏光子をセットした場合バンド端発光が強く、[0001]軸方向にセットした場合は逆にグリーン発光が強く観測された。

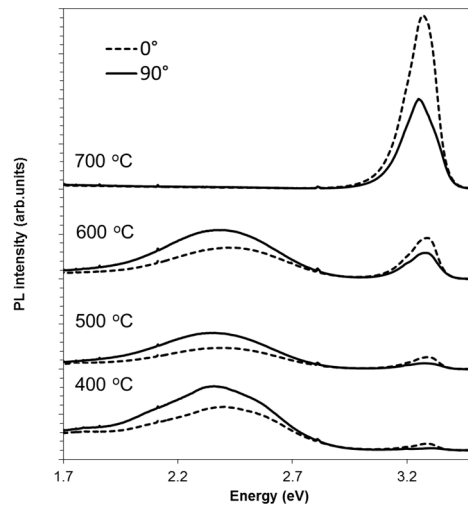


図 1 室温での PL スペクトル：ドメインの単軸方向（点線）と長軸方向成分（実線）

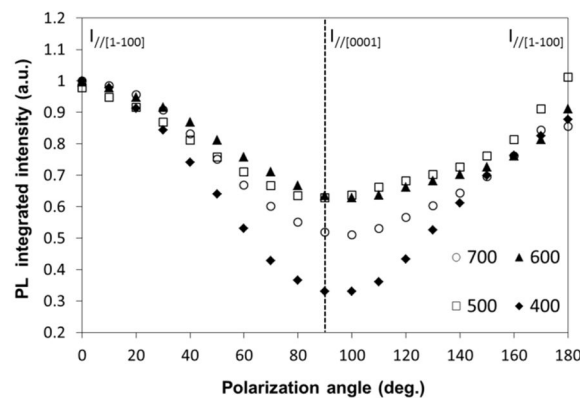


図 2 バンド端発光成分の偏光角度依存性

図 2 にバンド端発光のピーク強度の偏光角依存性を示す。図から分かるようにバンド端発光強度は、[1-100] 軸方向で最大で[0001]軸方向で最小となった。また基板温度の最も低い 400°C での成長膜で角度依存性が大きく 600 °C で角度依存性が小さくなった。偏光の異方度の温度依存性 $((I_{[1-100]} - I_{[0001]}) / (I_{[1-100]} + I_{[0001]})) \times 100[\%]$ を調べると基板温度が 400°C でもっとも大きくなり、600 °C まで減少した。D. C. Reynolds らの報告[2]によると伝導帯と価電子帯の A, B バンドの間の遷移は[1-100]軸方向の偏光を、伝導帯と C バンド間の遷移は[0001]軸方向の偏光を有する発光が支配的になると報告されている。また、J. Hu らの Cd-Se の発光特性においても結晶のドメインのアスペクト比が増大することにより偏光特性が強くなることが報告されている[3]。本 CVD 法で作製した a 面 ZnO において基板温度の上昇に伴いドメインのストライプ幅が増大したことでアスペクト比が低下し偏光特性も低下したと考えられる。即ち偏光角依存性の基板温度による違いは、ドメインのサイズにより伝導帯と価電子帯の A, B バンドの遷移と C バンドの遷移の割合が変わることによるものではないかと考えられる。500°C 成長の膜に比べ 400°C の成長膜の方が AFM で観察されるドメインの幅は大きい、結晶のグレインは 400°C の成長膜の方が小さいのではないかと考えられる。以上の結果から非極性面である a 面 ZnO 結晶膜は c 軸に垂直な方向の強い偏光発光特性を示すことが分かり、超格子構造内での内部電界の消失のみならず、新しい発光素子への応用の可能性が見出された。

(4) ZnO 膜への窒素のドーピング

ハイパーソニック H₂O ビームと DMZn に加え、NO ガスをチャンバー内に供給した。NO ガスは水分子ビームに向けてではなく基板直近にセットした加熱した Ir ワイヤに吹き付け触媒反応により分解し、原子状窒素を基板に直接供給した。Van der Pauw 法による Hall 効果測定によると、すべてのサンプルは n 型であり p 型結晶は得られなかった。Hall 効果測定により得られた残留キャリア濃度は、NO ガス圧とともに減少しており水素等のドナー不純物を窒素によるアクセプタが補償していると考えられる。図 3 に Ir 加熱有りの条件で NO ガス圧 5×10^{-3} Pa で堆積した膜の N-1s スペクトルを示す。図から分かるように面積強度は 6000 cps・mm となり Zn-N 成分が全体面積強度のうち約 47%をしめた。図 4 に Ir ワイヤ加熱有りの条件で NO ガス圧を変化させて堆積した膜の、N-1s スペクトルの積分面積強度を示す。積分強度から、NO 圧力の増加とともに N-N 成分と NO_x 成分が増加したが、Zn-N 成分の増加も見られた。酸素サイトを占める N-N 成分はダブルドナーとして機能する[4]ため、アクセプタを補償している可能性がある。そのため、アニール等の処理により、これらを脱離させる必要がある。また積分面積強度からは、より低い NO ガス圧の条件において、Zn-N 成分の割合が大きくなる傾向が見られた。これは、NO ガス圧の上昇に伴って N-N 成分及び NO_x 成分も積分強度が増加するため、前述のようにアニール処理を行いこれらの成分を脱離させることで Zn-N 成分の面積強度を増加させることができ p 型化に繋がると考えられる。

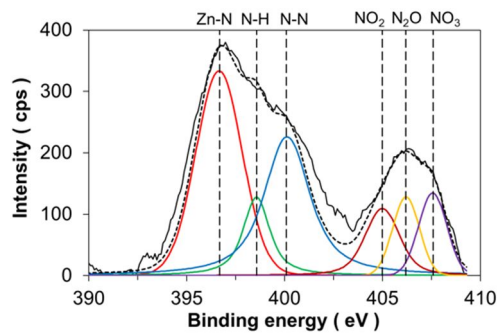


図 3 Ir 加熱有りで作製した ZnO 膜 (NO 5.0×10^{-3} Pa) の N-1s スペクトル

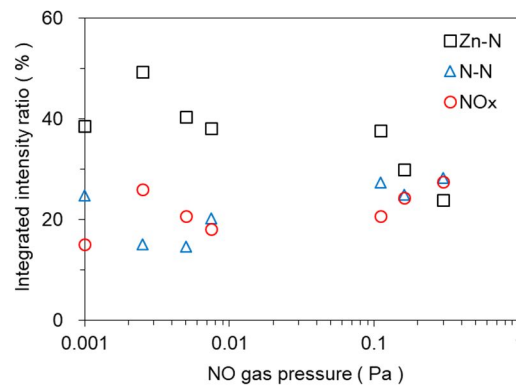


図 4 XPS スペクトル(N-1s)の積分強度比

<引用文献>

- [1] Kanji Yasui, H. Miura, and H. Nishiyama, “Deposition of Zinc Oxide Thin Films Using a Surface Reaction on Platinum Nanoparticles”, Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 1315 (2011) 21-26.
- [2] D. C. Reynolds, D. C. Look, B. Jogai, C. W. Litton, G. Cantwell, and W. C. Harsch, “Valence-band ordering in ZnO”, Phys. Rev. B 60 (1999) 2340-2344.
- [3] J. Hu, L. Li, W. Yang, L. Mannna, L. Wang, and A. Paul Alivisatos, “Linearly polarized emission from colloidal semiconductor quantum rods” SCIENCE, 292 (2001) 2060-2063.
- [4] W.J. Li, C.Y. Kong, G.P. Qin, H.B. Ruan, L. Fang, “p-Type conductivity and stability of Ag-N codoped ZnO thin films”, J. Alloy Compd. 609 (2014) 173

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 A. Muhamad, T. Saito, Y. Adachi, S. Ono, A. M. Hashim, K. Yasui	4. 巻 54
2. 論文標題 Direct Growth of Zinc Oxide Thin Film on Graphene on Insulator by Chemical Vapor Deposition using Platinum-Catalyzed High Temperature H ₂ O beam	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Material Science	6. 最初と最後の頁 228-237
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） DOI: 10.1007/s10853-018-2825-	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 該当する
1. 著者名 T. Saito, R. Iba, S. Ono, G. Imada, K. Yasui	4. 巻 33
2. 論文標題 Growth characteristics of ZnO thin films produced via catalytic reaction-assisted chemical vapor deposition	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Vacuum Science and Technology A	6. 最初と最後の頁 030904-1-3
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi.org/10.1116/1.5079526	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 齋藤太朗、安達雄大、伊庭竜太、小野翔太郎、大石耕一郎、片桐裕則、安井寛治	4. 巻 118
2. 論文標題 Ir触媒表面で励起したNOガスによるZnO膜への窒素ドーピング効果	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 69-74
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 無
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 Ariyuki Kato, Shotaro Ono, Munenori Ikeda, Ryouichi Tajima, Yudai Adachi, Kanji Yasui	4. 巻 644
2. 論文標題 Polarization properties of nonpolar ZnO films grown on R-sapphire substrates using high-temperature H ₂ O generated by a catalytic reaction	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Thin Solid Films	6. 最初と最後の頁 29-32
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.06.062	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 Nurul Fariha Ahmad, Kanji Yasui, Abdul Manaf Hashim	4. 巻 67
2. 論文標題 Growth of GaN by Nitridation of Seed/Catalyst Free Electrodeposited Ga-Based Compound Materials on Graphene on Insulator	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Materials Science in Semiconductor Processing	6. 最初と最後の頁 98-103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.mssp.2017.05.019	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 該当する

1. 著者名 齋藤太郎, 小野翔太郎, 伊庭竜太, 安井寛治	4. 巻 117
2. 論文標題 触媒反応支援CVD法におけるパルスガス供給によるZnO結晶膜の単分子層成長制御	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 57-60.
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 無
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 安井寛治, 田島諒一, 寺口祐介, 里本宗一, 加藤孝弘	4. 巻 J100-C
2. 論文標題 触媒反応支援化学気相堆積法による酸化亜鉛薄膜の堆積	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 電子情報通信学会誌	6. 最初と最後の頁 8, 15
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 R. Iba, Y. Adachi, S. Ono, K. Oishi, H. Katagiri, K. Yasui	4. 巻 19
2. 論文標題 NO gas doping of ZnO films using Ir hot-wire in catalytic reaction-assisted chemical vapor deposition	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Material Science and Engineering with Advanced Technology	6. 最初と最後の頁 19-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://dx.doi.org/10.18642/jmseat7100122042	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27件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 17件）

1. 発表者名 K. Yasui
2. 発表標題 Catalytic-Reaction Assisted Chemical Vapor Deposition for Metaloxide Film Growth
3. 学会等名 Nanotech Malaysia 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Saito, A. Kato, A. M. Hashim, K. Yasui
2. 発表標題 Distribution of Dislocations in ZnO Thin Films Grown on a-plane Sapphire Substrates using a Reaction Between Dimethylzinc and High-temperature H ₂ O Generated by a Catalytic Reaction
3. 学会等名 45th International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films (ICMCTF) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Saito, M. Ikeda, A. Kato, K. Oishi, H. Katagiri, K. Yasui
2. 発表標題 Optical properties of non-polar ZnO films grown by catalytic reaction-assisted chemical vapor deposition
3. 学会等名 Nanotech Malaysia 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Adachi, S. Ono, A. Kato, A. M. Hashim, K. Yasui
2. 発表標題 Nitrogen doping of ZnO films using Ir hot-wire in catalytic reaction-assisted CVD
3. 学会等名 10th International Conference on Hot-Wire Chemical Vapor Deposition (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Saito, S. Ono, A. M. Hashim, K. Yasui
2. 発表標題 Monomolecular layer controlled deposition of ZnO thin films using a pulsed valve by catalytic reaction-assisted chemical vapor deposition
3. 学会等名 19th Int. Conf. on Metalorganic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE-XIX) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Adachi, R. Iba, A. M. Hashim, A. Kato, K. Yasui
2. 発表標題 Acceptor Doping of ZnO Films by NO Gas Decomposition on Heated Ir Wire Surface in a Catalytic Reaction-Assisted CVD
3. 学会等名 The 25th International Display Workshops (IWD ' 18) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安達雄大, 伊庭竜太, 小野翔太郎, Abdul M. Hashim, 安井 寛治
2. 発表標題 触媒反応支援CVD法における酸化亜鉛薄膜への窒素ドーピング
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊庭竜太, 齋藤太朗, ラタン ダット, 大石耕一郎, 片桐裕則, 安井寛治
2. 発表標題 触媒反応支援CVD法によるZnO膜へのMg添加
3. 学会等名 2018年電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Yasui, M. Ikeda, Y. Adachi, R. Tajima, A. Kato
2. 発表標題 Polarization spectroscopy of non-polar ZnO films grown using high-temperature H ₂ O generated by catalytic reaction
3. 学会等名 IUMRS-ICAM2018, C4-028-004, Kyoto Univ., 27-31, Aug., 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Ono, T. Saitou, R. Tajima, Y. Tamayama, K. Yasui
2. 発表標題 Monolayer controlled deposition of ZnO thin films by catalytic reaction-assisted chemical vapor deposition
3. 学会等名 44th International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films, FP-3, San Diego, USA, April 24-28, 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 A. Kato, M. Ikeda, Y. Adachi, R. Tajima, K. Yasui
2. 発表標題 Characteristics of non-polar ZnO films grown by catalytic reaction assisted chemical vapor deposition
3. 学会等名 44th International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films, C2-2-5, San Diego, USA, April 24-28, 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Ono, T. Saito, R. Tajima, T. Kato, and K. Yasui
2. 発表標題 Control of zinc oxide film growth at the monomolecular layer level by catalytic reaction-assisted chemical vapor deposition
3. 学会等名 IUMRS-ICAM2018, A4-P31-001, Kyoto Univ., 27-31, Aug., 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1 . 発表者名 M. Ikeda, Y. Adachi, R. Tajima, A. Kato, K. Yasui,
2 . 発表標題 Optical emission properties of non-polar ZnO films grown using hypersonic H ₂ O beam generated by a catalytic reaction
3 . 学会等名 Int. Sympo. on Surf. Sci., 6PN-40, Epocal Tsukuba, 23-26, Oct. 2017 (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Y. Adachi, M. Ikeda, R. Tajima, A. Kato, K. Yasui
2 . 発表標題 Nonpolar ZnO films grown using catalytically-generated high-energy H ₂ O
3 . 学会等名 IUMRS-ICA (Int. Conf. of Asia) A2-P03, 5-9, Nov. 2017, Taipei (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 M. Ikeda, S. Ono, Y. Adachi, R. Tajima, A. Kato, K. Yasui
2 . 発表標題 Characteristics of nonpolar ZnO films grown on R-sapphire substrates using catalytically-generated high-energy H ₂ O
3 . 学会等名 Int. Display Workshop 2017, PHp 1-1, 6-8, Dec. 2017, Sendai Kokusai Center (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. Ono, T. Saitou, T. Kato, K. Yasui
2 . 発表標題 Monomolecular layer controlled deposition of ZnO thin films using a pulsed valve by catalytic reaction-assisted chemical vapor deposition
3 . 学会等名 Int. Sympo. on Surf. Sci., 6PN-6, Epocal Tsukuba, 23-26, Oct. 2017 (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 小野翔太郎, 齋藤太朗, 伊庭竜太, 安井寛治
2. 発表標題 加熱金属触媒体表面で励起したNOガスによるZnO結晶への窒素ドーブ
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会, 8a-PA2-4, 2017年9月8日, 福岡
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 安達雄大, 池田宗謙, 田島諒一, 加藤有行, 安井寛治
2. 発表標題 触媒反応支援CVD法によりR面サファイア基板上に堆積した非極性ZnO膜の偏光特性
3. 学会等名 2017年 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-6-2, 2017年9月13日, 東京
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 齋藤太朗, 池田宗謙, 加藤有行, 大石耕一郎, 片桐裕則, 安井 寛治
2. 発表標題 触媒反応支援CVD法による非極性ZnO結晶膜の光学特性
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会, 19p-P6-16, 2018年3月17-20日, 早稲田大学
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安達雄大, 小野翔太郎, A. M. Hashim, 安井寛治
2. 発表標題 Ir触媒表面で励起したNOガスによるZnO膜への窒素ドーピング
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会, 19p-P11-26, 2018年3月17-20日, 早稲田大学
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kanji Yasui, Ryouichi Tajima, Yasuhiro Tamayama, and Abdul Manaf bin Hashim
2. 発表標題 Heteroepitaxial Growth of Zinc Oxide Thin Films by a Catalytic Reaction-Assisted Chemical Vapor Deposition
3. 学会等名 24th Int. Conf. on Composites/Nano Engineering (ICCE-24) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Tajima, K. Watanabe, S. Ono, T. Kato, K. Yasui
2. 発表標題 Effects of N2O Addition during the Growth of ZnO Films by Chemical Vapor Deposition Using a Catalytic Reaction
3. 学会等名 SCEI 82nd Annual Meeting (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 安井寛治
2. 発表標題 白金ナノ粒子表面で生成した高エネルギー水分子を用いた金属酸化物薄膜の成長
3. 学会等名 第13回Cat-CVD研究会 (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 R. Tajima, Y. Teraguchi, Y. Tamayama, K. Yasui
2. 発表標題 Catalytic-reaction-assisted metal-organic vapor phase epitaxy for the growth of metaloxide thin films
3. 学会等名 International Conference on MOVPE 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 K. Watanabe, S. Ono, Y. Teraguchi, T. Nakamura, T. Kato, K. Yasui
2. 発表標題 Dependence of the properties of ZnO thin films on the structure of de Laval nozzle for the generation of high-energy H2O beam
3. 学会等名 18th International Conference on Crystal Growth & Epitaxy (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 小野翔太郎, 齋藤太朗, 玉山泰宏, 安井寛治
2. 発表標題 金属原料ガスのパルス供給によるZnO結晶膜の単分子層成長制御
3. 学会等名 2016年第77回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 S. Ono, T. Saito, R. Tajima, Y. Tamayama, K. Yasui
2. 発表標題 Monomolecular layer control deposition of ZnO thin films by a catalytic reaction-assisted chemical vapor deposition
3. 学会等名 MRS-J Annual Meeting, Internationa section
4. 発表年 2016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
研究分担者	加藤 有行 (Kato Ariyuki) (10303190)	長岡技術科学大学・工学研究科・准教授 (13102)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	田中 久仁彦 (Tanaka Kunihiko) (30334692)	長岡技術科学大学・工学研究科・准教授 (13102)	
連 携 研 究 者	高橋 一匡 (Takahashi Kazumasa) (10707475)	長岡技術科学大学・工学研究科・助教 (13102)	