

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 17 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02772

研究課題名(和文)フォノン機能制御による窒化物半導体光素子の基盤科学技術開拓

研究課題名(英文)Development of basic science and technology for nitride semiconductor optical devices by controlling phonon functions

研究代表者

石谷 善博 (Ishitani, Yoshihiro)

千葉大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：60291481

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：光デバイスは温度上昇により動作特性が劣化する。熱の本質であるフォノンについて、2波長同時照射によるラマンイメージングでフォノン輸送評価が可能であることを示した。特に格子不整合転位による基板への熱輸送の阻止効果がイメージングされた。励起子発光では状態占有度は低いものの縦光学(L0)フォノンの制御が最も重要であり、残留電子増加がフォノン過程の影響を一定量抑制できることが分かった。表面の金属ストライプ構造でL0フォノン共鳴輻射が観測され、L0フォノンに特化した冷却の可能性があることが分かった。これらにより今後の冷却のためのフォノン輸送制御方式、評価手法に関する研究基盤が整った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光・電子デバイスの熱制御ではモードを区別したフォノン輸送解析が必要であり、本研究で構築した2波長レーザ同時照射ラマンイメージングは重要な制御対象である縦光学(L0)フォノンを区別した熱輸送評価が可能である。本研究で構築した励起子解析コードは励起空間の全エネルギー収支を取り入れたダイナミクス解析コードで、新たな発光効率解析手法の基盤となる。表面マイクロ構造によるL0フォノン共鳴赤外輻射の観測はフォノンによる新規赤外-THz輻射デバイスの構築の他、L0フォノンに特化した冷却の可能性を示し、デバイス冷却機構の方式に多様性をもたせる。本研究は、デバイスの省エネ化や高機能化の基礎物理開拓に資する。

研究成果の概要(英文)：The operating characteristics of optical devices deteriorate owing to temperature rise. It was shown that phonon transport, which is the essence of heat, can be characterized by Raman imaging by simultaneous irradiation of two lasers. In particular, heat transport was found to be blocked by the misfit dislocations located in the vicinity of interface. Although the occupation factor of longitudinal optical (L0) phonon is low, the control of this phonon is the most important factor. It was also found that the increase in residual electrons can suppress the influence of the phonon process to a certain extent. We have observed L0 phonon resonant THz-IR radiation from surface metal stripe structures, which indicates that there is a possibility of cooling for L0 phonon. These results are thought to be the basis of future phonon transport control and its characterization methods.

研究分野：半導体工学

キーワード：フォノン 励起子ダイナミクス 顕微ラマン分光 THz輻射 縦光学モード フォノン輸送

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

半導体光素子の温度上昇は、量子井戸からの電子漏洩や非輻射性電子正孔再結合によるデバイス特性の劣化を招くため、その抑制が求められていた。その状況は現在もお変わらない。しかし、追加的排熱構造(ヒートシンク)等以外に有効な手段がとられていない。電流注入型 GaN 系レーザでは 150K 程度以上の動作温度での励起子消滅が報告された。一方、超高効率太陽電池を目指す第 3 世代太陽電池(量子構造)では、量子井戸からの電子・正孔(キャリア)取出しを前提とし、積極的熱制御の実現が課題であった。これら光素子の動作特性の支配要因は非熱平衡状態での電子状態の励起・脱励起速度のバランスを決める高速な電子-格子振動(フォノン)相互作用である。一方、これまでフォノンを主体とする素子の開発は殆どなかったが、数~数十 THz 領域の電磁波では LO フォノン(更にプラズモンの結合)モードを用いて、光との小さい相互作用エネルギー幅を利用した発光受光素子が考えられる。

GaN(励起子結合エネルギー  $E_x = 27\text{meV}$ )では室温で励起子発光が観測される一方で、レーザデバイスでは 150K 程度以上で励起子がほぼ解離すると報告された。我々は極低温時間分解 PL で励起後初期に非熱平衡フォノンによる励起子解離を見出し、更にフォノンを含む理論計算から励起子・励起子分子解離ダイナミクスの解析を始めていた。その結果、フォノン輸送については励起場のエネルギーダイナミクス制御を行えば、デバイス動作特性を大幅に改善し様々な励起子デバイス開拓への道が開けると考えられた。特に、窒化物半導体は AlGaN 系の大きな禁制帯幅  $E_g$ 、大きなフォノンエネルギー、全組成域で高速な電子-フォノン相互作用を示し、フォノン局在性制御が光デバイス動作特性制御性を大きく変える可能性があることは定性的に理解されていたため、窒化物半導体のフォノン制御は科学的・工学的に今後極めて重要性であると考えられた。図 1 に電子フォノン相互作用ハミルトニアン材料依存項を示す。この図から、窒化物や酸化物が強い電子-フォノン相互作用特性を有することが分かる。ところが発光素子やトランジスタにおけるフォノン制御は例がなく、その手法については暗中模索の状況であった。

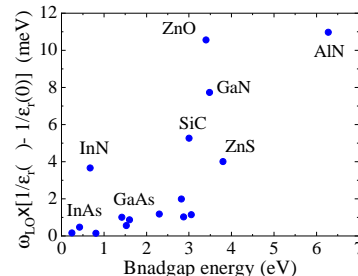


図 1 各種半導体のバンドギャップと電子フォノン相互作用強度の関係

## 2. 研究の目的

電子フォノン相互作用の大きい窒化物を対象として、フォノンと電子・正孔および励起子の相互作用過程とその発光過程に対する影響を明らかにし、デバイス特性向上のためにフォノン過程の何が制御対象となるかについて明らかにすることが第一の目的であった。次に発光デバイスを対象とし、窒化物半導ヘテロ構造・超格子を利用したフォノン制御や更に欠陥等を利用して量子井戸発光層からフォノン排除を行う構造の可能性を示すこと、更に研究が進めば、第 3 世代太陽電池構造で量子井戸付近のフォノン閉込めにより量子井戸からの電流取り出し効率の向上を確認することが目的とされた。一方、これまで行ってきた挑戦的萌芽研究から半導体の表面ナノ-マイクロ構造を用いた縦光学(L0)フォノン共鳴の輻射が予測されていた。この L0 フォノン共鳴輻射を観測し、放射冷却による発光効率改善の可能性を探ることも本研究の目的の一つとされた。これらの研究を行うために、フォノンの輸送過程を調べる必要がある。現在、光学的ポンプ-プローブ法による光反射率の時間変化から温度測定を行ってフォノン輸送を議論する手法がある。これに対して、本研究では上記研究を遂行するため、フォノンモードを区別したフォノン輸送過程を顕微測定によりイメージングする手法を開拓することもテーマとなった。

## 3. 研究の方法

### 3.1 励起子ダイナミクス解析

本項目について、数値計算および実験による研究を行った。数値計算では、電子衝突、L0 フォノンによるフレリッヒ相互作用、縦音響フォノンによる変形ポテンシャル相互作用とピエゾ電気相互作用による素過程を取り入れて、レート方程式に基づく解析コード(PXR モデル)を製作して行った。素過程の速度は遷移行列要素を計算して求め、ここでは 2016 年に行った計算に

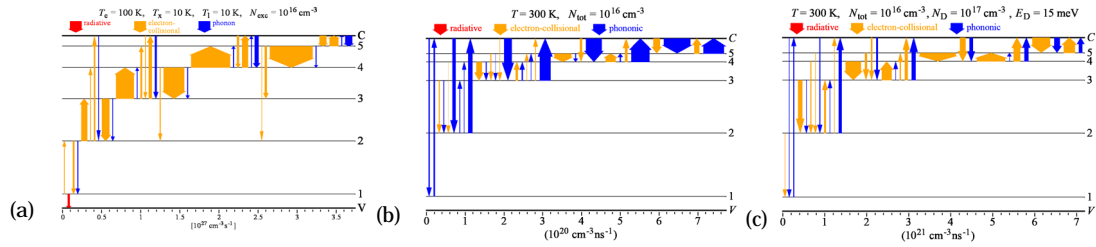


図2 PXRモデルによる励起子準位間フラックス計算結果(励起されている総電子数は  $10^{16} \text{cm}^{-3}$ )

比べて行列要素の近似をより高次として正確さを増した。過渡変化では、電子正孔の瞬時生成後の発光強度の時間変化を求め、単一指数関数近似で近似した輻射減衰寿命、また各準位のポピュレーションの寿命を求めた。非輻射再結合を考慮した場合は、極低温時で非輻射過程が非活性であると仮定し、発光強度の温度変化から内部量子効率を求め、励起子の有効輻射寿命を求めた。

実験では、サブナノ秒およびフェムト秒レーザーを用いた時間分解フォトルミネッセンス(PL)解析、バンドギャップ以下のエネルギーのレーザーを用いた深い準位のPL解析を行った。時間分解PL測定では焦点距離 25cm、刻線数 600本/mmの回折格子をもつ分光器とストリークカメラ(C434-02, Hamamatsu)をもつシステムおよび焦点距離 50cm、刻線数 2400本/mmの回折格子をもつ分光器(MS520, SOL)と光電子増倍管とデジタルオシロスコープ(Waverunner640Zi, LeCroy)によるシステムを用いた。

### 3.2 フォノン輸送

熱生成とラマン散乱測定を別々のレーザーで行う2波長顕微ラマン分光システムによるイメージングシステムを構築してフォノン輸送解析を行った。ラマン分光装置(Nanofinder 30, Tokyo Instruments)では、焦点距離 80cmで、クロススリット、刻線数 3600本/mm, 2400本/mm, 1800本/mm, 600本/mmの回折格子をもつ分光器と波長 532nm および 325nm のレーザー、ピエゾステージ, NAO.95/×100(可視) および NAO.5/×40(紫外)の対物レンズをもつものを用いた。

### 3.3 縦光学フォノン共鳴輻射とその応用

試料はフォトレジストとパターンマスクを用いたフォトリソグラフィーにより周期  $4\mu\text{m}$  から  $40\mu\text{m}$  のストライプパターンを形成した。ここではマスクアライナ(MA-20, Mikasa)を用いた。試料によりメサエッチングを行って段差形状とし、その底部に金属膜の堆積を行った。製作された試料はフーリエ変換型赤外分光光度計(FTIR)により反射測定および発光測定が行われた。また、有限差分時間領域(FDTD)法により赤外光の反射特性に関するシミュレーションが行われた。

## 4. 研究成果

### 4.1 励起子ダイナミクス解析

バルク GaN の励起子に関して、 $E_x = 27\text{meV}$  として PXR モデルに基づく計算を行った。主量子数  $n$  は 5 つを取り入れた。ここでは A, B, C の励起子は区別していない。図 2 (a), (b) に不純物等がない純粋な GaN における各準位間のポピュレーションフラックスを示している。赤, 黄, 青の矢印はそれぞれ輻射, 電子衝突, およびフォノン過程による遷移を示す。低温では各離散準と連続準位間のフラックスは小さく、また  $n = 2$  準位では  $n = 1$  への遷移が主となる一方でそれより上の準位は一つ上および一つ下の準位へのフラックスが均衡している。一方、室温ではフォノンによる遷移が支配し、各準位から直接離離へのフラックスが支配的になることが分かる。ここに活性化エネルギー  $15\text{meV}$  のドナー(Si を想定)が入ると(同図(c))フォノン過程を相対的に抑え

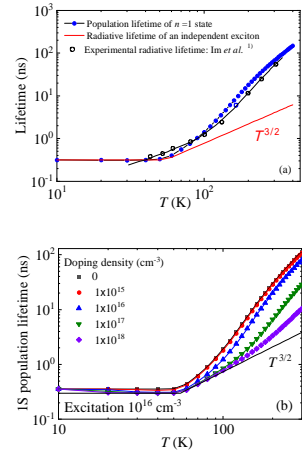


図3 数値計算による励起子輻射再結合寿命:(a)では実験値をプロットしてある。

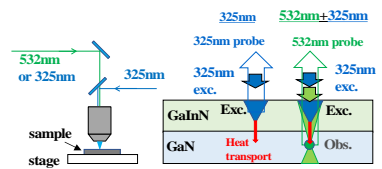


図4 2波長ラマンイメージング測定原理図

られることが分かる。励起子輻射の主要素をもたらす 1S ポピュレーションの寿命の温度依存性を図 3 に示す。残留ドナーがない場合は、輻射寿命は、よく参照される  $T^{3/2}$  の依存性より長寿命になる。 $T^{3/2}$  則は状態  $n = 1$  のみを考慮して励起子の運動量分布が Maxwell-Boltzmann 則に従う場合であり、 $E_x = 27 \text{ meV}$  の GaN では室温において連続準位における相当数のポピュレーションが予測され、 $T^{3/2}$  則が破綻することが容易に想定される。一方で実験結果では、この法則に従う結果を含めて様々な温度依存性が報告されている<sup>1-3)</sup>。ドナーが増加するとこの温度依存性は変化し、 $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  程度になると 100K 付近で  $T^{3/2}$  の依存性に従う温度範囲が存在することが分かる。この変化は、背景となる電子密度の増加によりフォノン過程の影響が相対的に抑制されているためであると考えられる。これらの遷移過程に対して LO フォノンによる過程と LA フォノンによる過程の占める割合について考察を進めた。計算は  $E_x$  がさらに大きい AlN および ZnO についても行った。その結果全ての結晶で約 150K 以上で LO フォノンによる効果が最も大きいことが分かった。これは、これらの物質では LO フォノンエネルギー (70 - 110meV) が大きく LO フォノンの状態占有度が小さいにも拘らず、強い相互作用が作用する結果 LO フォノンによる過程が励起子の状態分布を支配するためと考えられる。

実験では、サファイア基板上有機金属気相成長法により成長された GaN について、時間分解 PL 測定を行った。ここでは、自由励起子のうち小さい運動量をもち輻射遷移が可能なもの以外のものを含む全ポピュレーションを解析するため、フォノンレプリカを解析に入れた。16K のスペクトルでは A 励起子  $n = 1$  と  $n = 2$  のピークが明瞭に観測された。その結果、励起電子・正孔ペア数が同じでも短波長レーザを用いて電子・正孔の緩和エネルギーが大きいと励起子運動量が大きくなること、その影響が 16K で 1 ns 程度まで続く状態であった。このスペクトルを各素過程による発光線のプロファイルを考慮したスペクトルフィッティングにより各過程の発光強度を抽出し、それらの比を考察した結果、 $n = 2$  状態は連続準位との間でポピュレーションの授受を繰り返す相互作用が強く、 $n = 1$   $n = 2$  の遷移は無視できること等がわかり、PXR モデルの結果の妥当性が示されていることが分かった。これらの結果、150K 以上では LO フォノンの輸送制御が最も重要であることが分かり、通常の熱輸送の他、フォノンモードを区別し、特に LO フォノンの輸送観測と制御に焦点を当てるべきであることが分かった。

#### 4.2 フォノン輸送

サファイア基板に成長した C 面成長  $\text{Ga}_{0.84}\text{In}_{0.16}\text{N}(110\text{nm})/\text{GaN}(3\mu\text{m})$  を試料として 325nm レーザによるラマン散乱と 532nm レーザによるもの、これら 2 レーザを同時に照射した測定を行った。図 4 に測定の概略を示す。325nm レーザは GaInN 膜内で吸収されるため、GaInN の歪や組成を示している。図 5 に PL 強度像、325nm の 10mW 励起の場合の  $E_2(\text{high})$  モードエネルギーの像と 20mW にパワーを上げた時のモード周波数変化を示す。PL 強度像 ((d) 図) の破線で示された四角形の内部がラマン像の観測範囲である。この図からわかることは、ラマン散乱像は格子不整転位 (MD) の分布を反映していること、レーザ強度増加により増加した熱エネルギーは構造に大きな依存性を示さずに GaInN 内で輸送されていること、LO フォノンでプローブされる温度上昇が大きいことである。LO フォノンの観測では LO フォノン特有の現象が観測されたと思われる。図 6 に 325nm レーザの有無に対する 532nm で測定した  $E_2(\text{high})$  モードエネルギー変化を示す。図 5 (d) の実線の四角形内部が測定されている。532nm レーザ光は GaN まで透過するため、GaN の

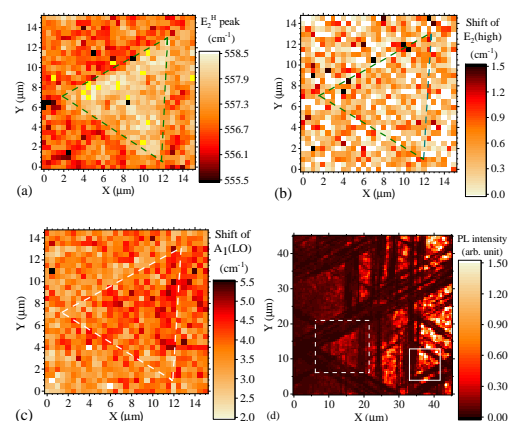


図 5 325nm レーザのみによるラマンイメージング(a)とレーザパワー増加によるフォノン周波数減少(b), (c), PL 強度像(d)

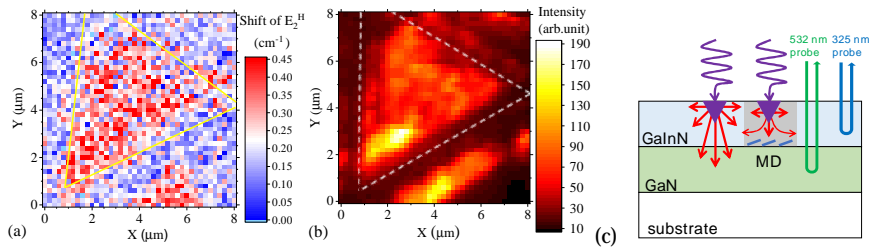


図6 532nm ラマン測定による GaN-E<sub>2</sub>(high)モード周波数の 325nm 照射による減少(a)と PL 強度(b), 熱輸送のモデル図(c)

フォノンを検知しており, ラマンピーク周波数も GaN のもので, GaInN のものとは差異があった。この像(a)の三角形構造は図5の GaInN の像で見られた MD の多少を示す像の構造および PL 像と一致している。ここで PL 強度が大きく転位密度の小さい三角形内部で温度上昇が大きく, 転位密度の大きい箇所で温度上昇が小さいことが分かる。これは, 結晶界面近傍の MD 部で熱輸送が制限されていることを意味する。即ち, 熱の排除には界面での転位を少なくすることが必要である。

超格子を用いたフォノン分散制御によるフォノン輸送制御性に関して実験的研究を AlInN/GaN 超格子などで進めているが, 混晶組成の空間的不均一性や結晶欠陥などの影響のため, 明確な情報が得られなかった。現在さらに貫通転位一本による熱輸送効果についても検討を進めており, 上記の結果を含めて欠陥の影響が明らかになりつつある。これらを基板に超格子によるフォノン輸送制御の可能性を今後明らかにすることができると考えられる。

#### 4.3 縦光学フォノン共鳴輻射とその応用

図7(a), (b)に Au/GaAs ストライプ構造からの熱輻射スペクトルを示す。試料温度は 630K, メサ高さは 200nm, 金属と GaAs 幅は図中に示してある。(b)は偏光分離をしてストライプ構造からの電気双極子放射による成分を抽出したものである。LO フォノンに共鳴する 8.5THz の輻射が得られている。同図(c)は Ga<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>P を用いた構造からの輻射で二つの LO モードからの輻射が観測される。このことは, 高密度 p 型試料における量子干渉を利用した 2 種離散準位と 1 連続準位の量子干渉に基づく吸収スペクトル制御が可能であることを示しており, 効率の良い LO フォノンエネルギー放射の可能性を示す。現在, 金属-GaN ストライプ構造で局所フォノン場と励起子の相互作用制御を調べている。PL 測定では, 自由励起子発光より高エネルギー側に LO フォノン放出によるキャリアまたは励起子のエネルギー緩和過程を示す発光ピークが観測されており, 励起子の生成解離過程に関する情報がこのピークに含まれていると考えられること, 発光スペクトルの励起強度依存性や温度依存性が表面構造のないものとは異なっていることから本構造による励起子運動量状態が変化していると考えられる結果が得られている。しかし, この詳細なメカニズムについては不明であり, 今後 LO フォノンレプリカ解析等により表面マイクロストライプ構造と励起子 LO フォノン相互作用の変化の関係についてさらに調査を進める。

- [参考文献] 1. J. S. Im, A. Hangleiter et al., Appl. Phys. Lett. **70**, 631(1997)  
 2. S. F. Chichibu et al. J. Appl. Phys. **123**, 161413 (2018)  
 3. C. Hauswald, O. Brandt et al. Phys. Rev. B **90**, 165304 (2014)

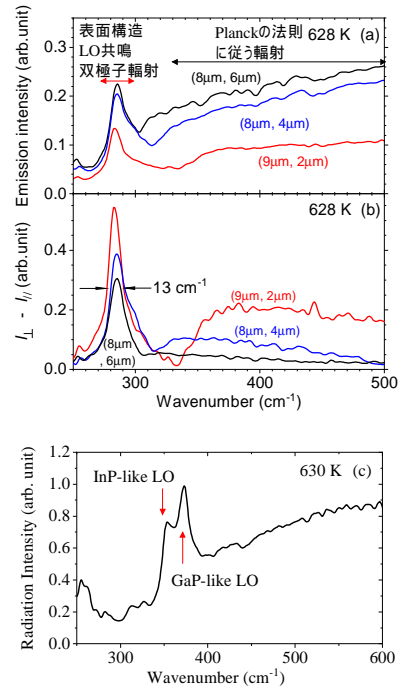


図7 金属-半導体ストライプ構造からの LO フォノン共鳴赤外輻射

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Daisuke Uehara, Moe Kikuchi, Bei Ma, Hideto Miyake, and Yoshihiro Ishitani	4. 巻 13
2. 論文標題 Charge transfer processes related to deep levels in free standing n-GaN layer analyzed by above and sub-bandgap energy excitation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 061003-1, 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.35848/1882-0786/ab8c1c">https://doi.org/10.35848/1882-0786/ab8c1c</a>	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 Shungo Okamoto, Naomichi Saito, Kotaro Ito, Bei Ma, Ken Morita, Daisuke Iida, Kazuhiro Ohkawa, and Yoshihiro Ishitani	4. 巻 116
2. 論文標題 Energy transport analysis in a Ga <sub>0.84</sub> In <sub>0.16</sub> N/GaN heterostructure using microscopic Raman images employing simultaneous coaxial irradiation of two lasers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 142107-1,5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1063/5.0003491">https://doi.org/10.1063/5.0003491</a>	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 Kensuke Oki and Yoshihiro Ishitani	4. 巻 125
2. 論文標題 Influence of LO and LA phonon processes on thermal-nonequilibrium excitation and deexcitation dynamics of excitons in GaN, AlN, and ZnO	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 205705-1, 13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1063/1.5092620">https://doi.org/10.1063/1.5092620</a>	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 Yoshihiro Ishitani, kensuke Oki, and Hideto Miyake	4. 巻 58
2. 論文標題 Statistics of excitonic energy states based on phononic-excitonic-radiative model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SCCB34 : 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab09e2	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 Yoshihiro Ishitani, Tomoyuki Aoki, Hidenori Funabashi, and Ken Morita	4. 巻 113
2. 論文標題 Selective thermal radiation at the longitudinal optical phonon energy under geometric condition of metal-semiconductor mesa stripe structures	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 192105:1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5047458	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 S. Tanaka, K. Shojiki, K. Uesugi, Y. Hayashi, H. Miyake	4. 巻 512
2. 論文標題 Quantitative evaluation of strain relaxation in annealed sputter-deposited AlN film	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Crystal Growth	6. 最初と最後の頁 16-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2019.02.001">https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2019.02.001</a>	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 K. Uesugi, Y. Hayashi, K. Shojiki, S. Xiao, K. Nagamatsu, H. Yoshida, H. Miyake	4. 巻 510
2. 論文標題 Fabrication of AlN templates on SiC substrates by sputtering-deposition and high-temperature annealing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Crystal Growth	6. 最初と最後の頁 13-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2019.01.011">https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2019.01.011</a>	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 Y. Hayashi, K. Tanigawa, K. Uesugi, K. Shojiki, H. Miyake	4. 巻 512
2. 論文標題 Curvature-controllable and crack-free AlN/sapphire templates fabricated by sputtering and high-temperature annealing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Crystal Growth	6. 最初と最後の頁 131-135
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2019.02.026">https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2019.02.026</a>	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 Hironori Sakamoto, Eito Takeuchi, Kouki Yoshida, Ken Morita, Bei Ma, and Yoshihiro Ishitani	4. 巻 51
2. 論文標題 Electric-dipole absorption resonating with longitudinal optical phonon-plasmon system and its effect on dispersion relations of interface phonon polariton modes in metal/semiconductor-stripe structures	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Physics D	6. 最初と最後の頁 015105-1, -10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/136-6463/aa9918	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 Kensuke Oki, Bei Ma, and Yoshihiro Ishitani	4. 巻 96
2. 論文標題 Population decay and distribution of exciton states analyzed by rate equations based on theoretical phononic and electron-collisional rate coefficient	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 205204-1, -15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.96.205204	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73件 (うち招待講演 13件 / うち国際学会 32件)

1. 発表者名 Shungo Okamoto, Bei Ma, Ken Morita, Daisuke Iida, Kazuhiro Ohkawa, and Yoshihiro Ishitani
2. 発表標題 Microscopic analysis of heat transport at GaInN/GaN heterointerface with misfit dislocations by two-wavelength Raman measurements
3. 学会等名 The 9th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshihiro Ishitani, Keisuke Ebisawa, Daichi Tanaka, Nozomi Aihara, Bei Ma, and Ken Morita
2. 発表標題 Longitudinal Optical Phonon Resonating Dipole Radiation from Metal- Semiconductor Composite Structures and Quantum Interference
3. 学会等名 IRMMW-THz (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 Daisuke Uehara, Moe Kikuchi, Bei Ma, Ken Morita, Hideto Miyake, and Yoshihiro Ishitani,
2. 発表標題 Deep level luminescence of HVPE grown GaN by below-bandgap photo-excitation
3. 学会等名 International Conference on Nitride semiconductors (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsubasa Yamakawa, Bojin Lin, Kensuke Oki, Bei Ma, Ken Morita, Yusuke Hayashi, Hideto Miyake, Kazuhiro Ohkawa
2. 発表標題 Functional metal-GaN micro-stripe structures for infrared and ultraviolet regions
3. 学会等名 International Conference on Nitride semiconductors (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Bei Ma, Ming Chuan Tang, Ken Morita, Yoshihiro Ishitani, Kohei Ueno, Atsushi Kobayashi, Hiroshi Fujioka
2. 発表標題 Analysis of highly Si-doped GaN using various lattice vibration modes observed by infrared and Raman spectroscopy
3. 学会等名 International Conference on Nitride semiconductors (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshihiro Ishitani, Kensuke Oki, Naomichi Saito, Tsubasa Yamakawa, Daisuke Uehara, Shungo Okamoto, Moe Kikuchi, Keisuke Ebisawa, Bojin Lin, Bei Ma, and Ken Morita
2. 発表標題 Interactions of phonon, electron, and photon in nitride semiconductors
3. 学会等名 Intensive Discussion on Growth of Nitride Semiconductors (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshihiro Ishitani, Kensuke Oki, Tsubasa Yamakawa, Bojin Lin, Bei Ma, and Ken Morita
2. 発表標題 Statistics of excitonic energy states based on phonon-exciton-radiation model
3. 学会等名 International Workshop on Nitride Semiconductors (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshihiro Ishitani
2. 発表標題 Optical absorption and emission in THz-mid infrared region of metal-semiconductor composites
3. 学会等名 Nano Science and Technology 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshihiro Ishitani, Hironori Sakamoto, Tomoyoki Aoki, Hidenori Funabashi, and Ken Morita
2. 発表標題 Optical properties of metal-semiconductor composites in THz-mid infrared region
3. 学会等名 International Conference on Nanomaterials and Nanotechnology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshihiro Ishitani
2. 発表標題 Control of THz emission and absorption resonating with LO phonon energy by metal/semiconductor-composite materials
3. 学会等名 International Symposium on Semiconductor Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石谷善博
2. 発表標題 電子 フォノン相互作用およびフォノン輸送のミクロ評価
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 地崎 匡哉, 大木 健輔, 馬ベイ, 森田 健, 石谷 善博
2. 発表標題 輻射性励起子減衰寿命の温度依存性への非輻射再結合の影響
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 林鴻太郎, 田中大智, 海老澤啓介, 相原 望, 米本拓郎, Hnin Lai Lai Aye, 森田 健, 馬 ベイ, 石谷善博
2. 発表標題 n 型間接遷移半導体GaP表面マイクロストライプ構造による中赤外輻射
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 相原 望, 田中大智, 馬 ベイ, 森田 健, 石谷善博
2. 発表標題 2LOフォノン-価電子帯間電子遷移系量子干渉の理論解析
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 海老澤 啓介, 馬 ベイ, 森田 健, 大木 健輔, 石谷 善博
2. 発表標題 GaAs-金属ストライプ構造からのL0フォノン共鳴赤外輻射特性の構造依存性
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡本 駿吾, 伊藤航太郎, 馬 ベイ, 森田 健, 飯田 大輔, 大川 和宏
2. 発表標題 2 波長ラマン分光を用いたフォノン輸送評価における測定モード依存性
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 相原 望, 田中大智, 森田 健, 馬 ベイ, 石谷善博
2. 発表標題 価電子帯間遷移 - 2種L0フォノン系における量子干渉の理論解析
3. 学会等名 第3回フォノンエンジニアリング研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 海老澤啓介, 田中大智, 森田 健, 馬 ベイ, 石谷善博
2. 発表標題 GaAs-金属ストライプ構造からのL0フォノン共鳴赤外輻射特性の構造依存性
3. 学会等名 第3回フォノンエンジニアリング研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菊地 萌, 上原大輔, 馬 ベイ, 森田 健, 三宅秀人, 石谷善博
2. 発表標題 GaNの深い準位の直接光励起による発光特性の考察
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 湯 明川, 馬 ベイ, 森田 健, 上野耕平, 小林 篤, 藤岡洋, 石谷善博
2. 発表標題 高濃度Si ドープGaNの深さ方向結晶性の赤外およびラマン分光評価
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大木 健輔, 野町 健太郎, 西川 智秀, 馬ベイ, 森田 健, 石谷 善博
2. 発表標題 GaN, AlN, ZnOにおける励起子の非熱平衡解析
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中山政裕, 菅野裕吾, 石谷善博, 北田貴弘, 森田健
2. 発表標題 小型フーリエ変換赤外分光装置の製作と測定法の確立
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 湯明川, 馬ベイ, 森田健, 石谷善博
2. 発表標題 赤外分光法によるGaNの高電子密度層の空間分布評価
3. 学会等名 テラヘルツ科学の最先端V
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齋藤 直道, 瀧口 佳祐, 馬 ベイ, 森田 健, 飯田 大輔, 大川 和宏, 石谷 善博
2. 発表標題 ラマン散乱マッピングによるInGaNの局所フォノン場評価
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 大木 健輔, 馬 ベイ, 森田 健, 石谷 善博
2. 発表標題 ワイドギャップ半導体における 励起子-フォノン系の非熱平衡解析
3. 学会等名 第2回フォノンエンジニアリング研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Hayashi, H. Miyake
2. 発表標題 Plasma activated bonding of 2-inch sputtered AlN wafers
3. 学会等名 MRS Spring Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 H. Miyake, S. Xiao, Y. Hayashi, K. Shojiki
2 . 発表標題 Fabrication of High-Quality AlN on Sapphire for Deep UV LED
3 . 学会等名 Taiwan Solid State Lighting ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Shojiki, X. Liu, S. Kawai, H. Miyake
2 . 発表標題 Fabrication of High-Quality AlN Template on Sapphire Using High-Temperature Annealing
3 . 学会等名 Compound Semiconductor Week ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Uesugi, Y. Hayashi, K. Shojiki, S. Xiao, H. Yoshida, H. Miyake
2 . 発表標題 Characterization of strain relaxation behavior of annealed sputter deposited AlN films on SiC substrates
3 . 学会等名 ICMOVPE-XIX ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Hayashi, K. Tanigawa, K. Shojiki, H. Miyake
2 . 発表標題 Bowling Control of Sputtered AlN Caused by High Temperature Annealing
3 . 学会等名 ICMOVPE-XIX ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 H. Miyake
2 . 発表標題 Fabrication of High-quality AlN Template by High Temperature Annealing
3 . 学会等名 InRel-NPower ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 H. Miyake, K. Shojiki, X. Liu, Y. Hayashi, X. Shiyu, K. Uesugi
2 . 発表標題 Homoepitaxy of AlN on annealed AlN/sapphire template
3 . 学会等名 The 7th International Symposium on Growth of III-Nitrides(ISGN-7) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Uesugi, Y. Hayashi, K. Shojiki, S. Xiao, K. Nagamatsu, H. Yoshida, H. Miyake,
2 . 発表標題 Crystal quality improvement of sputter-deposited AlN films on SiC substrates by high temperature annealing
3 . 学会等名 he 7th International Symposium on Growth of III-Nitrides(ISGN-7) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Shojiki, K. Uesugi, K. Fujikawa, Y. Hayashi, S. Xiao, H. Miyake
2 . 発表標題 " Anisotropic strain in AlN film on sapphire substrate
3 . 学会等名 IWUMD2018 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年



1 . 発表者名 Hayashi, K. Uesugi, K. Shojiki, H. Miyake
2 . 発表標題 Polarity Inversion of AlN by Sputtering Condition Control for DUV-SHG Devices
3 . 学会等名 IWUMD2018 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. Xiao, N. Jiang, K. Shojiki, K. Uesugi, H. Miyake
2 . 発表標題 Preparation of high-quality thick AlN on sputtered and annealed nano-patterned sapphire substrates by hydride vapor-phase epitaxy
3 . 学会等名 IWUMD2018 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Uesugi <sup>1</sup> , Y. Hayashi, K. Shojiki, K. Nagamatsu, H. Yoshida, H. Miyake
2 . 発表標題 Crystalline quality improvement and suppression of cracking for sputter-deposited high-temperature annealed AlN films by stress control
3 . 学会等名 IWUMD2018 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 H. Miyake, K. Shojiki, Y. Hayashi, X. Shiyu, K. Uesugi, K. Nagamatsu
2 . 発表標題 Fabrication of high-quality AlN template by high-temperature annealing
3 . 学会等名 Japanese-Polish Workshop on Crystal Science ( 招待講演 ) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Miyake, K. Shojiki, Y. Hayashi, S. Xiao, K. Uesugi, K. Nagamatsu
2. 発表標題 High-temperature annealing of sputter-deposited AlN films on sapphire
3. 学会等名 International Workshop on UV Materials and Devices (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 . Xiao, N. Jiang, K. Shojiki, K. Uesugi, H. Miyake
2. 発表標題 Preparation of high-quality thick AlN layer on sputtered and annealed nano-patterned sapphire substrates by hydride vapor-phase epitaxy
3. 学会等名 International Workshop on UV Materials and Devices (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 . Uesugi, Y. Hayashi, K. Shojiki, K. Nagamatsu, H. Yoshida, H. Miyake
2. 発表標題 Reduction of threading dislocation density and suppression of cracking for sputter-deposited high-temperature annealed AlN films
3. 学会等名 International Workshop on UV Materials and Devices (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 稲森 崇文、鈴木 涼矢、劉 小桐、上杉 謙次郎、正直 花奈子、三宅 秀人
2. 発表標題 高温アニールAlN/サファイア上へのAlGaIn成長での歪み制御
3. 学会等名 第66 回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 白土 達也、林 侑介、上杉 謙次郎、正直 花奈子、三宅 秀人
2. 発表標題 ダイヤモンド基板上へのスパッタAIN成膜と高温アニール
3. 学会等名 第66 回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上杉 謙次郎、林 侑介、正直 花奈子、永松 謙太郎、三宅 秀人
2. 発表標題 深紫外発光素子応用に向けたスパッタ成膜AINテンプレートの転位密度低
3. 学会等名 第66 回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 庭 由季乃、正直 花奈子、上杉 謙次郎、肖 世玉、三宅 秀人
2. 発表標題 ナノPSS上スパッタ堆積アニールAIN膜を基板に用いたホモエピ成長
3. 学会等名 第66 回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林 侑介、藤川 海人、上杉 謙次郎、正直 花奈子、三宅 秀人
2. 発表標題 スパッタ法と高温アニールによるa面サファイア上c面AINの作製
3. 学会等名 第66 回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上杉 謙次郎、正直 花奈子、林 侑介、三宅 秀人、
2. 発表標題 高温アニールしたスパッタ成膜AINテンプレート上のAlGaN成長
3. 学会等名 第66 回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三宅秀人
2. 発表標題 窒化物半導体MOVPE成長における欠陥低減技術
3. 学会等名 応用物理学会東海支部基礎セミナー（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三宅秀人、正直花奈子、林侑介、 肖世玉、上杉謙次郎、永松謙太郎
2. 発表標題 深紫外LED社会実装に向けた基板作製技術
3. 学会等名 結晶成長の科学と技術第161委員会第109回研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宅秀人・正直花奈子・林侑介・肖世玉・上杉謙次郎・永松謙太郎
2. 発表標題 『AINテンプレート高品質化の進展』～深紫外LED実用化の鍵となる基板作製技術～
3. 学会等名 学振第162委員会 第110回研究会・特別公開シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上杉 謙次郎、林 侑介、正直 花奈子、永松 謙太郎、吉田 治正、三宅 秀人
2. 発表標題 高温アニールしたAlNのクラック抑制と高品質化
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 永松 謙太郎、上杉 謙次郎、三宅 秀人、吉田 治正
2. 発表標題 歪緩和による深紫外LEDの発光効率改善
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 永松 謙太郎、上杉 謙次郎、正直 花奈子、吉田 治正、三宅 秀人
2. 発表標題 スパッタ法AlN膜の高温アニールとその基板上へのAlGaIn深紫外LED作製
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 永松謙太郎・上杉謙次郎・正直花奈子・吉田治正・三宅秀人
2. 発表標題 スパッタ法AlN膜の高温アニールとその基盤上へのAlGaIn深紫外LED作製
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 林 侑介、上杉 謙次郎、正直 花奈子、三宅 秀人
2. 発表標題 スパッタ条件制御による -c/+c 極性反転AIN 構造の作製
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三宅秀人、正直花奈子、林侑介、肖世玉、上杉謙次郎、永松謙太郎
2. 発表標題 深紫外LED実用化の鍵となる基板作製技術
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上杉 謙次郎、正直 花奈子、林 侑介、肖 世玉、永松 謙太郎、吉田 治正、三宅 秀人
2. 発表標題 6H-SiC基板上におけるAIN周期構造の作製と評価
3. 学会等名 第10回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshihiro Ishitani
2. 発表標題 Optical absorption and emission inTHz-mid infrared region of metal-semiconductor composites
3. 学会等名 Nano ST 2018（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshihiro Ishitani
2. 発表標題 Statistics of excitonic energy states based on phonon-exciton-radiation model
3. 学会等名 International Workshop on Nitride Semiconductors (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大木 健輔、野町 健太郎、西川 智秀、馬 ベイ、森田 健、石谷 善博
2. 発表標題 GaN, AlN, ZnOにおける励起子の非熱平衡解析
3. 学会等名 65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石谷 善博、大木 健輔、野町 健太郎、馬 ベイ、森田 健
2. 発表標題 フォノンプロセスを考慮した励起子ダイナミクス解析 (PXRモデル)
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 坂本 裕則、馬 ベイ、森田 健、石谷 善博
2. 発表標題 半導体/金属ストライプ構造における電気双極子形成に伴う誘電関数変化
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 青木 伴晋、花田 昂樹、坂本 裕則、馬ベイ、森田 健、石谷 善博
2. 発表標題 GaAs/Auストライプ構造を用いたLOフォノン共鳴の赤外光輻射
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石谷善博, 大木健輔, 野町健太郎, 馬ベイ, 森田健
2. 発表標題 ワイドギャップ半導体キャリア・フォノンダイナミクス
3. 学会等名 第13回励起ナノプロセス研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kentaro Nomachi, Ma Bei, Ken Morita, and Yoshihiro Ishitani
2. 発表標題 Introduction of biexciton processes into exciton dynamics simulation for GaN based on the phononic-excitonic-radiative model
3. 学会等名 International Workshop on UV materials and devices (IWUMD) 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石谷善博, 坂本裕則, 馬ベイ, 森田健
2. 発表標題 窒化物半導体における電子 フォノン相互作用と結晶性
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 庄司凌, 上原大侑, 馬ベイ, 森田健, 石谷善博, 塩島謙次
2. 発表標題 p型GaNにおける深い準位を介した発光特性の解析
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 坂本裕則, 森田健, 馬ベイ, 石谷善博
2. 発表標題 AlN 薄膜を用いたLO フォノン共鳴電気双極子形成および表面ポラリトン伝搬
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 馬ベイ, 石谷善博
2. 発表標題 フォノンによるGaN励起子ダイナミクス過程への影響
3. 学会等名 第9 回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 坂本裕則, 馬ベイ, 森田健, 石谷善博
2. 発表標題 IN/金属ストライプ構造における表面、界面ポラリトンモード観測
3. 学会等名 第9 回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Sakamoto Hironori Sakamoto, Bei Ma, Ken Morita and Yoshihiro Ishitani
2. 発表標題 Interface phonon polariton propagation and LO phonon-resonant absorption of infrared light in AlN/metal-composites
3. 学会等名 12th International conference on nitride semiconductors (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kensuke Oki, Kentaro Nomachi, Bei Ma, Ken Morita, and Yoshihiro Ishitani
2. 発表標題 Theoretical calculation of rate coefficients, densities, and decay time of excitons and free carriers in GaN
3. 学会等名 12th International conference on nitride semiconductors (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Bei Ma and Yoshihiro Ishitani
2. 発表標題 Simulation of carrier-exciton-phonon energy transportation in GaN
3. 学会等名 12th International conference on nitride semiconductors (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 石谷善博 他 (監修 権田俊一)	4. 発行年 2020年
2. 出版社 NTS	5. 総ページ数 1570 (753 - 760)
3. 書名 2020年度版 薄膜作製応用ハンドブック	

〔産業財産権〕

[ その他 ]

量子物性デバイス  
<http://photonics.te.chiba-u.jp/index.html>

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	三宅 秀人  (Miyake Hideto)  (70209881)	三重大学・地域イノベーション学研究科・教授   (14101)	
研究 協力者	大木 健輔  (Oki Kensuke)  (00633968)	千葉大学・工学研究院・技術職員   (12501)	
研究 協力者	馬 ベイ  (Ma Bei)  (90718420)	千葉大学・工学研究院・助教   (12501)	
研究 協力者	森田 健  (Morita Ken)  (30448344)	千葉大学・工学研究院・准教授   (12501)	