

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23310096

研究課題名(和文) 気相成長法による配向性平面六方晶窒化ホウ素薄膜の研究

研究課題名(英文) Growth of highly oriented h-BN single crystal by chemical vapor deposition method

研究代表者

渡邊 賢司 (Watanabe, Kenji)

独立行政法人物質・材料研究機構・光・電子材料ユニット・主席研究員

研究者番号：20343840

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円、(間接経費) 4,290,000円

研究成果の概要(和文)：将来的な高性能グラフェンデバイス製造を目的とし、電子状態に関する無干渉な基板としての六方晶窒化ホウ素(h-BN)の薄膜成長技術の開発を目的とし、気相成長法により大面積高品質の薄膜成長を目指した。特に高品質膜を得るための単結晶粒界の制御(大きさと配向)を可能とする薄膜成長条件の最適化を図った。窒素源としてアンモニア、ホウ素源としてジボランを用いた化学気相成長(CVD)法により、1300℃を越える高温成長条件において、良質なh-BNホモエピタキシャル膜を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：Hexagonal boron nitride (h-BN), which has a 2D-plane layered structure composed of nitrogen and boron atoms in sp<sup>2</sup> bonding, is a proven and effective substrate for atomic layer materials including graphene, because it has an atomically smooth surface that is relatively free of dangling bonds and charge traps. However, to realize atomic layer devices, the single-crystalline growth technique for hBN is of great importance. In this study, we achieved high quality h-BN homoepitaxial growth on the bulk h-BN substrate by employing chemical vapor deposition methods with high-growth temperature.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・マイクロ・ナノデバイス

キーワード：結晶工学 六方晶窒化ホウ素 グラフェン 原子層科学 結晶成長 気相成長 格子欠陥 電子デバイス

### 1. 研究開始当初の背景

六方晶窒化ホウ素 (h-BN) はグラファイトと似た結晶構造をもつことで知られている。しかし、グラファイトとは異なりワイドバンドギャップ物質であり、絶縁体である。結晶構造的に見るとc

面が完全な $sp^2$ 平面構造を持ち、かつダンダリンググボンドをc軸方向に持たずc面表面は極めて安定であるという特徴を持つ積層化合物である(図1)。

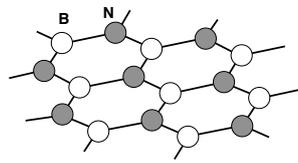


図1 六方晶窒化ホウ素の基本構造

これまで我々はh-BNの特異な性質に着目し、単結晶成長技術開発を進めてきた結果、高純度六方晶窒化ホウ素単結晶の育成に成功し、非常に強いエキシトン効果や高効率な遠紫外発光特性などを見いだしてきた。

上記の結晶構造的特長を利用すると、剥離法にて作製した六方晶窒化ホウ素を基板に用いたグラフェン層において極めて良好な電気伝導特性を示すことを見いだされた。従来、グラフェンは $SiO_2$ 上に形成されていたが、基板の平坦性の問題や不純物原子などの影響により本来の特性を達成出来なかった。しかし、六方晶窒化ホウ素を基板に用いたグラフェンの電気特性はサスペンド構造(宙ぶり構造)のグラフェンのそれに迫り、基板として理想に近いものであることがわかった。現時点ではサスペンド構造のグラフェンでのみ観測されている分数量子ホール効果が観測できるなど、これまでに基板との相互作用の点で懸念のあった多くの二次元電子系に関する重要問題が検証されている。また、上述した比較例のサスペンド構造グラフェンは理想的とはいえず将来的なデバイス構造作製においては、作製プロセスの複雑化やデバイスデザインの制限などに問題がある。しかし、六方晶窒化ホウ素を基板に用いることができるならば、完全な平面基板を供給できるのみならず、六方晶窒化ホウ素の絶縁性を利用することにより種々のデバイス構造を自由に形成することが可能になる。加えて、六方晶窒化ホウ素は格子定数がグラファイトに近く将来的なグラフェン気相成長の基板としても好適な材料と考えられ、グラフェンの絶縁基板としての六方晶窒化ホウ素単結晶の応用範囲は広大で計り知れない。また、電子デバイスへの応用のみならず大面積窒化ホウ素シートの作製技術は、六方晶窒化ホウ素 $\pi$ 電子結合の強固なネットワークとそれに由来する高融点特性により高温下によって利用出来る絶縁性繊維や不織布、あるいは高温構造材料としての応用を目指した六方晶窒化ホウ素作製技術としての応用も考えられる。

しかしながら、これまでの報告においてはグラフェン作製同様に、六方晶窒化ホウ素自体も単結晶の剥離転写法による作製過程を経ねばならず、実用を目したデバイス構造作製

には、まだまだ多くの問題をクリアしなければならない。

### 2. 研究の目的

本提案では、将来的な高性能グラフェンデバイス製造を予期し、電子状態に関する無干渉な基板としての六方晶窒化ホウ素の薄膜成長技術の開発を目的とし、気相成長法により大面積高品質の薄膜成長を目指す。具体的には高品質膜を得るための単結晶粒界の制御(大きさと配向)を可能とする薄膜成長条件の最適化をはかる。

### 3. 研究の方法

結晶成長は、化学気相成長(CVD)法により行った。窒素源としてアンモニアを、また、ホウ素源としてジボランをそれぞれ使用した。これまで行ってきた我々の一連の気相成長実験を総合的に判断するとグラフェンの

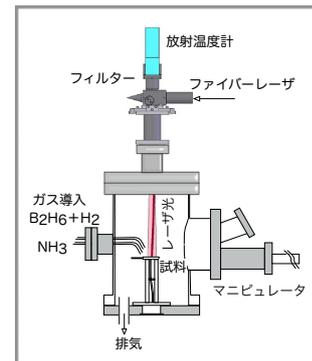


図2 気相成長装置の模式図

の基板としての

平滑な六方晶窒化ホウ素気相成長を成功させる上で着目すべき点として、結晶粒界の増大、柱状成長モードの抑制、成長時のIII-V原子比の制御、不純物の制御などが列挙される。これらの問題を解決するために、ターゲット膜厚の制限、格子定数などを基にした基板の選択(ホモエピタキシャル基板、ヘテロエピタキシャル基板)などの工夫を行い、それぞれの成長条件の最適化と共に、広範囲な成長条件の中から最良の結晶育成条件を探索した。

### 4. 研究成果

(1) 化学気相成長法(CVD)による窒化ホウ素結晶の高温成長

一般に窒化物の化学気相成長法においては化学種の表面マイグレーションが促進されることや、不純物原子を取込みにくくなることから比較的高温での成長が行われている。これまで

我々のグループでは $1000^{\circ}C$ 近辺での成長を中心に行ってきたが、異常核成長などが起こり得ることから、さらなる成長温度の高温化が良好な成長条

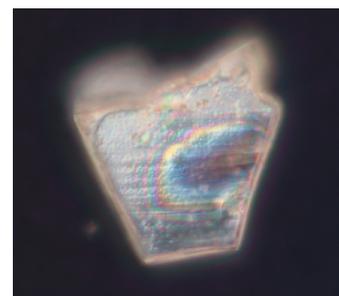


図3 異常成長結晶

件であることが予想されたので、レーザ加熱法による基板温度制御装置を新たに開発し(図2)、最高温度1500°Cまでの結晶成長を可能とした。サファイア基板を用いた成長条件最適化により、比較的結晶性のよい成長が再現性よくできることを見いだした。結晶評価として行ったラマン散乱分光法によるE<sub>2g</sub>モードのラマン散乱光強度で約2桁の増強が見られるなど結晶性の向上が見られた。

(2) 高圧法により成長した単結晶上へのホモエピタキシャル成長

これまで多くの成長実験で、c面成長した微小単結晶においてc軸方向への成長が抑制されてしまうことが報告されている。そのような抑制が我々の条件でも起こりうるか調べるために、高圧法に

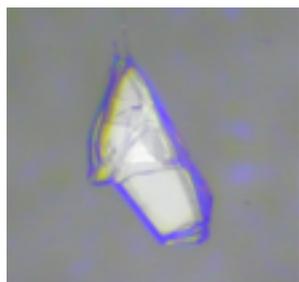


図4 良好な成長結晶

より成長したバルク単結晶を適当な厚みに剥離してサファイア基板上に貼付することによりc面劈開面を出したホモエピタキシャル成長基板として成長をおこなった。図3は従来法による低温での成長で、異常成長していることがわかる。この温度での良好な成長条件をこれまで見いだすことは出来なかった。しかし、先に述べたような高温成長条件下では図4のように良好な成長面が見られた。実際、成長膜の厚みを調べてみると約0.5ミクロン程度の成長が30分程度の成長時間で得られていることがわかった。この結晶のラマンモード(E<sub>2g</sub>モード)の半値幅は良好なもので7.8cm<sup>-1</sup>と観測された。この値は高圧バルク結晶基板よりもやや良い値を示している。今後、これらの結晶の不純物評価およびホモエピタキシャル基板に代る新たな基板探索など、さらなる詳細な実験および検証が必要である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計44件)

(1) S. Sutar, K. Watanabe, T. Taniguchi 他3名, Reconfigurable P-N Junction Diodes and the Photovoltaic Effect in Exfoliated MoS<sub>2</sub> Films, Appl. Phys. Lett. , 104 巻、(2014)、122104、2014年3月27日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1063/1.4870067>

(2) A. Luican-Mayer, K. Watanabe, T. Taniguchi 他6名, Screening Charged Impurities and Lifting the Orbital

Degeneracy in Graphene By Populating Landau Levels, Phys. Rev. Lett. , 112 巻、(2014)、036804、2014年1月23日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.036804>

(3) R. Ishikawa, K. Watanabe, T. Taniguchi 他9名, Atomic Structure of Luminescent Centers in High-Efficiency Ce-Doped w-AlN Single Crystal, SCIENTIFIC REPORTS , 4 巻、3778、(2014)、2014年1月21日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1038/srep03778>

(4) V. E. Calado, K. Watanabe, T. Taniguchi 他5名, Ballistic Transport in Graphene Grown By Chemical Vapor Deposition, Appl. Phys. Lett. , 104 巻、(2014)、023103、2014年1月13日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1063/1.4861627>

(5) L. H. Li, K. Watanabe, T. Taniguchi 他2名, Strong Oxidation Resistance of Atomically Thin Boron Nitride Nanosheets, ACS Nano , 8 巻、(2014)、1457-1462、2014年1月8日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1021/nn500059s>

(6) C. Kanokporn, K. Watanabe, T. Taniguchi 他3名, Gate Dependent Raman Spectroscopy of Graphene on Hexagonal Boron Nitride, J. Phys.: Condens. Matter , 25 巻、(2013)、505304、2013年11月25日発表、査読有、<http://dx.doi.org/doi:10.1088/0953-8984/25/50/505304>

(7) A. Epping, K. Watanabe, T. Taniguchi 他4名, Etched Graphene Single Electron Transistors on Hexagonal Boron Nitride in High Magnetic Fields, physica status solidi (b) , 250 巻、(2013)、2692-2696、2013年11月19日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1002/pssb.201300295>

(8) L. Wang, K. Watanabe, T. Taniguchi 他12名, One-Dimensional Electrical Contact to a Two-Dimensional Material, Science , 342 巻、(2013)、614-617、2013年11月1日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1126/science.1244358>

(9) S. Masubuchi, K. Watanabe, T. Taniguchi 他4名, Fabrication and Characterization of High-Mobility Graphene P-n-p Junctions Encapsulated By Hexagonal Boron Nitride, Jpn. J. Appl. Phys. , 52 巻、(2013)、110105、2013年10月22日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.52.110105>

(10) S. Masubuchi, K. Watanabe, T. Taniguchi 他4名, Photovoltaic Infrared Photoresponse of the High-Mobility Graphene Quantum Hall System Due to Cyclotron Resonance, Phys. Rev. B , 88 巻、(2013)、121402、2013年9月3日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.88.121402>

- (11) S. Engels, K. Watanabe, T. Taniguchi 他6名、Etched Graphene Quantum Dots on Hexagonal Boron Nitride, *Appl. Phys. Lett.*、103 卷、(2013)、073113、2013年8月15日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1063/1.4818627>
- (12) F. Forster, K. Watanabe, T. Taniguchi 他5名、Dielectric Screening of the Kohn Anomaly of Graphene on Hexagonal Boron Nitride, *Phys. Rev. B*、88 卷、(2013)、085419、2013年8月14日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.88.085419>
- (13) M. Y. Chan, K. Watanabe, T. Taniguchi 他8名、Suppression of Thermally Activated Carrier Transport in Atomically Thin MoS<sub>2</sub> on Crystalline Hexagonal Boron Nitride Substrates, *Nanoscale*、5 卷、(2013)、9572-9576、2013年8月8日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1039/C3NR03220E>
- (14) G.-H. Lee, K. Watanabe, T. Taniguchi 他11名、Flexible and Transparent MoS<sub>2</sub> Field-Effect Transistors on Hexagonal Boron Nitride-Graphene Heterostructures, *ACS Nano*、7 卷、(2013)、7931-7936、2013年8月8日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1021/nn402954e>
- (15) K. M. Burson, K. Watanabe, T. Taniguchi 他5名、Direct Imaging of Charged Impurity Density in Common Graphene Substrates, *Nano Lett.*、13 卷、(2013)、3576-3580、2013年7月23日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1021/nl4012529>
- (16) T. Yamaguchi, K. Watanabe, T. Taniguchi 他6名、Electrical Spin Injection Into Graphene Through Monolayer Hexagonal Boron Nitride, *Applied Physics Express*、6 卷、(2013)、073001、2013年6月13日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.7567/APEX.6.073001>
- (17) F. Amet, K. Watanabe, T. Taniguchi 他2名、Insulating Behavior At the Neutrality Point in Single-Layer Graphene, *Phys. Rev. Lett.*、110 卷、(2013)、216601、2013年5月22日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.216601>
- (18) D. Golla, K. Watanabe, T. Taniguchi 他3名、Optical Thickness Determination of Hexagonal Boron Nitride Flakes, *Appl. Phys. Lett.*、102 卷、(2013)、161906、2013年4月24日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1063/1.4803041>
- (19) I. Jo, K. Watanabe, T. Taniguchi 他4名、Thermal Conductivity and Phonon Transport in Suspended Few-Layer Hexagonal Boron Nitride, *Nano Letters*、13 卷、(2013)、550-554、2013年1月24日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1021/nl304060g>
- (20) C. Benz, K. Watanabe, T. Taniguchi 他6名、Graphene on Boron Nitride Microwave Transistors Driven By Graphene Nanoribbon Back-Gates, *Appl. Phys. Lett.*、102 卷、(2013)、033505、2013年1月24日発表、査読有、<http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1063/1.4788818>
- (21) G. Ahn, K. Watanabe, T. Taniguchi 他5名、Optical Probing of the Electronic Interaction Between Graphene and Hexagonal Boron Nitride, *ACS Nano*、7 卷、(2013)、1533-1541、2013年1月9日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1021/nn305306n>
- (22) W. Pan, K. Watanabe, T. Taniguchi 他7名、Biaxial Compressive Strain Engineering in Graphene/boron Nitride Heterostructures, *Scientific Reports*、2 卷、(2012)、893、2012年11月27日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1038/srep00893>
- (23) L. Liu, K. Watanabe, T. Taniguchi 他7名、Slow Gold Adatom Diffusion on Graphene: Effect of Silicon Dioxide and Hexagonal Boron Nitride Substrates, *The Journal of Physical Chemistry B*、117 卷、(2013)、4305-4312、2012年11月2日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1021/jp305521g>
- (24) S. Droscher, K. Watanabe, T. Taniguchi 他3名、Electron Flow in Split-Gated Bilayer Graphene, *New Journal of Physics*、14 卷、(2012)、103007、2012年10月2日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1088/1367-2630/14/10/103007>
- (25) L. Wang, K. Watanabe, T. Taniguchi 他4名、Negligible Environmental Sensitivity of Graphene in a Hexagonal Boron Nitride/graphene/h-BN Sandwich Structure, *ACS Nano*、6 卷、(2012)、9314-9319、2012年9月25日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1021/nn304004s>
- (26) J. Chae, K. Watanabe, T. Taniguchi 他10名、Renormalization of the Graphene Dispersion Velocity Determined From Scanning Tunneling Spectroscopy, *Phys. Rev. Lett.*、109 卷、(2012)、116802、2012年9月11日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.116802>
- (27) T. Teraji, K. Watanabe, T. Taniguchi 他4名、Chemical Vapor Deposition of <sup>12</sup>C Isotopically Enriched Polycrystalline Diamond, *Jpn. J. Appl. Phys.*、51 卷、(2012)、090104、2012年8月29日発表、査読

有、<http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.51.090104>

(28)A. S. M. Goossens, K. Watanabe, T. Taniguchi 他3名、Gate-Defined Confinement in Bilayer Graphene-Hexagonal Boron Nitride Hybrid Devices、Nano Letters、12 卷、(2012)、4656-4660、2012年8月20日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1021/nl301986q>

(29)S. Sutar, K. Watanabe, T. Taniguchi 他3名、Angle-Dependent Carrier Transmission in Graphene P-N Junctions、Nano Letters、12 卷、(2012)、4460-4464、2012年8月8日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1021/nl3011897>

(30)A. G. F. Garcia, K. Watanabe, T. Taniguchi 他4名、Effective Cleaning of Hexagonal Boron Nitride for Graphene Devices、Nano Letters、12 卷、(2012)、4449-4454、2012年8月6日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1021/nl3011726>

(31)S. Masubuchi, K. Watanabe, T. Taniguchi 他5名、Boundary Scattering in Ballistic Graphene、Phys. Rev. Lett.、109 卷、(2012)、036601、2012年7月18日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.036601>

(32)A. F. Young, K. Watanabe, T. Taniguchi 他7名、Electronic Compressibility of Layer-Polarized Bilayer Graphene、Phys. Rev. B、85 卷、(2012)、235458、2012年6月27日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.85.235458>

(33)C. R. Dean, K. Watanabe, T. Taniguchi 他7名、Graphene Based Heterostructures、Solid State Commun.、152 卷、(2012)、1275 - 1282、2012年5月10日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1016/j.ssc.2012.04.021>

(34)J. M. Garcia, K. Watanabe, T. Taniguchi 他10名、Graphene Growth on H-Bn By Molecular Beam Epitaxy、Solid State Commun.、152 卷、(2012)、975 - 978、2012年4月9日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1016/j.ssc.2012.04.005>

(35)M. Kalbac, K. Watanabe, T. Taniguchi 他5名、Large Variations of the Raman Signal in the Spectra of Twisted Bilayer Graphene on a Bn Substrate、The Journal of Physical Chemistry Letters、3 卷、(2012)、796-799、2012年3月1日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1021/jz300176a>

(36)S. A. M. Goossens, K. Watanabe, T. Taniguchi 他3名、Mechanical Cleaning of Graphene、Appl. Phys. Lett.、100 卷、(2012)、073110、2012年2月16日発表、査読有、<http://dx.doi.org/>

10.1063/1.3685504

(37)F. Amet, K. Watanabe, T. Taniguchi 他4名、Tunneling Spectroscopy of Graphene-Boron-nitride Heterostructures、Phys. Rev. B、85 卷、(2012)、073405、2012年2月13日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.85.073405>

(38)J. D. Sanchez-Yamagishi, K. Watanabe, T. Taniguchi 他3名、Quantum Hall Effect, Screening, and Layer-Polarized Insulating States in Twisted Bilayer Graphene、Phys. Rev. Lett.、108 卷、(2012)、076601、2012年2月13日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.076601>

(39)J. Xue, K. Watanabe, T. Taniguchi 他3名、Long-Wavelength Local Density of States Oscillations Near Graphene Step Edges、Phys. Rev. Lett.、108 卷、(2012)、016801、2012年1月3日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.016801>

(40)H. Wang, K. Watanabe, T. Taniguchi 他4名、BN/graphene/BN Transistors for Rf Applications、IEEE Electron Device Lett.、32 卷、(2011)、1209-1211、2011年8月8日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1109/LED.2011.2160611>

(41)W. Gannett, K. Watanabe, T. Taniguchi 他3名、Boron Nitride Substrates for High Mobility Chemical Vapor Deposited Graphene、Appl. Phys. Lett.、98 卷、(2011)、242105、2011年6月13日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1063/1.3599708>

(42)A. S. Mayorov, K. Watanabe, T. Taniguchi 他9名、Micrometer-Scale Ballistic Transport in Encapsulated Graphene At Room Temperature、Nano Letters、11 卷、(2011)、2396-2399、2011年5月16日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1021/nl200758b>

(43)L. Museur, K. Watanabe, T. Taniguchi 他8名、Exciton Optical Transitions in a Hexagonal Boron Nitride Single Crystal、physica status solidi (RRL)、Rapid Research Letters、5 卷、(2011)、214 - 216、2011年5月16日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1002/pssr.201105190>

(44)K. Masumoto, K. Watanabe, T. Taniguchi 他4名、Luminescence Characteristics and Annealing Effect of Tb-Doped AlBO Films for Inorganic Electroluminescence Devices、Jpn. J. Appl. Phys.、50 卷、(2011)、04DH01、2011年4月20日発表、査読有、<http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.50.04DH01>

〔学会発表〕（計9件）

(1)渡邊 賢司、“高圧合成法による高純度窒化ホウ素単結晶研究の現状と新しい応用展開”，第15回応用物理学会プラズマエレクトロニクス分科会新領域研究会、2013年11月22日(名古屋市、愛知県／招待)

(2)渡邊 賢司、“高温高圧法により育成した六方晶窒化ホウ素単結晶劈開面のカソードルミネッセンス像観察”，第27回ダイヤモンドシンポジウム、2013年11月21日(南埼玉郡、埼玉県)

(3)谷口尚、“Synthesis of high purity hBN single crystals by using solvent growth process”、5th International Conf on Recent Progress in Graphene Research、2013年9月11日、(東京都／招待)

(4)渡邊 賢司“Luminescence image of cleaved crystal in hexagonal boron nitride grown by temperature gradient method”，第32回電子材料シンポジウム、2013年7月11日、(守山市、滋賀県)

(5)Kenji Watanabe, “Optical Properties of Boron Nitride Single Crystals”，CLEO-PR 2013 2013年7月1日(Kyoto, Japan／招待)

(6)A.Pierret, Near-band edge optical properties of hexagonal boron nitride, International Workshop on Nitride Semiconductors 2012, 2012年10月17日、(Sapporo, Japan)

(7)渡邊 賢司、“Fluorescence properties of hexagonal boron nitride single-crystal powder”，第30回電子材料シンポジウム、2011年7月1日、(守山市、滋賀県)

(8)渡邊 賢司、“六方晶窒化ホウ素単結晶の光学特性とその応用”，日本学術振興会ワイドギャップ半導体光・電子デバイス第162委員会、2011年4月22日(東京都／招待)

(9)Kenji Watanabe、“Excitonic fluorescence for hBN single-crystal powder”，NDNC2011, 2011年5月19日、(Matsue, Japan)

〔図書〕（計 4 件）

1)渡邊賢司、谷口尚、AAAS、サイエンス誌に載った日本人研究者 2013、“2次元の物質との1次元の電気接触”、(2014)、p.69

2)谷口尚、渡邊賢司、OYO BUTURI、“脚光を浴びる高純度hBN”、82巻 12号、(2013)、p.1060-1061

3)渡邊賢司、谷口尚、AAAS、サイエンス誌に載った日本人研究者 2011、“六方晶窒化ホウ素基板により新しいグラフェンの特性を発見”、(2012)、p.26

4)渡邊 賢司、谷口 尚、(株)オーム社、NEW DIAMOND、“グラフェンの特性を活かす六方晶窒化ホウ素基板～六方晶窒化ホウ素応用の進展～”、Vol.104, No.1 (2012)

p. 37-39

5)

〔産業財産権〕

○出願状況（計 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

○取得状況（計 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

[http://www.nims.go.jp/personal/BN\\_research/index-j\\_BNR.html](http://www.nims.go.jp/personal/BN_research/index-j_BNR.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

渡邊 賢司 (WATANABE KENJI)

独立行政法人物質・材料研究機構・光・電子材料ユニット・主席研究員

研究者番号:20343840

研究者番号：

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

谷口 尚 (TANIGUCHI TAKASHI)

独立行政法人物質・材料研究機構・ナノスケール物質萌芽ラボ・グループリーダー

研究者番号：80354413