

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24246103

研究課題名(和文) ワイドギャップ半導体結晶中の転位の運動特性と電子・光学物性の解明

研究課題名(英文) Elucidation of dynamic characters of dislocations and their electronic and optical properties in wide bandgap semiconductors

研究代表者

米永 一郎 (YONENAGA, Ichiro)

東北大学・金属材料研究所・教授

研究者番号：20134041

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,800,000円

研究成果の概要(和文)：III-V窒化物、II-VI亜鉛化物、IV族化合物のワイドギャップ半導体結晶について、その性能向上の障害点となっている転位欠陥の制御を目的として、これらワイドギャップ半導体における転位の発生と運動を調べ、その支配機構を体系的に解明するとともに、転位に起因する電気・光学物性を評価することで、原子構造と電子構造を解明した。さらに転位欠陥を利用した新規デバイスの可能性を見出した。

研究成果の概要(英文)：In various wide bandgap semiconductors as III-nitrides, II-VI zinc compounds and IV-IV compounds, dislocations are one of the detrimental defects affecting the device functions and at present, crucial for controlling in order to improve device efficiencies. Thus, various intrinsic properties of dislocations in the semiconductors were comprehensively investigated in terms of dynamic, electrical and optical properties together with the atomic structures and discussed a new ability to functional devices.

研究分野：結晶欠陥物性

キーワード：半導体物性 転位ナノ物性 ワイドギャップ半導体 転位動特性 転位電子光学物性

1. 研究開始当初の背景

(1) 転位などの格子欠陥は、材料の強度特性を支配するとともに、半導体ではバンドギャップ中に欠陥準位や一次元バンドを形成しキャリア捕獲や電流リークなど、電気・光学的特性の空間的な変動を惹起し、デバイス機能の低下、劣化の原因となる。半導体の基幹材料であるシリコン(Si)では、構造欠陥、特に転位の物性に関する研究が広範に展開され、転位固有の物性ととも転位と不純物との相互反応によって形成される複合体の基礎物性と制御に関する知見が明らかにされ、Siの今日の発展に貢献した。さらに、転位を新しい機能源とする転位工学も開始された。

(2) 現在、青色発光やパワーデバイスなどの材料として窒化ガリウム(GaN)や酸化亜鉛(ZnO)など各種のワイドバンドギャップ半導体が注目され、精力的に開発が進められている。前述のような長く、濃密な研究の歴史を通して基礎的な知識が確立されたSiに較べると、これらのワイドバンドギャップ半導体では、転位固有の光学特性や不純物ないし固有点欠陥との反応に関する研究はまだ緒に就いた段階と言える。ここで、特に指摘すべき点はそれらのワイドギャップ半導体で多く推進されている研究は結晶育成時に導入される、いわゆるグロウイン転位の特性を評価しているが、そのような転位は育成時の発生後、各種不純物や固有点欠陥と反応するため、本来の固有な性質が変性し、失われている可能性が大きい。

(3) これらの状況において、提案・開発されている幾多のワイドギャップ半導体について、構成元素、結晶構造、それらに起因する電子・光学物性などは著しく異なるが、各種結晶中の転位の特性と結晶物性への影響を系統的に評価し、その共通点と相違点に関する起源を基礎学術的観点で解明し体系化すること、そしてそれら材料の優れた特性を発揮させることが必要であると認識するに至った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、III-V 窒化物(GaN、AlN、InN)、II-VI 亜鉛化物(ZnO、ZnSe)、SiCのIV族化合物のワイドギャップ半導体結晶について、(1)各結晶での転位の発生と運動速度を定量化することで、転位の運動機構を解明すること、(2)変形により導入される転位について、転位の原子構造と電子構造・物性、さらに熱処理や電子・光・エネルギー励起による変性を調べ、転位に付随する電気・光学特性を明らかにすること、(3)ワイドギャップ半導体における転位の運動と電子・光学物性の両面について基礎知識を確立し、さらに転位特性がそれぞれの結晶で発現する機構を、Si、GaAs等を含めた全半導体での基礎学理として体系化することを目的とする。

3. 研究の方法

上記の目的に沿って、各種のワイドギャップ半導体について、(1)室温でのインデンテーション法や高温での圧縮変形法を用い

た硬度と強度特性の測定による機械的特性と転位の運動特性の抽出、(2)転位を導入した結晶について、フォトルミネッセンス、光吸収法、走査型抵抗測定法による転位の電子構造に関する評価を行った。

4. 研究成果

(1) AlNの活動すべり系の決定

AlN結晶中で転位がインデンテーションによって発生し運動する挙動を直接観察した。(0001)面方位のAlN試料をその場観察用のインデンテーションホルダー(Nanofactory Instruments AB)にセットし、透過型電子顕微鏡(JEOL-2010F)内で、wedge状のインデンターで試料を押した。図1はインデンテーションによりその直下に発生した多数の転位を示す。これらの転位のバーガスベクトルが $(1/3)\langle 1-210 \rangle$ であり、窒化物半導体の優先すべり面である基底面以外に $\{10-11\}$ と $\{10-12\}$ の錐面をすべり面として活動したことを特定した。さらに、これらの発生した錐面上の転位は結晶の育成時発生した刃状型の貫通転位との反応によって、基底面に交差すべりすることが見出された。さらに、基底面上をすべり運動する転位はらせん成分を有する貫通転位によってジョグが形成されるために運動を阻害されるが、刃状転位によっては影響されない特徴が明らかとなった。これらにより窒化物半導体、さらに結晶構造を同じにするZnO結晶中での転位のすべり運動とその活動すべり系、および転位間相互作用を同定し、ワイドギャップ半導体での転位の運動機構の統一的理解が可能となった。

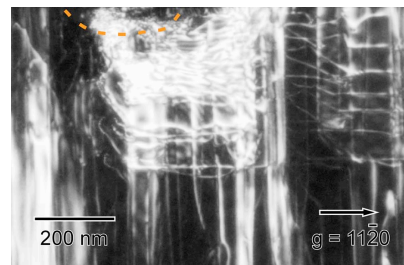


図1. AlNのインデンテーションで発生した転位群(橙色はインデンテーション位置)

(2) InNの硬度と弾性率

InNはGaN、AlNと共にウルツ鉱型窒化物半導体の一つとして、発光素子材料への利用が期待されている。しかし、InNはGaNとAlNに比べ、窒素の平衡蒸気圧が高く分解しやすいこと、薄膜試料を成長するために適切な格子整合性の基板がないため、その強度や弾性定数などの解明がナイトライド研究の大きな課題であった。

本研究ではこの観点で、Plasma-assisted MBE法によって成長された厚さが0.5~4 μmのInN薄膜結晶について、その結晶品質を確認の上で、硬度とヤング率がナノインデンテーション法によって測定した。In極性面試料の表面平坦性が良好であること、膜厚の増加につれてInN層の歪みが低減することが得た。この結果、In極面

試料がその結晶性が良好であると判断した。

良質の InN 結晶の機械的特性値を、Berkovich 圧子を用いた室温でのナノインデンテーション法により決定した。図2は In 極性で成長された膜厚 1 μm の試料を最大荷重 32 mN までの条件で負荷した時の、荷重 P と変位量 h の関係を示す。荷重-変位量曲線の解析により、ヤング率が $E \sim 178 \pm 5$ GPa、硬度 H_{NI} が $H_{NI} \sim 8.6 \pm 0.5$ GPa と求められた。さらにせん断弾性率と体積弾性率が $G \sim 77 \pm 2$ GPa、 $B \sim 99 \pm 3$ GPa と求められた。

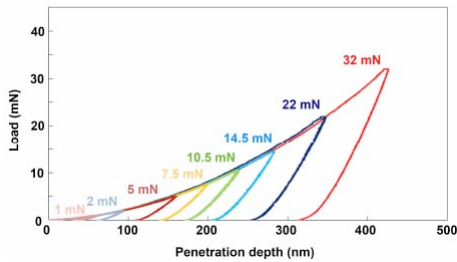


図2. InN のナノインデンテーションでの荷重-変位曲線

(3) 窒化半導体の弾性特性支配因子

図3は窒化物半導体のヤング率、せん断弾性定数、ナノインデンテーション硬度値(H_{NI})の a 軸格子定数に対する依存性を示す。窒化物半導体ではそれらの値は格子定数 a に対して、ほぼ $\approx Aa^{-5}$ (A : 定数)の依存性があることが明瞭に分かる。また、同じワルツ鉱型構造の ZnO の何れの値も窒化物の値より小さい。これらは結晶の弾性的および硬度特性が原子間結合力の共有結合成分に支配されることを示唆する。

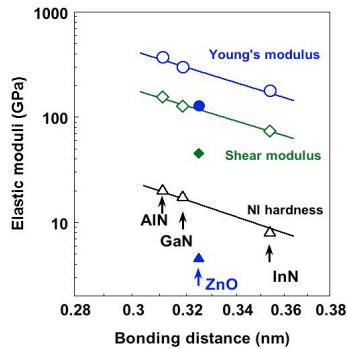


図3. 窒化物半導体の弾性係数の原子間結合依存性

(4) ナイトライド混晶

MOCVD 法によってサファイア基板上に育成された様々な組成の、厚さが 0.8-1 μm の $Al_xGa_{1-x}N$ 混晶について、ナノインデンテーション法によって室温での硬度特性と組成の関係を調べた。その硬度は中間組成で最大値を示し、混晶に特有の $x(1-x)$ 則に従った。それら混晶のヤング率は組成によらず、ほぼ一定であった。中間組成での硬度増加の原因として混晶特有の原子配置のランダムな混合による結晶の硬化機構が明らかになった。

(5) ワイドギャップ半導体の強度特性

図4は各種のワイドギャップ半導体について、圧縮変形法によって決定した降伏強度 τ_y の温度に対する依存性を示す。Si の結果を比較基準とすると、GaN と SiC の降伏強度は 1,000°C においても 100-200 MPa で、Si よりも2桁以上も高い。これに対し、ZnO の降伏強度は 650°C で 15 MPa であり、GaN や SiC に較べるとワイドギャップ半導体としては高くない。また、ZnSe の降伏強度は GaN より2桁以上低い。

結晶の降伏強度 τ_y は温度 T と変形速度 $\dot{\epsilon}$ の関数として次の経験式で記述することができた。

$$\tau_y = A \dot{\epsilon}^{1/n} \exp(U/k_B T), \quad (1)$$

ここで、 A 、 n 、 U は定数であり、 k_B は Boltzmann 定数である。

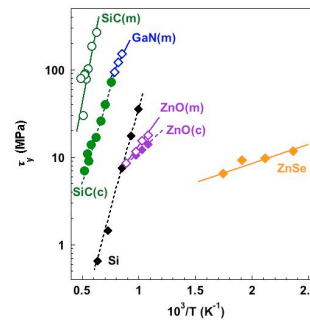


図4. 各種ワイドギャップ半導体結晶の降伏強度の温度依存性

(6) 転位の運動特性を支配する因子

半導体結晶において、結晶中を運動する転位の速度 v は応力 τ と温度 T の関数として次式で表される。

$$v = v_0 (\tau/\tau_0)^m \exp(-Q/k_B T), \quad (2)$$

ここで、 $\tau_0 = 1$ MPa であり、 v_0 、 m 、 Q は定数で、種々の半導体において実験的に決定されている。また、②式の m と Q は①式の n 、 U と次の関係にある。

$$m = n - 2, \quad Q = U \cdot n. \quad (3)$$

これは結晶性材料の巨視的な変形がその中の微視的な過程である転位の集団運動に支配されていることに基づく。

多くの半導体では、転位のすべり運動の活性化エネルギー Q はバンドギャップエネルギーに対して、元素、IV-IV 族、III-V 族、II-VI 族化合物半導体のグループで、それぞれ線形関係にあり、その傾きは元素及び IV-IV 族系、III-V 族系、II-VI 族系のグループの順に小さくなる。これはこれら半導体のイオン性に関連する。これは転位のすべり運動の活性化エネルギーがバンドギャップエネルギーとイオン性に支配されることを示す。この関係を用いると、新規半導体での転位の運動を予測することができる。

図5はワイドギャップ半導体結晶について、最小長さの転位が有するエネルギー Gb^3 (G : せん断弾性定数、 b : 転位のバーガースペクトルの大きさ) と転位の運動の活性化エネルギー Q との関係を示す。この関係で結晶のイオン性によらず、一義的な関係性が見出される。この関係から AlN

結晶中の転位の運動速度の活性化エネルギーが約3eV、InN結晶で約1eVと見積られる。

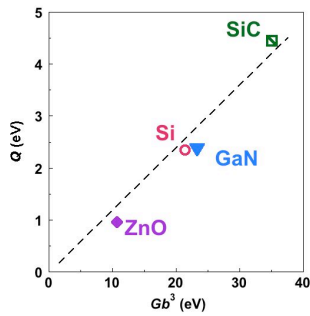


図 5. 各種ワイドギャップ半導体結晶の転位の運動の活性化エネルギーと最小転位エネルギーの関係

(7) 炭化ケイ素(SiC)における転位運動促進

SiC 結晶の 30°部分転位が電子線の照射下で運動し、その結果部分転位間の積層欠陥が拡張・収縮する挙動をその場観察し、転位運動の素過程として、キンクが照射下でのみ、その照射強度に依存して運動する機構を見出した。

(8) GaN 中の転位の電子構造

塑性変形によって、GaN 結晶中にバーガースベクトルが $(a/3)\langle 11\bar{2}0 \rangle$ の転位を 10^9cm^{-2} 以上の密度で導入した。フォトルミネッセンス特性は、図 6 に示すように、育成したままの結晶で認められたバンド端 (3.48eV) のピークの強度は塑性変形により著しく低下した。このピークは D^0X に起因するが、その強度は結晶の転位密度の増加につれて著しく低下し、また中心ピーク位置は低エネルギー側へシフトする。同様に、ミッドギャップ域に見られる空孔-酸素複合体に起因する yellow band (2.22 eV) と呼ばれる発光の強度も結晶の変形量の増加につれて著しく低下する。このように、塑性変形は結晶の発光特性に対して強いパッシベーション効果をもたらす。一方、塑性変形によって導入されたフレッシュな転位に起因する 1.79、1.92、2.4 eV を中心とする新たなピークも見いだされた。変形によって誘起されたフォトルミネッセンススペクトルの特徴はその後の熱処理に影響され、バンド端と yellow band のピークはそのピーク強度が回復する挙動を示した。これに対し、変形によって新規に形成されたピークは熱処理の影響を受けなかった。このよ

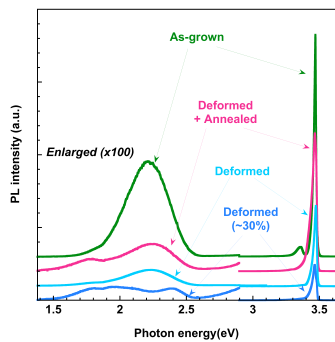


図 6. フレッシュ転位を含む GaN 結晶のフォトルミネッセンス

うな変形および熱処理に対する光学特性の変化から、まず、塑性変形によってアクセプタ型の高密度の非発光再結合中心が導入される。その結果として結晶中の自由キャリアの濃度が低下する。一方、それらの変形によって導入された非発光中心は熱処理によって消失し、その濃度が低下する。yellow band は変形によって破壊された空孔-酸素複合体が熱処理中に再形成されたために回復したと考えられる。図 7 は、塑性変形によって GaN 中に導入された転位の電気光学特性から、同定された発光・非発光電子レベルを示す。

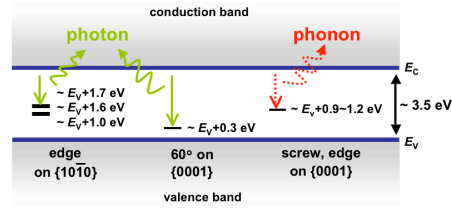


図 7. GaN 中の転位の電子構造

(9) ZnO 中の転位の光学特性

ZnO 中に導入された転位は、GaN と同様にバンド端発光には影響しないが、点欠陥と結合したアクセプター型の複合体により 0.3、0.05 eV に吸収ピークを形成されることが得られた。

(10) 転位の固有電荷

塑性変形した GaN 結晶の光吸収スペクトルはその吸収端が塑性変形につれて低エネルギー側へシフトし、同時に吸収端近傍での吸収係数の変化が緩やかになった。その特徴は一次元電荷配置による電界 (Franz-Keldysh) 効果に対応する。この結果の解析により GaN 結晶では、c 軸方向に沿った転位が約 $5.8e/\text{nm}$ の電荷を有し、その周囲に電界を誘起していると判断された。

(11) 転位による一次元伝導

半導体中の転位はバンドギャップ中に局在準位や一次元バンドを形成する。このような準位やバンドは一次元伝導としての物理特性を有す。そして、それを制御することでナノワイヤー等への展開が期待される。本研究では塑性変形によって導入した転位による電気伝導特性を走査型広がり抵抗顕微鏡 (SSRM) により調べた。図 8 は、塑性変形で転位を導入した GaN 試料の SSRM 像であり、導電性の明るいスポットが観察された。その大きさは 10~20 nm であった。その部分での伝導度は周囲に比べ、 $10^2 \sim 10^3$ 程度高かった。そのスポットの密度は転位密度に一致し、変形量が多いほど増加した。また、それら

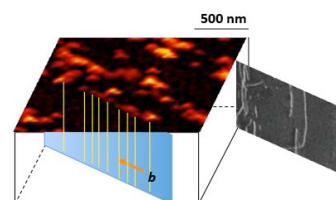


図 8. GaN 中の転位に沿った電気伝導

のスポットは結晶のすべり方向に沿って並ぶことから、変形によって導入された刃状転位に起因するものと判断された。転位に沿った電荷の伝導は V-I 特性評価から、典型的なダイオード特性と、さらに Frenkel-Poole 型のホッピング伝導を示した。転位線に沿ったジョグなどの特異点で電荷が滞留することが考えられる。

(12) 塑性変形によって導入される点欠陥

塑性変形によってアクセプタ型の高密度の非発光再結合中心が導入されることを陽電子消滅法で検討した。HVPE 法で育成した GaN バルク結晶を 950°C において変形した。陽電子消滅法では注入された陽電子が結晶内で消滅するか、空孔型欠陥に捕獲されて消滅するため、消滅時に発生する γ 線のドップラー効果の解析により空孔型の欠陥、クラスターが多量に導入されていることが確認された。これらが塑性変形で電荷が捕獲される原因であることが明らかとなった。

(13) 薄膜成長時の優先成長方位の発達機構

基板と薄膜の格子不整合が大きいヘテロエピタキシャル成長では、バッファ層が利用される。低温で堆積されるアモルファスのバッファ層は高温層堆積において結晶化し、多結晶粒となるが、特定の方位を有する微結晶が優先的に成長する。本研究ではサファイア基板上に育成された a 軸を成長方向とする GaN 層を高分解能電子顕微鏡により観察し、その中に異なる方位の微結晶が存在することを見出した。高精度 X 線構造解析法での極点図観察により、母層結晶と微結晶の配向関係を調べた。その結果、GaN などのウルツ鉱構造結晶では 1 個の原子は隣接する 4 個の原子と結合し、c 軸に平行な 1 本の結合 (b_c) と平行でない 3 本の結合 (b_a) を有するが、結晶成長過程では c 軸方位と a 軸方位の結合ボンドの間で、図 9 に示すようなミスボンディング機構が存在し、その結果基板からの成長過程では多結晶層中で特定の方位の微結晶が発生し、それらの中で優先成長方位に近い結晶が成長すると判断された。

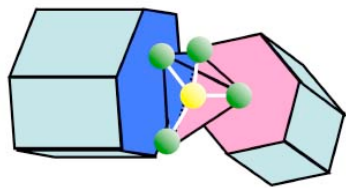


図 9. ウルツ鉱型構造での結晶方位の変調

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 21 件)

- ① I. Yonenaga, Evaluation of dislocation mobility in wurtzite semiconductors, Materials Research Society Symposium Proceedings of Synthesis, Processing and mechanical properties of functional hexagonal materials, 2015, 査読有, 1741, 2015.61 (1-8).
- ② I. Yonenaga, Y. Ohno, T. Yao and K.

Edagawa, Optical and electrical properties of dislocations in plastically deformed GaN, J. Crystal Growth 2014, 査読有, 403, 72-76.

- ③ Y. Ohno and I. Yonenaga, In-situ micro and near-field photo-excitation under transmission electron microscopy, Appl. Surface Science, 2014, 査読有, 302, 29-31.
- ④ Y. Ohno, H. Koizumi, Y. Tokumoto, K. Kutsukake, H. Taneichi and I. Yonenaga, Slip systems in wurtzite ZnO activated by Vickers indentation on {2-1-10} and {10-10} surfaces at elevated temperatures, J. Crystal Growth 2014, 査読有, 393, 119-122.
- ⑤ T. Yokoyama, Y. Kamimura, K. Edagawa and I. Yonenaga, Local current conduction due to edge dislocations in deformed GaN studied by scanning spreading resistance microscopy, Euro. Phys. J. Appl. Phys. 査読有, 2013, 61, 10102 (1-4).
- ⑥ 徳本有紀, 李賢宰, 大野裕, 八百隆文, 米永一郎, 非極性 GaN 層中の微結晶粒の効率的な検出と今後の展望, までりあ, 査読有, 2013, 52, 273-277.
- ⑦ A. Uedono, I. Yonenaga, T. Watanabe, S. Kimura, N. Ohsaima, R. Suzuki, S. Ishibashi and Y. Ohno, Vacancy-type defects introduced by plastic deformation of GaN studied using monoenergetic positron beams, J. Appl. Phys. 2013, 査読有, 114, 084506 (1-6).
- ⑧ Y. Tokumoto, Y. Ohno, K. Kutsukake and I. Yonenaga, Dislocation structure in AlN films induced by in situ nanoindentation, J. Appl. Phys. 査読有, 2012, 112, 093526 (1-6).
- ⑨ Y. Tokumoto, H-J. Lee, Y. Ohno, T. Yao and I. Yonenaga, Formation and evaluation of misoriented grains in a-plane oriented gallium nitride layers, Mater. Trans. 査読有, 2012, 53, 1881-1884.
- ⑩ Y. Ohno, I. Yonenaga, K. Miyao, K. Maeda and H. Tsuchida, In-situ transmission electron microscopy of partial-dislocation glide in 4H-SiC under electron irradiation, Appl. Phys. Lett. 査読有, 2012, 101, 042102 (1-3).
- ⑪ Y. Ohno, Y. Tokumoto, I. Yonenaga, K. Fujii and T. Yao, Recombination activity of dislocations on (0001) introduced in wurtzite ZnO at elevated temperatures, Physica B 査読有, 2012, 407, 2886-2888.
- ⑫ Y. Ohno, Y. Tokumoto, I. Yonenaga, K. Fujii and T. Yao, Optical properties of edge dislocations on (1100) in wurtzite ZnO introduced at elevated temperatures prismatic planes, J. Appl. Phys. 査読有, 2012, 11, 113514 (1-6).

〔学会発表〕 (計 55 件)

- I. Yonenaga and K. Edagawa, Electrical conduction along dislocations freshly induced into GaN by plastic deformation, Material

- Science Society 2015 Spring Meeting, 2015.4.6-10, San Francisco (USA).
- ② I. Yonenaga, Strength and Dislocation Mobility in Wide Bandgap Semiconductors, Material Science Society 2014 Fall Meeting, 2014.12.1-5, Boston (USA).
- ③ 大久保泰、出浦桃子、徳本有紀、沓掛健太郎、大野裕、米永一郎、InN の硬度とヤング率、電子デバイス研究会(ED)/電子部品・材料研究会(CPM)/レーザー・量子エレクトロニクス研究会(LQE)、平成 26 年 11 月 27 日、大阪大学 (吹田市)。
- ④ 米永一郎、GaN 中の転位の電気的特性、光学的特性、第 24 回格子欠陥フォーラム「パワーデバイス開発のための格子欠陥評価・制御」、平成 26 年 9 月 11-12 日、かんぽの宿恵那 (岐阜県恵那市)。
- ⑤ 出浦桃子、大野裕、福山博之、米永一郎、CO ガスを用いた Si 表面炭化により形成した SiC 層の微細構造評価、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、平成 26 年 9 月 17-20 日、北海道大学 (札幌市)。
- ⑥ Y. Ohno, I. Yonenaga, Development of a small light probe towards in-situ near-field Raman spectroscopy under transmission electron microscopy, 15th International Conference on Extended Defects in Semiconductors, 2014.9-14-19, Goettingen (Germany).
- ⑦ I. Yonenaga, T. Yao, K. Edagawa, Intrinsic properties of dislocations freshly induced by plastic deformation in GaN, Material Science Society 2013 Fall Meeting, 2013.12.2-6, Boston (USA).
- ⑧ Y. Tokumoto, H. Taneichi, Y. Ohno, K. Kutsukake, H. Miyake, K. Hiramatsu, I. Yonenaga, Nanoindentation hardness of AlGaN alloys, The 10th International Conference on Nitride Semiconductors, 2013.8.25-30, Washington D.C. (USA).
- ⑨ I. Yonenaga, Y. Ohno, Y. Tokumoto, K. Kutsukake, Dislocation mobilities in wide band-gap semiconductors, The 19th American Conference on Crystal Growth (ACCGE-19), 2013.7.21-26, Keystone (USA).
- ⑩ Y. Ohno, H. Koizumi, Y. Tokumoto, K. Kutsukake, H. Taneichi, I. Yonenaga, Slip systems in wurtzite ZnO single crystals at elevated temperatures, The 19th American Conference on Crystal Growth (ACCGE-19), 2013.7.21-26, Keystone (USA).
- ⑪ 米永一郎、ナイトライド結晶中の拡張欠陥-転位の運動、電気・光学特性 -, 日本学術振興会学振 145「結晶加工と評価技術」委員会 134 回研究会、平成 25 年 6 月 14 日、明治大学 (東京都)。
- ⑫ 大野裕、徳本有紀、沓掛健太郎、種市寛人、米永一郎、高温微小硬度試験法で導入された ZnO 中の転位の構造特性、日本物理学会 2013 春、平成 25 年 3 月 26-29 日、広島大学 (東広島市)。
- ⑬ 徳本有紀、種市寛人、沓掛健太郎、大野裕、米永一郎、ナノインデンテーション法による AlxGa1-xN 薄膜の硬度測定、日本物理学会 2013 春、平成 25 年 3 月 26-29 日、広島大学 (東広島市)。
- ⑭ I. Yonenaga, Y. Ohno, Y. Tokumoto, Dislocation-induced Optical Properties of Wide Gaps GaN and ZnO, Dislocations 2012, 2012.8-27-31, Budapest (Hungary).
- ⑮ Y. Ohno, Y. Tokumoto, I. Yonenaga, K. Fujii and T. Yao, Optical properties of prismatic dislocations in ZnO, 14th International Conference on Extended Defects in Semiconductors, 2012.6.24-29, Thessaloniki (Greece).
- ⑯ Y. Tokumoto, K. Kutsukake, Y. Ohno, I. Yonenaga, Propagation Behavior of Nanoindentation-induced Dislocations in AlN Films, 14th International Conference on Extended Defects in Semiconductors, 2012.6.24-29, Thessaloniki (Greece).
- ⑰ Y. Ohno, Revisiting radiation-enhanced dislocation glide with recent studies on 4H-SiC, 14th International Conference on Extended Defects in Semiconductors, 2012.6.24-29, Thessaloniki (Greece).
- [図書] (計 1 件)
- ① Y. Ohno and S. Takeda, Cathodoluminescence in scanning and transmission electron microscopies, chapter in In-situ Electron Microscopy, Wiley-VCH, 2012, 309-319.
5. 研究組織
- (1) 研究代表者
米永 一郎 (YONENAGA ICHIRO)
東北大学・金属材料研究所・教授
研究者番号：20134041
- (2) 研究分担者
大野 裕 (OHNO YUTAKA)
東北大学・金属材料研究所・准教授
研究者番号：80243129
- 徳本 有紀 (TOKUMOTO YUKI)
東北大学・金属材料研究所・助教
研究者番号：20546866
- 沓掛 健太郎 (KUTSUKAKE KENTARO)
東北大学・金属材料研究所・助教
研究者番号：00463975
- 出浦 桃子 (DEURA MOMOKO)
東北大学・金属材料研究所・助教
研究者番号：90609299