

令和 5 年 5 月 29 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20993

研究課題名(和文)六方晶窒化ボロン半導体の直接遷移型化と深紫外励起子発光ダイナミクスの研究

研究課題名(英文) Modification of the bandgap of hexagonal BN and deep-ultraviolet luminescence dynamics of excitons in them

研究代表者

秩父 重英 (CHICHIBU, Shigefusa)

東北大学・多元物質科学研究所・教授

研究者番号：80266907

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：ボロンと窒素による2次元ハニカム構造が面内で60°回転しながら層状に積み重なった六方晶窒化ボロン(hBN)半導体は、間接遷移型禁制帯をもちながら室温で210～230 nmの高効率発光を呈するため深紫外光源用材料として期待できる。近年、単一層hBN(mBNと略す)の禁制帯が直接遷移型になると報告されたが真偽は定かではなかった。我々は発光効率や発光の過渡現象(ダイナミクス)の観点から直接遷移型である事を確認した。また、本研究遂行中に新たに直接遷移型禁制帯を持つのではないかと提案されたグラファイト積層六方晶BN(Bernal BN)の局所発光評価を行い、bBNの優れた発光性能も見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

hBNが間接遷移型半導体でありながら光子エネルギー約5.8 eVの高効率深紫外線(DUV)発光を呈すること、hBNを単一層まで薄くしたmBNの禁制帯が直接遷移型となり6.04 eVの発光を呈する事に加え、グラファイト状積層構造のBernal BNも直接遷移型ではないかと思われる禁制帯を持ち6.035 eVの発光を呈する事を明らかにした事は学術的意義が大きいだけでなく、BNを用いたDUV発光素子の開発に繋がり殺菌や消毒を通じて安全な水・空気・サニタリー環境の提供を通じて社会貢献できる。また、本研究に用いた自作の陰極線蛍光計測系は禁制帯幅に制限されないためBN以外の2次元材料の評価に有用である。

研究成果の概要(英文)：Hexagonal boron nitride (hBN) crystallizes in layers of a two-dimensional honeycomb BN structure. Since hBN exhibits high-efficiency emissions at 5.2-5.9 eV in spite of the indirect bandgap, hBN has a potential for the use in deep-ultraviolet light emitters. Recently, the presence of a direct bandgap has been reported in an isolated monolayer hBN (mBN). However, little is known about the luminescent properties of mBN. Here, temporally and spatially resolved luminescence measurements were carried out to elucidate the emission dynamics of indirect excitons (iXs) in hBN and direct excitons (dXs) in mBN epilayers. The room-temperature emission lifetimes of iXs in hBN were about 55 ps, which implies excellent radiative performance of hBN. Cathodoluminescence (CL) spectra at 13 K of mBN exhibited a distinct dX emission peak at around 6.04 eV superimposed on a broad 5.5-eV-band that originated from hBN. In addition, a CL peak at 6.035 eV that originated from graphitic BN was identified.

研究分野：化合物半導体光物性・光デバイス

キーワード：窒化ボロン 間接遷移 直接遷移 深紫外線 時間分解分光

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

六方晶層状窒化ホウ素(hBN)は、図1左列に示すようにB原子とN原子による2次元ハニカム構造が面内で60°回転しながら層状に積み重なった、禁制帯幅(E_g)が約6 eVの超広禁制帯幅(UWBG)半導体である。hBNは間接遷移型半導体でありながら[1,2]室温で210~230 nmの深紫外(DUV)光を呈す[2-4]ため、DUV光源材料として期待できる。極最近、単一原子層hBN(monolayer hBN; mBN)は直接遷移型禁制帯となる事が理論計算により予測され[5]、それを支持する実験結果がEliasらにより報告された[6]が真偽を確かめる必要があり、発光効率や発光の過渡現象(ダイナミクス)の観点から光学遷移過程を検証する物理学的基礎研究が必要とされていた。しかしながらUWBG半導体のパルス励起は困難なため、発光ダイナミクス研究[7,8]自体が極めて少なかった。

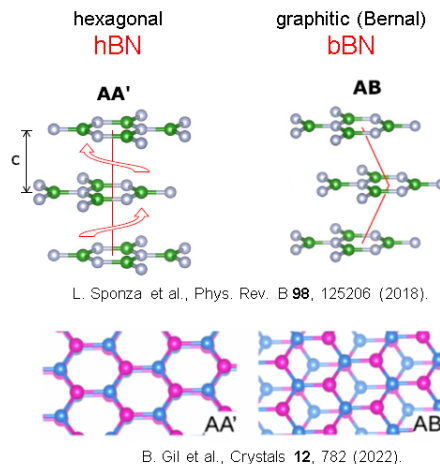


図1 六方晶BNのポリタイプ(左列はhBN、右列はグラファイト状bBN)

2. 研究の目的

DUV波長域でhBN及びmBNのカソードルミネッセンス(CL)スペクトルを取得して比較を行い、hBNが直接遷移型化されたとも解釈できるmBNの発光性能を明らかにする。後述のように、本研究遂行中に新たに提案されたhBNのポリタイプの発光特性について明らかにし、mBNの発光と切り分ける事が目的に追加された。

3. 研究の方法

- (1) hBN薄膜のバンド端発光の効率を下げる4.0-eV帯の発光強度を抑えるため、その起源とされる炭素の濃度を抑えて化学気相堆積(CVD)製膜を行うため、分子内に炭素を含まないBCl₃を原料に用い、既存のハイドライドCVD装置をCold Wall型に改造してCVD成長を行う(静大)。
- (2) hBN薄膜に対しフェムト秒パルスDUVレーザー光を用いた時間分解フォトルミネッセンス(TRPL)測定を行い、発光ダイナミクス(発光寿命)を明らかにする(東北大)。
- (3) 追加項目: 本研究の進行中に新たに提案されたグラファイト積層六方晶BN(Graphitic BNないしはBernal BN: bBNと略される)の混在するhBN薄膜の空間分解カソードルミネッセンス(SRCL)評価を行い、bBN相の位置の同定や混入具合を明らかにする(東北大)。
- (4) mBNの発光機構を明らかにするため、mBN薄膜に対して励起体積を大きくとることができるホームメイドのCL装置を用いてCLスペクトル測定を実現する(東北大)。
- (5) 空間分解CL法を用い、mBN薄膜に存在する折り返し部分の位置同定を行う(東北大)。

4. 研究成果

(1) hBN薄膜のバンド端(Near-band-edge: NBE)発光の効率を下げる4.0-eV帯の発光強度を抑えるため、その起源とされる炭素の薄膜への混入を抑えてCVD製膜を行うため、既存のハイドライドCVD装置をCold Wall型ヒーターに改造し、BCl₃を原料に用いたCVD成長を行った(静大)[9]。サファイア基板上に製膜を行ったhBN薄膜の、装置改造前後の12 KにおけるCLスペクトルの比較を図2に示す。非輻射再結合中心(NRC)濃度が異なるため、ピーク強度の一番強い5.5-eV帯の強度で規格化してある。図示のように、5.5-eV帯を含むバンド端発光に対し4.0-eV帯の発光強度は低減されており、薄膜への炭素混入が低減されたと考えられる。

(2) hBN薄膜の発光スペクトル、発光ダイナミクスを明らかにした(東北大)。図2に示した(旧装置により製膜された)hBN薄膜の評価を行ったが、新装置により製膜した薄膜でも結果は基本的に同じである。図

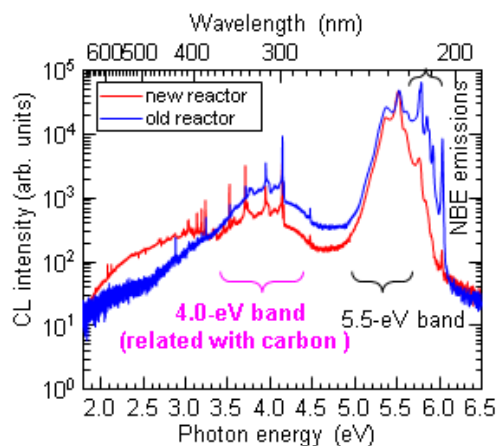


図2 CVD製膜サファイア基板上hBN薄膜の低温CLスペクトルの装置改造前後の比較

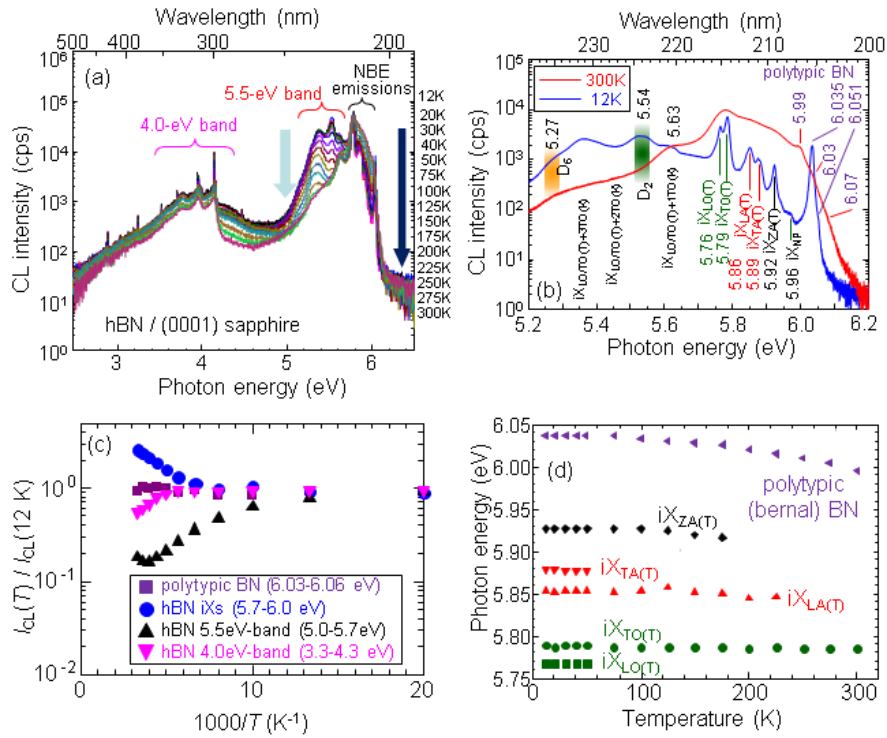


図3 CVD製膜サファイア基板上hBN薄膜の発光特性(説明は本文内)[10]

3に、hBN薄膜の(a)広域CLスペクトルの温度依存性、(b)12 Kと300 KにおけるNBE発光領域のCLスペクトル、(c)各発光ピークのスペクトル積分強度のアレニウスプロット、(d)各発光ピークエネルギーの温度依存性を示す。図3(a)から、NBE発光群と4.0-eV帯の発光強度はあまり変化せず、5.5-eV帯のみ熱消光することが分かる。図3(b)の12 KのCLスペクトルには、5.96 eVに小さな発光ピークが観られるほか、5.92 eVのピーク、5.89 eVと5.86 eVのダブルレットピーク、5.79 eVと5.76 eVのダブルレットピーク、そして5.5-eV帯、そして4.0-eV帯が観測された。これらは高エネルギー側から順に間接遷移自由励起子(iX)のノンフォノン(NP)発光およびZA(T), TA(T), LA(T), TO(T), LO(T)フォノンレプリカと同定される。括弧内のTはブリルアンゾーンのT点を意味しており、各々のフォノンエネルギーは、光るための運動量保存則を満たすMKベクトルをK上に平行移動した中央であるT点での値となっている。このように、hBNは間接遷移型半導体であるにも関わらず室温でもNBE発光を呈する。一方、hBNの iX_{NP} ピークよりもエネルギーの高い6.035 eVのピークと6.051 eVの肩は、後述するbBNのバンド端励起子発光に因るものである。

図3(a), 3(c)に示すように、NBE発光は温度上昇による熱消光は示さず逆に80 K辺りから発光強度が増加する。この逆熱消光は、間接遷移型禁制帯のhBNにおいてiXとフォノンの強い相互作用があること、また、ブリルアンゾーンのM-LとK-Hの間でほとんど分散の無いフラットな伝導帯と価電子帯をもつため結合状態密度が高く、高い振動子強度を呈すからであると説明される[11]。もう一つの解釈は、有効ボーア半径が小さく有効質量の大きいhBNの励起子は長距離移動でないためNRCに捕まりにくいという事である。簡単な試算では、極低温であればNRC濃度(N_{NRC})が 10^{20} cm^{-3} 近くまで発光強度が変わらないと見積もられ、2次元結晶の特徴が表れている可能性がある。実際、温度上昇に伴い発光強度が増加するためには強い励起子フォノン相互作用とNRCに捕まりにくい特性が無くては説明できない。かような発光ダイナミクスを明らかにするためTRPL測定を行った結果を図4に示す。図3(c)から予測されるように、バンド端発光すなわち $iX_{LO(T)/TO(T)}$ ピークの発光寿命は殆ど温度変化せず、室温でも約54 ps程度であることが明らかになった。高純度単結晶では130 ps程度[7]が得られておりまだ改善

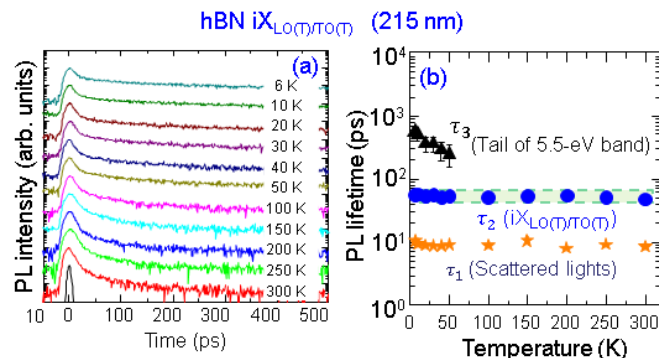


図4 CVD製膜サファイア基板上hBN薄膜の $iX_{LO(T)/TO(T)}$ ピークの(a)TRPL信号および(b)発光寿命の温度依存性[10]

の余地があるが、文献[4]と[7]の考察を用いれば本 hBN 薄膜においても $iX_{L0(T)/T0(T)}$ の発光内部量子は 21%程度と見積もられた。この波長域では非常に高い内部量子効率といえる。ここで、bBN や mBN の発光波長領域 (6.03-6.04 eV) ではレーザー光自身の散乱やサファイア基板の共鳴ラマン散乱線が近くにあり信号分離が困難である [10] ため時間分解カソードルミネッセンス (TRCL) を用いる必要があったが、励起体積が小さいため検出器 (ストリークカメラ) 側で S/N 比の高い信号を得ることができなかった。

(3) 本研究遂行中に新たに提案された、直接遷移型に近い禁制帯を持つ bBN を含む hBN 薄膜の SRCL 評価を行い、bBN 相の位置の同定や hBN、bBN の優れた発光性能を見出した (東北大)。走査電子顕微鏡 (SEM) 像と、hBN (5.7-5.9 eV) および bBN (6.0-6.1 eV) のバンド端励起子発光強度の空間分布を図 5 に示す。図 5(b) において bBN の発光が観られる面積は、図 5(d) の hBN の発光面積の 7 %程度であり、図 2(b) の強度に着目すると hBN よりも高い発光効率を呈すると考えられる。実際、bBN は直接遷移に近いと報告されており [12, 13]、発光効率も hBN より高いと期待される。bBN に関しては、本挑戦的研究開始時には存在が明らかになっておらず、まさに時代の最先端を走る研究成果であったといえる。

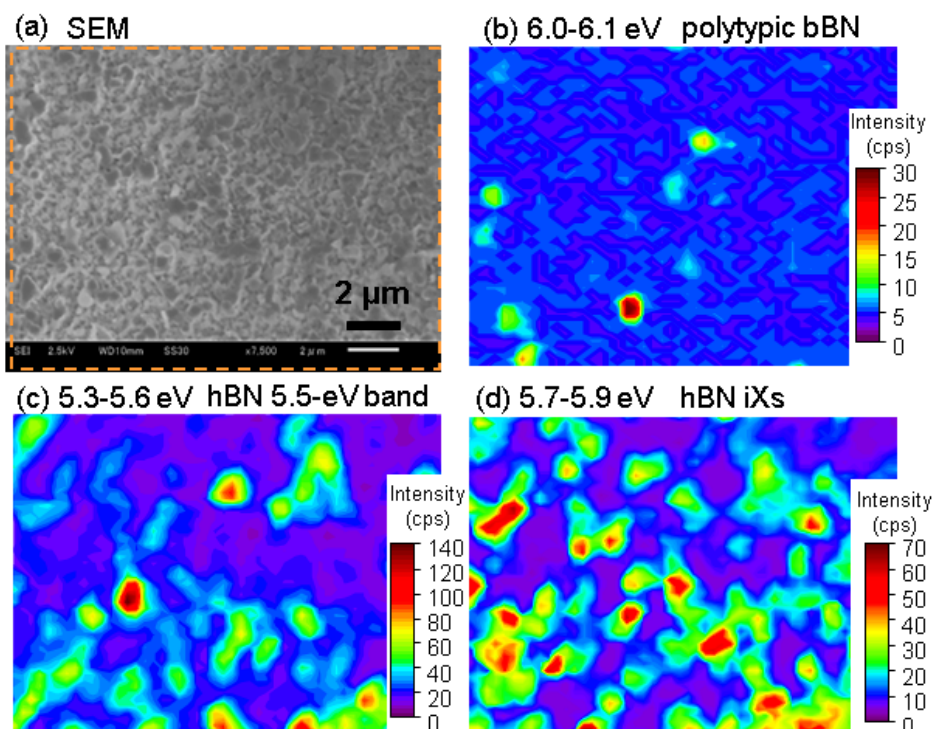


図 5 CVD 製膜サファイア基板上 hBN 薄膜の SRCL 測定結果。
(b) が bBN の発光箇所を示す [10]。

(4) 成果(2)欄ではストリークカメラの性能に制限を受けたが、ホームメイドの CL 装置を用い、励起体積を広くとることによって mBN の CL スペクトル測定に世界で初めて成功した (東北大)。図 6 に、mBN 薄膜と、成果(2), (3)に記した hBN 薄膜の 12-13 K における (a) 広域 CL スペクトル、(b) バンド端領域における CL スペクトル (下段) と反射測定・PL 測定 [6] との比較、(c) CL 測定条件を変化させて mBN の発光を確認した例 [14] を示す。図 6(a) に示すように、基板である高配向性パイロリティックグラファイト (HOPG) からの発光は観測されないため、ホームメイド CL 装置により、一層しかない mBN の発光が正しく測定されたと結論できる。mBN の発光は、おそらく mBN が折り返して重なったと考えられる、積層の崩れた hBN の発光 (5.5-eV 帯) に重畳するように観測された。ここで、mBN の CL スペクトルには、多層の hBN の iX ピーク群は観測されず、6 eV を超えたところに mBN と記したピークが観測された。この発光ピークのエネルギーを定量化するため、バンド端領域を拡大した CL スペクトルと文献 [6] に示された反射および PL スペクトルの比較を図 6(b) に示した。CL スペクトルに観測された 6.04 eV の発光エネルギーは、mBN の直接遷移励起子 (dX) のノンフォノン (NP) ピークよりも K 点における ZA フォノンレプリカ ($dX_{ZA(K)}$) によるピークのエネルギーに近いことから、 $dX_{ZA(K)}$ であると同定した。さらに、CL 測定条件を変化させて観測された mBN の CL 発光と、bBN の iX か dX の発光エネルギー (6.035 eV) 位置の比較を図 6(c) に示す。bBN の発光は、AB 積層という物性に基づき 2 層以上無いと観測されないことから、本測定による CL スペクトルにおいて観測された 6.04 eV のピークは bBN の混入によるも

のではなく mBN の発光そのものであると考えられる。mBN の発光が CL 測定により観測されたのは世界初の成果であり、本研究で用いた CL 装置が、今後 2 次元材料の評価に役立つことを示している。

(5) SRCL 法を用い、mBN 薄膜に存在する折り返し部分の位置同定に成功した(東北大)。紙面の都合上図面を載せないが、これまでは積層ミスマッチではないかと報告されていた 5.5-eV 帯の強度マッピングを行ったところ、HOPG 基板のステップ端において単原子層以上の厚さをもつ BN 部分において 5.5-eV 帯の発光強度が高いことが確認された。この測定では電子線を垂直にししか当てられないため空間分解能と S/N 比が多少悪化するが、mBN と non-mBN 相で発光に違いが認められたことから、積層乱れを抑えれば 5.5-eV 帯の強度を抑えられる可能性が示された。実際、高品質 hBN 単結晶において 5.5-eV 帯の強度が低い結果が示されており[15]、これらの結果と矛盾しない。今後表面ステップの制御により、折り返しの無い大面積 mBN の成長を期待したい。

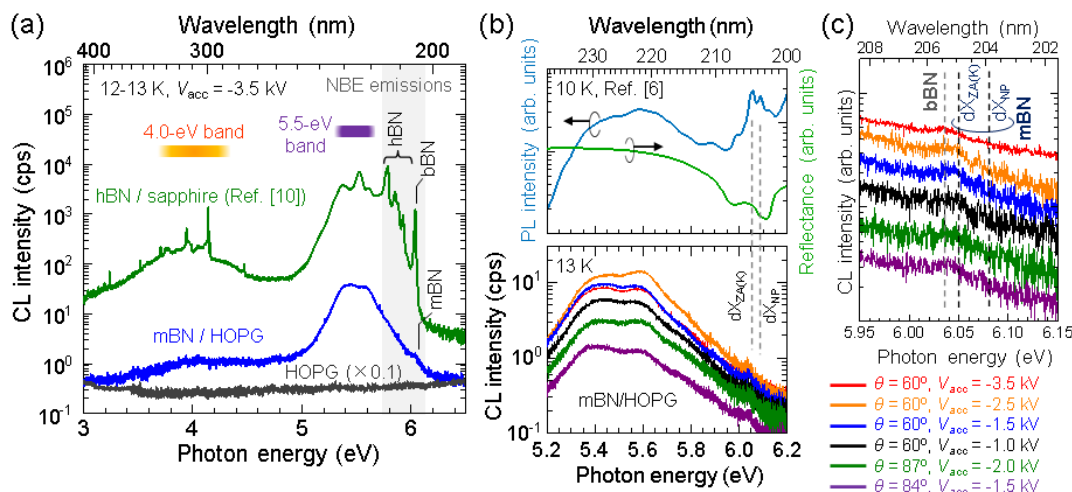


図 6 12-13 K における mBN 薄膜の (a) CL スペクトル、(b) バンド端領域の CL スペクトルと反射測定・PL 測定[6]との比較、(c) CL 測定条件を変化させて mBN の発光を確認した例[14]。

< 引用文献 >

- 1) B. Arnaud, S. Lebegue, P. Rabiller, and M. Alouani, Phys. Rev. Lett. **96**, 026402 (2006).
- 2) G. Cassabois, P. Valvin, and B. Gil, Nat. Photon. **10**, 262 (2016).
- 3) K. Watanabe, T. Taniguchi, and H. Kanda, Nat. Mater. **3**, 404 (2004).
- 4) L. Schué, L. Sponza, A. Plaud, H. Bensalah, K. Watanabe, T. Taniguchi, F. Ducastelle, A. Loiseau, and J. Barjon, Phys. Rev. Lett. **122**, 067401 (2019).
- 5) X. Blase, A. Rubio, S. G. Louie, and M. L. Cohen, Phys. Rev. B **51**, 6868 (1995).
- 6) C. Elias, P. Valvin, T. Pelini, A. Summerfield, C. J. Mellor, T. S. Cheng, L. Eaves, C. T. Foxon, P. H. Beton, S. V. Novikov, B. Gil, and G. Cassabois, Nat. Commun. **10**, 2639 (2019).
- 7) G. Cassabois, P. Valvin, and B. Gil, Phys. Rev. B **93**, 035207 (2016).
- 8) S. F. Chichibu, Y. Ishikawa, H. Kominami, and K. Hara, J. Appl. Phys. **123**, 065104 (2018).
- 9) 増田克仁, 渡邊泰良, 田中佑樹, 吉岡陸, 大石泰己, 増田希良里, 小南裕子, 原和彦, 第 69 回応用物理学会春季学術講演会, 25a-E203-7 (2022).
- 10) S. F. Chichibu, K. Shima, K. Kikuchi, N. Umehara, K. Takiguchi, Y. Ishitani, and K. Hara, Appl. Phys. Lett. **120**, 231904 (2022).
- 11) C. Elias, G. Fugallo, P. Valvin, C. L'Henoret, J. Li, J. H. Edgar, F. Sottile, M. Lazzeri, A. Ouerghi, B. Gil, and G. Cassabois, Phys. Rev. Lett. **127**, 137401 (2021).
- 12) A. Rousseau, M. Moret, P. Valvin, W. Desrat, J. Li, E. Janzen, L. Xue, J. H. Edgar, G. Cassabois, and B. Gil, Phys. Rev. Mater. **5**, 064602 (2021).
- 13) A. Rousseau, P. Valvin, W. Desrat, L. Xue, J. Li, J. H. Edgar, G. Cassabois, and B. Gil, ACS Nano **16**, 2756 (2022).
- 14) 嶋紘平, T. S. Cheng, C. J. Mellor, P. H. Beton, C. Elias, B. Gil, G. Cassabois, S. V. Novikov, 秩父重英, 第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 17a-B401-6 (2023).
- 15) K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Miya, Y. Sato, K. Nakamura, T. Niiyama, and M. Taniguchi, Diam. Rel. Mater. **20**, 849 (2011).

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Chichibu S. F., Shima K., Kikuchi K., Umehara N., Takiguchi K., Ishitani Y., Hara K.	4. 巻 120
2. 論文標題 Recombination dynamics of indirect excitons in hexagonal BN epilayers containing polytypic segments grown by chemical vapor deposition using carbon-free precursors [Featured Article]	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 231904 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0090431	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 Umehara Naoki, Adachi Takuro, Masuda Atsushi, Kouno Tetsuya, Kominami Hiroko, Hara Kazuhiko	4. 巻 60
2. 論文標題 Room-temperature intrinsic excitonic luminescence from a hexagonal boron nitride thin film grown on a sapphire substrate by low-pressure chemical vapor deposition using BCl ₃ as a boron source	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 07550 1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac093f	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12件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 T. Kasuya, K. Shima, K. Hara, and S. F. Chichibu
2. 発表標題 Ultraviolet luminescence dynamics of hexagonal BN epilayers grown by chemical vapor deposition using carbon-free precursors
3. 学会等名 65th Electronic Materials Conference (EMC2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 粕谷拓生, 嶋紘平, 梅原直己, 原和彦, 秩父重英
2. 発表標題 炭素フリー原料を用いてサファイア基板上にCVD成長させたhBN薄膜の間接遷移励起子の発光ダイナミクス
3. 学会等名 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 嶋紘平, Tin S. Cheng, Christopher J. Mellor, Peter H. Benton, Christine Elias, Bernard Gil, Guillaume Cassabois, Sergei V. Novikov, 秩父重英
2. 発表標題 陰極線励起による単層六方晶BNのバンド端発光の観測
3. 学会等名 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 S. F. Chichibu, K. Shima, K. Kikuchi, N. Umehara, K. Takiguchi, Y. Ishitani, and K. Hara
2. 発表標題 Emission dynamics of indirect excitons in hexagonal BN epilayers containing polytypic segments grown by chemical vapor deposition using carbon-free precursors
3. 学会等名 International Workshop on Nitride Semiconductors 2022 (IWN2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Shima, C. Elias, T. S. Cheng, C. J. Mellor, P. H. Beton, S. V. Novikov, B. Gil, G. Cassabois, and S. F. Chichibu
2. 発表標題 Near-band-edge recombination in monolayer hBN epitaxial films studied using cathodoluminescence spectroscopy
3. 学会等名 International Workshop on Nitride Semiconductors 2022 (IWN2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 秩父重英, 嶋紘平, 菊地清, 梅原直己, 瀧口佳祐, 石谷善博, 原和彦
2. 発表標題 炭素フリー原料を用いてサファイア基板にCVD成長させた多型を含むhBN薄膜における間接遷移励起子の発光ダイナミクス
3. 学会等名 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 大石 泰己, 渡邊 泰良, 田中 佑樹, 増田 克仁, 吉岡 陸, 増田 希良里, 小南 裕子, 原 和彦
2. 発表標題 六方晶BN薄膜の減圧CVD成長の高温化
3. 学会等名 発光型 / 非発光型ディスプレイ合同研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉岡 陸, 田中 佑樹, 渡邊 泰良, 増田 克仁, 大石 泰己, 増田 希良里, 小南 裕子, 原 和彦
2. 発表標題 六方晶窒化ホウ素薄膜の減圧CVDにおける原料ガス導入タイミング
3. 学会等名 2022年 第69回応用物理学会春季学術講演会[25a-E203-6]
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 増田 克仁, 渡邊 泰良, 田中 佑樹, 吉岡 陸, 大石 泰己, 増田 希良里, 小南 裕子, 原 和彦
2. 発表標題 コールドウォール反応管を用いる六方晶窒化ホウ素薄膜の減圧CVDにおける原料供給量依存性
3. 学会等名 2022年 第69回応用物理学会春季学術講演会[25a-E203-7]
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 秩父重英, 嶋紘平, 梅原直己, 小島一信, 原和彦
2. 発表標題 炭素フリー原料を用いてサファイア基板に気相成長させたh-BN薄膜の空間分解カソードルミネッセンス評価
3. 学会等名 2021年 第82回応用物理学会秋季学術講演会[10p-N101-8]
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中佑樹, 渡邊泰良, 吉岡陸, 増田克仁, 大石泰己, 増田希良里, 小南裕子, 原和彦
2. 発表標題 Niバッファ層上への六方晶窒化ホウ素薄膜のCVD成長
3. 学会等名 2021年 第82回応用物理学会秋季学術講演会 [23p-P07-1]
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秩父重英
2. 発表標題 時間空間分解カソードルミネッセンス法によるワイドバンドギャップ窒化物半導体の評価
3. 学会等名 「放射線科学とその応用第186委員会」第36回研究会（招待講演）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

論文成果 S. F. Chichibu, K. Shima, K. Kikuchi, N. Umehara, K. Takiguchi, Y. Ishitani, and K. Hara: "Recombination dynamics of indirect excitons in hexagonal BN epilayers containing polytypic segments grown by chemical vapor deposition using carbon-free precursors", Applied Physics Letters 120 (23), 231904 (2022). は同紙の Featured Article として取り上げられた。

東北大学多元物質科学研究所秩父・嶋研究室ホームページ
<http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/chichibu/html/index-j.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	嶋 紘平 (Shima Kohei) (40805173)	東北大学・多元物質科学研究所・准教授 (11301)	

6. 研究組織（つづき）

	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	原 和彦 (Hara Kazuhiko) (80202266)	静岡大学・電子工学研究所・教授 (13801)	
研究分担者	小島 一信 (Kojima Kazunobu) (30534250)	東北大学・多元物質科学研究所・准教授 (11301)	

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			
フランス	Univ. Montpellier II			
英国	Univ. Nottingham			