

近接場光と高速電子の融合によるナノ機能創製

結晶欠陥物性学研究部門

大野 裕, 太子 敏則, 米永 一郎

概要

透過電子顕微鏡内における顕微鏡観察位置に接触させた金属探針へのレーザー光の照射により、顕微鏡観察下で観察領域に局在近接場光を形成する装置を開発しました。この装置を応用して ZnO 中の転位の構造とその光学応答をその場評価し、電子状態を解明しました。光照射による転位すべり運動その場観察データと発光測定データの解析から、らせん転位と刃状転位はそれぞれ深さ 0.9~1.01eV と 1.2~1.4 eV の深いアクセプタ準位を形成して非発光な光学応答(電子緩和によりフォノンを放出)を示すが、混合転位(主に 60° 転位)は深さ 0.05eV および 0.3eV の浅いアクセプタ準位を形成して発光中心として働く(電子緩和によりフォトンを放出)ことが分かりました。

前書き

ナノテクノロジー実用化にむけ、カーボンナノチューブ、ナノワイヤ、ナノ触媒、有機・生体分子など機能性ナノ構造体の自発的・人工的形成を制御することが求められています。ナノ構造体は環境の変化に伴い構造や構成が変化し、またその変化がしばしば物理的特性に影響します。そのため任意機能を持つナノ構造体を設計・形成するには 1) 機能の起源、2) 機能の発現機構、および 3) 構造体の形成機構の解明が必要です。それには、個々のナノ構造体の形状・構造・組成および形成過程の評価に加えてそのナノ構造体の物理的特性を直接評価することが必須です。しかし、ナノ構造体の原子構造と物理的特性を同時に評価するのは技術的に非常に難しく、最近に先駆的データが著名雑誌に掲載され始めたばかりです(カーボンナノチューブの内部構造と光学特性の同時評価[1, 2]など)。

ナノ構造体の光学的特性を直接評価する方法の一つに、局在近接場光による近接場光学顕微鏡法(プローブ顕微鏡と局在近接場分光の複合法)があります。この手法により、原子分解能で表面構造を観察しながら光学応答を同時評価することができます。例えば、孤立したカーボンナノチューブや半導体ナノワイヤ、生体高分子などへの局所光照射により、フォトルミネセンス光やラマン散乱光が得られています[3 など]。現在、空間分解能が 30nm 以下で表面構造とその光学応答性が解析・評価されています。

現在のところ、近接場光学顕微鏡法ではナノ構造体の内部構造・組成と光学応答性との相関を直接得ることができません。3 次元構造の相関を得る要請は強く、2006 年春の応用物理学会シンポジウム「走査プローブ顕微鏡のロードマップ」においても、10 年後までに表面から深さ数 nm までの領域を解析する、とのマイルストーンが示されています。

これまで、本研究者らは透過電子顕微鏡内で光励起(数 10mm の領域)および発光(フォトルミネセンス、カソードルミネセンス)分光測定できる装置を開発し[4, 5]、ナノ構造体の内部構造と光学応答性の同時評価を実践してきました。この手法により、半導体内の面状ナノ構造体[6]や半導体ナノワイヤ[7]の発光特性、半導体ナノ構造体の光誘起構造変化[8]および電子照射誘起構造変化[9, 10]などを明らかにしました。しかし得られた光学応答は多数のナノ構造体の平均情報であり、複雑な統計的手法により個々のナノ構造体の情報を評価する必要がありました。局在近接場を透過電子顕微鏡内その場分光法に応用できればより直接的にナノ構造体の内部構造とその光学応答性が調べられるとの考えから当該研究構想に至りました。

ナノ構造体の光学応答性は原子レベルのわずかな構造の違い、たとえば微量の点欠陥や不純物の存在、などに大きく影響されます。ナノ構造体を用いたオプトエレクトロニクスデバイスのプリカーサは既に開発されていますが[11-13 など]、実用化のためには個々のナノ構造体の化学的 3 次元構造とその光学応答性を理解することが不可欠です。しかし、そのデータは実験の難しさからまだ十分に得られておらず、新実験手法による質的新奇なデータ取得が待ち望まれています。本研究では、透過電子顕微鏡内部において顕微鏡観察と同時に顕微鏡観察領域に高輝度の局在近接場光を照射し、ナノ領域における内部構造と光学応答性を同時に得るための装置を開発しました。その装置を応用して、個々の半導体中の転位や半導体ナノワイヤなどの原子・電子描像その場評価、および新規ナノ機能創製を試みました。

本論

1) 透過電子顕微鏡内での局在近接場光形成装置の開発

ナノ領域の内部構造と光学応答性を同時評価するため、透過電子顕微鏡内の顕微鏡観察領域に、高輝度の局在近接場光を顕微鏡観察と同時に形成しました(図1)。概略は、

- (1) ポールピース間に設置の回転放物面鏡で透過電子顕微鏡内に設置した試料上の数 μm 以下の領域に任意波長の励起光を集光しました。(顕微分光法の応用)
- (2) 透過電子顕微鏡観察位置からカソードルミネセンス光が放射されます。この光の放射位置と励起光集光位置とを長距離顕微鏡でその場観察しながら、放物面鏡の位置調整で発光位置に励起光集光位置を合致させました。(カソードルミネセンスの応用)
- (3) 金属微粒子が担持された探針を(2)の光集光位置に接触させ、微粒子表面に局在近接場光を作りました。(散乱型近接場分光法の応用)
- (4) 励起光の光子エネルギーを適切な値に選び、試料内部で高い確率で電子遷移が生じるようになりました(共鳴分光法の応用)
- (5) (3)と(4)を用い、透過電子顕微鏡観察と同時に局在近接場分光を試みました。試料は1次元格子欠陥の転位を含むZnOおよび1次元ナノ構造体のシリコン系ナノワイヤです。

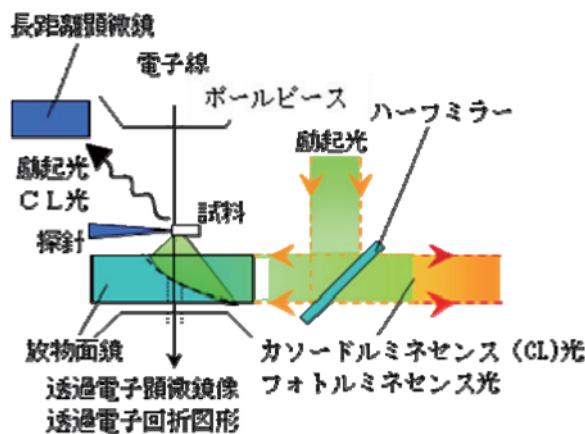


図1 透過電子顕微鏡内近接場分光システム概念図

具体的には、TEM用STMホルダー(現有備品・NanoFactory ST-1000)、透過電子顕微鏡用顕微分光機構(開発備品・西進商事特注品)、超長作動ズームマイクロスコープ(購入備品・ユニオン光学 UWZ300FP)を利用し、電子顕微鏡内の任意位置で先鋭化させた(曲率半径数100nm以下)金属探針と試料を数 nmオーダーの任意距離に固定し、その領域に顕微鏡外部から任意波長のレーザー光(購入備品・LOTIS TII LS-2134)を照射できるようにしました。

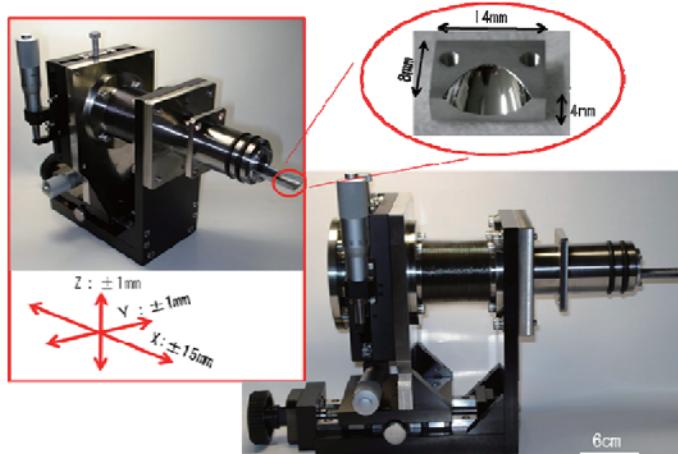


図2 放物面鏡移動機構。マイクロメーターにより、透過電子顕微鏡内でxyz方向に精度 $1\mu\text{m}$ 以下で放物面鏡を移動可。この機構に放物面鏡の回転軸と平行な光を導入すると、顕微鏡内の放物面鏡の焦点位置にその光が集光されます。また集光位置から光が放射されると、その光は同じ光路で顕微鏡外に放出されます。

入射光は、分光機構に設置された放物面鏡と光学窓(図 2)により、強度をほとんど減少させず(装置の透過率約 90%)、直径が約 $10\mu\text{m}$ の領域へと集光されます(図 3a)。従来の透過電子顕微鏡内その場分光測定装置[4]は最小集光直径が約 $30\mu\text{m}$ でその状態での装置透過率が約 1% のため、それに比べ 10^3 倍高いレーザー光強度(単位面積あたりの光子数)が実現されました。

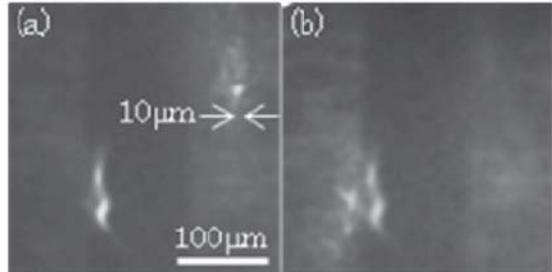


図 3 透過電子顕微鏡内その場光照射の実験例。(a)ズームマイクロスコープで見たレーザー光(右上の輝点)とカソードルミネセンス光(左下)。(b)放物面鏡の位置調整によって接近した2つの輝点。

電子顕微鏡観察(電子照射)下で、電子照射により観察領域からカソードルミネセンス光が放射されます。放射位置とレーザー光の集光位置は、2つの輝点としてズームマイクロスコープで直接観察できます(図 3a)。集光位置は放物面鏡の移動により精度 $1\mu\text{m}$ 以下で調整できます。集光位置を調整することで2つの輝点の位置を一致させ、電子顕微鏡観察領域にレーザー光を集光しました(図 3a→3b)。

先鋭化した金属探針に光を照射すると、探針の先端に局在した近接場光が形成されます。例えば光源にアルゴンレーザー(波長 514.5nm)、探針に銀コートタンクステンワイヤ(曲率半径が約 100nm)を用いると近接場光の強度は励起光の数 10 倍となります[14]。その結果、透過電子顕微鏡観察下で顕微鏡観察領域に高輝度の局在近接場光が形成されることとなりました(図 4)。

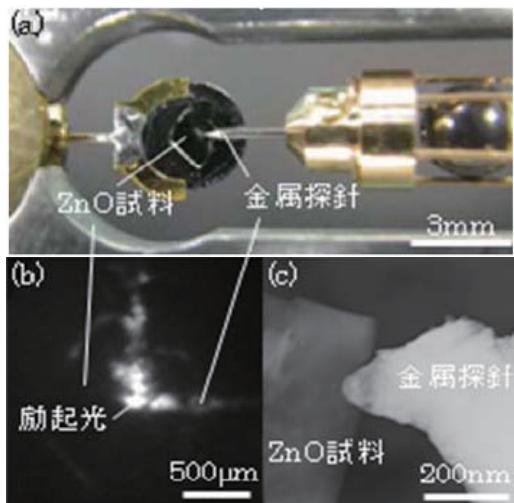


図 4 透過電子顕微鏡内近接場光形成の実験例。(a) TEM 用 STM ホルダ試料配置。顕微鏡内で光照射された金属探針と試料の(b)マイクロスコープ像と(c)透過電子顕微鏡像。

局在近接場光の形成は、次章で詳しく記述される、ZnO 中の転位の光誘起すべり運動を利用して確認しました。図 5 にその実験を示します。照射により転位線の位置が点線から実線へ移動しました。このすべり運動は金属探針近傍の転位でのみ生じ、また金属探針に光照射しない(電子顕微鏡観察のみの)場合すべりを生じませんでした。これらの結果より、金属探針の近傍に高輝度の局在近接場光が形成されていると結論しました。

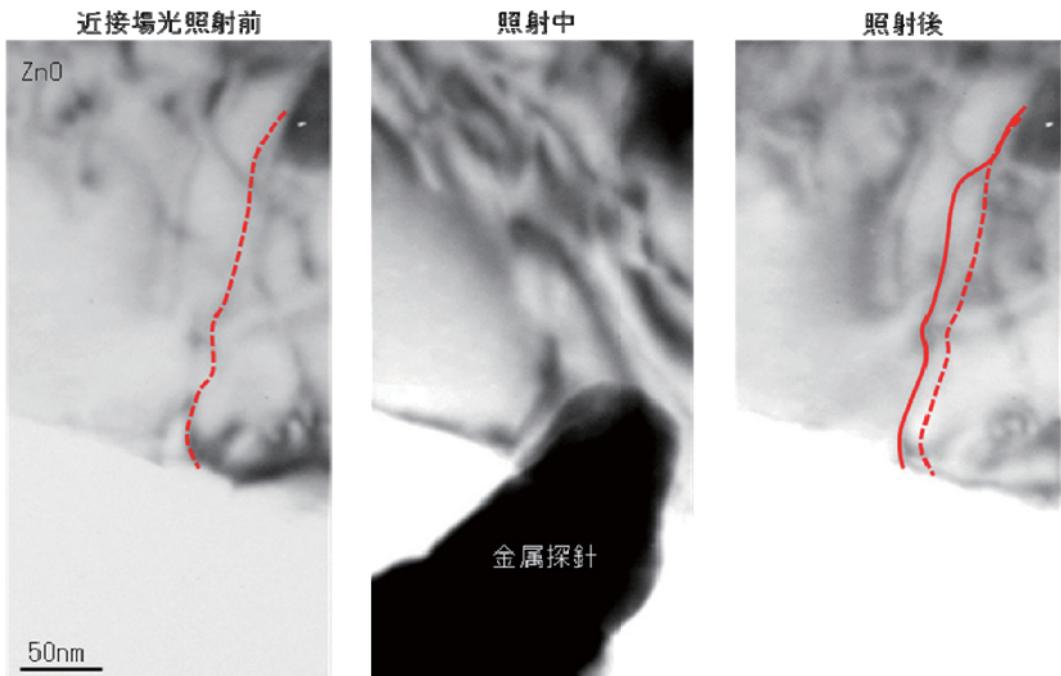


図 5 近接場光照射による転位すべり。光子エネルギー2.41eV、光強度約 10^3 W/m^2 の光を5分間照射。照射中の像コントラストが照射前後と異なるのは探針と試料の接触により生じた僅かな歪みのため。この歪みの転位すべり効果への影響は無視できます。

従来のその場分光装置は試料からの信号光を楕円型鏡で集光して光ファイバを通して分光測定しており、集光効率は約10%でした。本研究ではレーザー光集光用の放物面鏡を用いて信号光を直接分光器へ導入するため、集光効率は約2倍高くなりました(図6)。

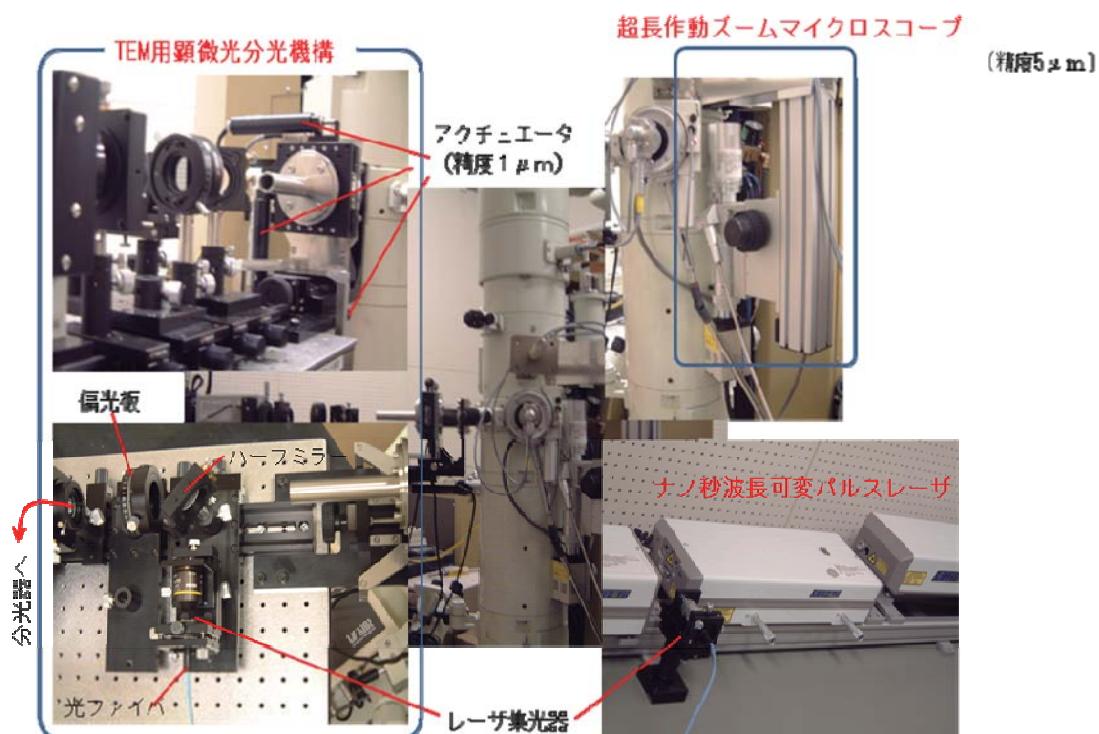


図 6 装置の全体図。顕微鏡内の試料から放射された光はハーフミラーを透過して分光器および検知器へと導入されます。

開発した局在近接場光形成機構と信号光の集光機構を用いて、研究目的に示した試料の分光測定を試みました。しかし、研究期間内では、有意な信号光が検知されませんでした。今後、金属探針の構造・形状および励起光エネルギーの最適化を進め、透過電子顕微鏡内その場分光の実現を目指します。近接場分光はまだ実現していませんが、開発した本機構を応用して（透過電子顕微鏡観察中に観察領域に高輝度光を照射）、研究目的の一つに対応する研究成果を得ました（次章）。

2) ZnO 中の転位の電子状態

ワイドギャップ半導体として応用が期待されている ZnO における転位の構造とその光学応答性を調べました。転位は試料をアルゴン気流中で 923 K から 1123 K の温度領域で圧縮（圧縮軸は M 面に平行で c 軸から 45 度傾いた方向）して導入しました（図 7 の TEM 図）。

フォトルミネセンス測定より [15]、転位に関係する局在準位を介し 11K の温度において 3.100 eV および 3.345 eV のゼロフォノンエネルギーを持つ光の発光を発見しました（図 7）。3.100 eV 発光 および 3.345 eV 発光の強度は、測定温度の上昇とともに 2 段階の消光過程を辿りました（図 8）。励起強度依存性の解析もふまえて、低温側の消光過程の前後で束縛励起子発光から free-to-bound 発光（局在準位に束縛されたキャリアのバンドへの光学的な遷移による発光）に変化し、高温側の消光は束縛されたキャリアのバンドへの熱的遷移の結果として生じる、と結論しました。高温側の消光過程に対する活性化工エネルギーの解析などから、3.100 eV および 3.345 eV 発光に関する局在準位の深さを、それぞれ、0.3 eV および 0.05 eV と見積もりました。

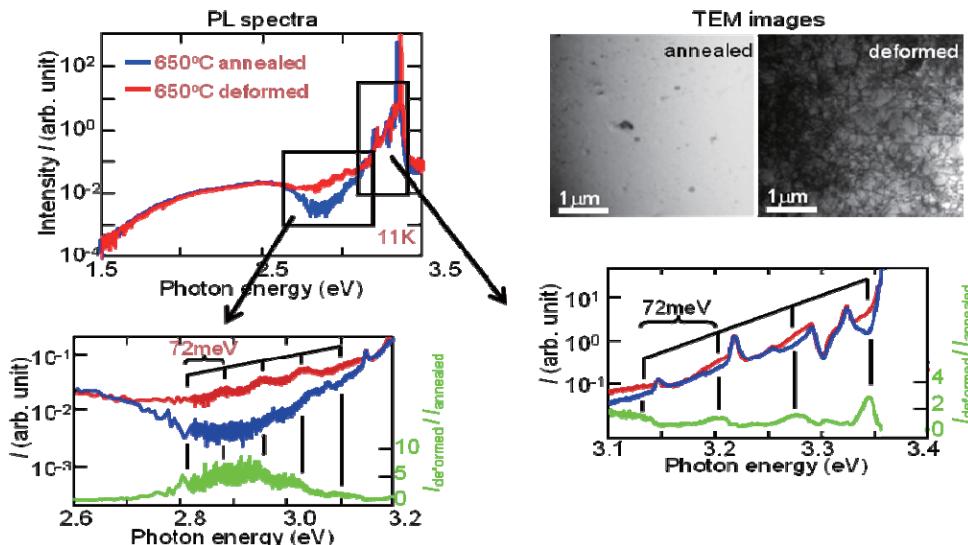


図 7 ZnO の転位関連発光。変形試料（赤線）は無変形試料（青線）に比べ 3.100 eV と 3.345 eV から低エネルギー側で L0 フォノンエネルギー（72meV）間隔で発光が強い。

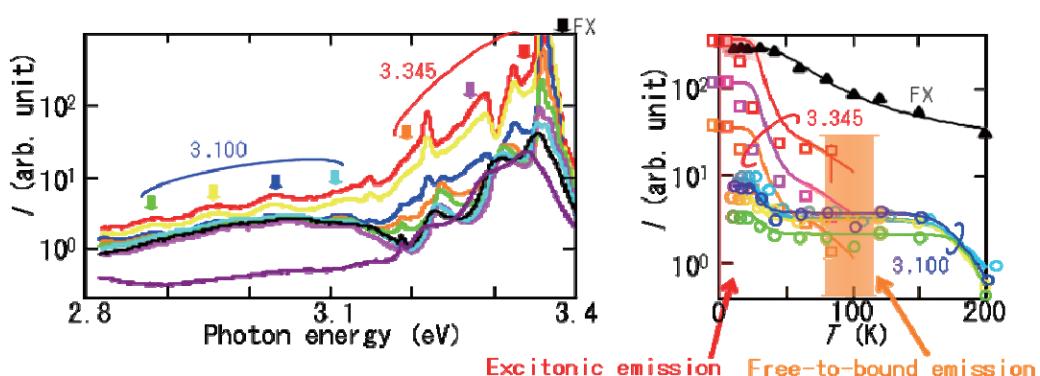


図 8 転位関連発光の温度依存性。低温側の消光過程の活性化工エネルギー（0.02eV）は、自由励起子（FX）の活性化工エネルギー（励起子の束縛エネルギー）と一致。

光照射下で透過電子顕微鏡により転位をその場観察しました。多量の混合転位(主に60°転位)と少量のらせん転位、刃状転位が確認されました。光子エネルギーをバンドギャップエネルギー(約3.4eV)より十分低い値から段階的に増加すると、約2.5eVでらせん転位がすべり運動し、混合転位へ変化するのを発見しました(図9)。すべり速度は照射強度の増加と共に増加し、照射強度一定では低温(120K)から室温までほぼ一定でした。これより転位に関連した局在準位を介して光が吸収され、そのエネルギーによって転位が運動する(電子励起誘起転位運動[16])と解釈しました。このモデルで吸収される光のエネルギーは局在準位とバンド端のエネルギー差に一致します。従ってらせん転位に関連する局在準位はバンド端から約2.5eV(あるいは $3.4 - 2.5 = 0.9$ eV)の深さに存在することとなります。 ZnO 中の転位はアクセプタ準位として働くとされているため[17]、局在準位は価電子帯端より0.9eVだけ上と結論しました。

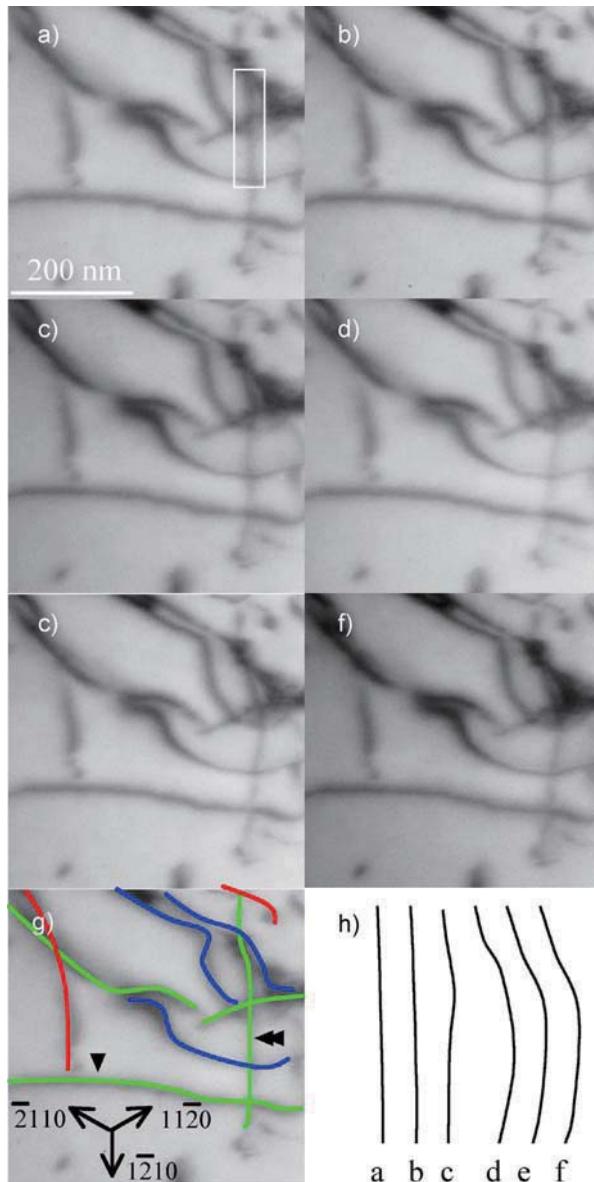


図9 光照射によるらせん転位のすべり運動(照射温度120K)。照射光のエネルギー;(a) 2.25, (b) 2.36, (c) 2.48, (d) 2.61, (e) 2.76, (f) 2.92 eV。(g) 転位の構造的特性; バーガースペクトルは[1210] (緑線), [1120] (青線), [2110] (赤線)。(h) (a)の四角で囲った転位線の光照射による形状変化。

一方で、刃状転位は2.25eV以上の光子エネルギーの光照射ですべり運動しませんが、電子照射によりらせん転位と同様なすべりを生じました(図10)。らせん転位での考察から、刃状転位は価電子帯端より1.15eV(3.4 - 2.25)以上深いアクセプタ準位を持つようです。

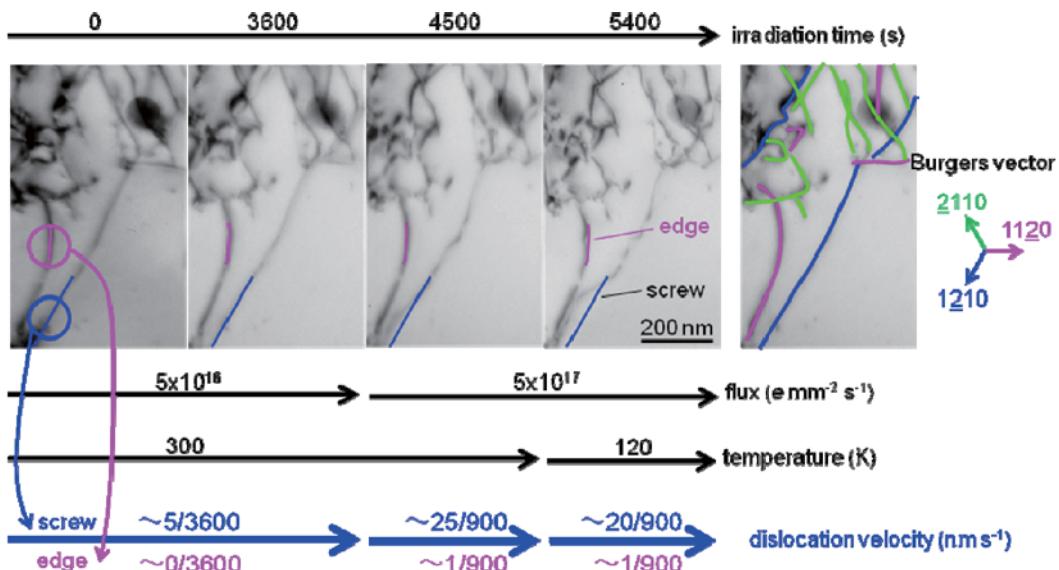


図 10 電子照射によるらせん転位および刃状転位のすべり運動。

ZnO 中の転位は光子エネルギー 3.100 および 3.345 eV の光を発光しますが、このうち、3.100 eV 光の発光強度は刃状転位およびらせん転位の光誘起すべり運動前後で変化しないことから、この準位は混合転位に関連すると結論しました(図 11, 12)。また、亜鉛(2.18 eV)と酸素(2.43 eV)の空格子点に関連した光の発光強度がすべり運動の後に増加することが分かりました(図 11, 12)。これらの試料内部から放射される光は、その光子エネルギーが転位の局在準位の深さに近いため、吸収される可能性があります。すべり運動に伴う転位近傍の構造変化で非発光中心として働いていた局在準位の数密度が減少し、転位の近傍における光吸収量が減少した結果として発光強度が増加する、と考えられます。このモデルに従うと、刃状転位の局在準位の深さは 1.2~1.4 eV 程度となります。

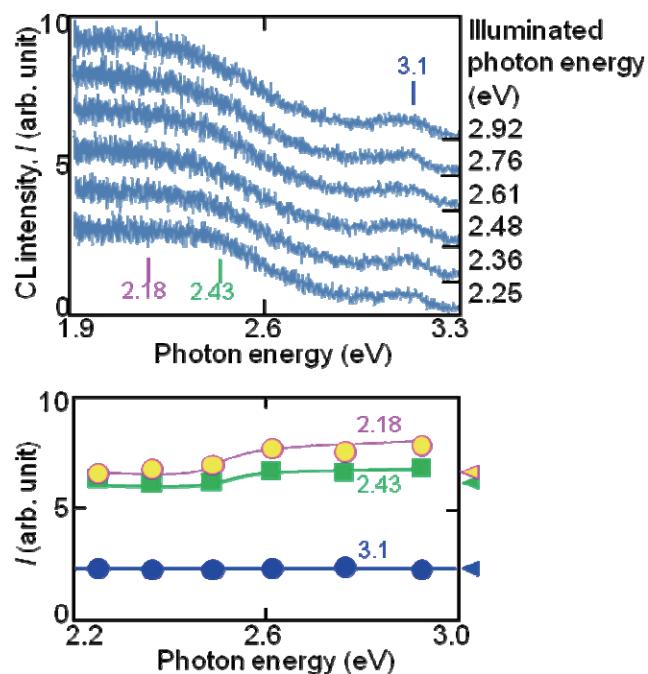


図 11 光照射によるカソードルミネセンス光強度の変化；照射光のエネルギー；下から 2.25, 2.36, 2.48, 2.61, 2.76, 2.92 eV。らせん転位のすべりを誘起する光子エネルギー(約 2.5 eV)の光照射で 2.18 eV および 2.43 eV 発光の強度が増加。3.1 eV 発光強度は光照射に対し不変。

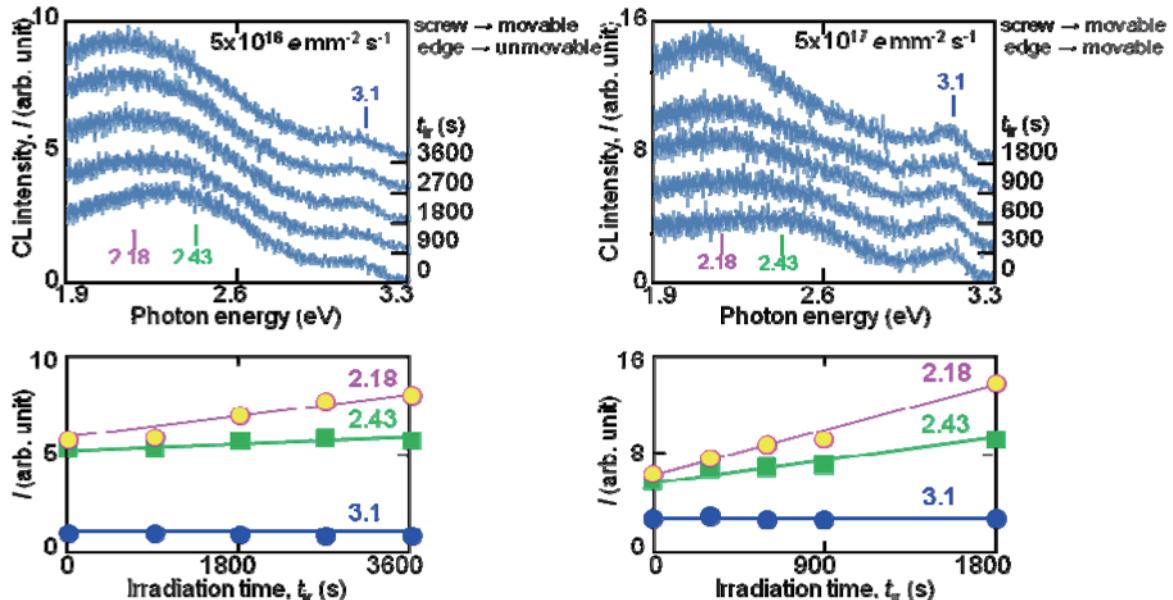


図 12 電子照射によるカソードルミネンス強度の変化；電子線強度が弱いと(左図)らせん転位のみすべり運動し、強いと(右図)らせん転位と共に刃状転位も運動する。すべり運動と共に 2.18eV および 2.43eV 発光の強度が増加。3.1eV 発光強度は不变。

本実験より考察された転位の電子状態を図 13 にまとめます。らせん転位と刃状転位は深い局在準位を形成して非発光中心として働き、一方、混合転位は比較的浅い局在準位を形成して発光中心として働く、と結論されました。この結果は同じ結晶構造(ウルツ鉱型)でほぼ同じバンドギャップエネルギーを持つ GaN と類似です [18, 19]。今後、高分解能電子顕微鏡観察などにより原子構造と電子状態の相関を明らかにし、転位の光学応答性の制御に繋げられれば、と考えています。

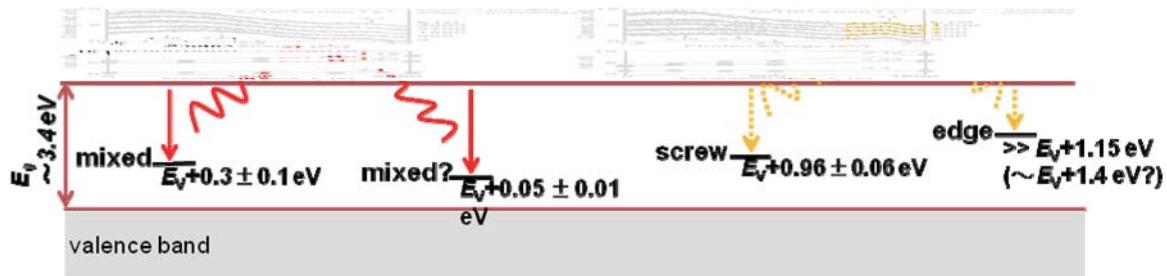


図 13 ZnO 中の転位の形成する局在準位とその光学的特性。

(3) 派生的研究

本研究では局在近接場光の形成に金属探針を使用します。TEM 用 STM ホルダを利用して試料からのトンネル電流を検知し、探針の位置を制御します。通常は低い電圧(～数V)を印加して電流を測定しますが、1次元ナノ構造体のシリコンナノチェイン[20](絶縁体)や炭化シリコンナノワイヤ(半導体)に高電圧を印加するとカーボンナノチューブ(金属)へと変換するのが発見されました。高電圧の印加で生じたジュール熱によりナノ構造体表面に付着した炭素(不純物)を原料としてナノチューブが形成され、ナノ構造体自身は蒸発することでこの変換が生じる、と説明されました。共同研究者(河野)の発見した本研究成果は、絶縁体から伝導体に至るまでナノ構造体の電気伝導特性を局所的に制御する新しい手法の可能性を提案します。

結び

透過電子顕微鏡内における顕微鏡観察位置に接触させた金属探針へのレーザー光照射により顕微鏡観察下で観察領域に任意波長の局在近接場光を形成する装置を開発しました。この装置を応用して、ZnO中の転位(1次元の格子欠陥)の電子状態をその場評価しました。光照射による転位のすべり運動その場観察データおよび発光分光測定データの解析から、らせん転位、刃状転位および混合転位それぞれの局在準位と光学活性度が個別に評価できました。本研究により、これまで困難だった、非発光準位および発光準位として働く欠陥の局在準位エネルギーの直視的評価が達成されました。装置改良を進めてより局所的な光照射・分光測定を達成し、様々なナノデバイスの光学応答評価への応用を進めます。

謝辞

本研究の一部は、金属材料研究所における研究部共同研究(一般研究)を利用した、大阪大学大学院理学研究科の河野日出夫博士との共同研究により達成されました。また、透過電子顕微鏡内での局在近接場光形成装置の一部は金属材料研究所テクニカルセンター機器開発研究グループにて製作されました。

参考文献

- [1] M. Y. Sfeir, T. Beetz, F. Wang, L. Huang, X. M. H. Huang, M. Huang, J. Hone, S. O'Brien, J. A. Misewich, T. F. Heinz, L. Wu, Y. Zhu, and L. E. Brus, Optical Spectroscopy of Individual Single-Walled Carbon Nanotubes of Defined Chiral Structure, *Science* **312**, 554 (2006).
- [2] J. C. Meyer, M. Paillet, T. Michel, A. Moreac, A. Neumann, G. S. Duesberg, S. Roth, and J.-L. Sauvajol, Raman modes of index-identified freestanding single walled carbon nanotubes, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 217401 (2005).
- [3] N. Hayazawa, T. Yano, H. Watanabe, Y. Inouye, and S. Kawata, Detection of individual single-wall carbon nanotube by tip-enhanced near-field Raman spectroscopy, *Chem. Phys. Lett.* **376**, 174 (2003).
- [4] Y. Ohno and S. Takeda, A new apparatus for in-situ photoluminescence spectroscopy in a transmission electron microscope, *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 4866 (1995).
- [5] Y. Ohno and S. Takeda, Analysis of polarization by means of polarized cathodoluminescence spectroscopy in a TEM, *J. Electron Microsc.* **51**, 281 (2002).
- [6] Y. Ohno, Polarized light emission from antiphase boundaries acting as slanting quantum wells in GaP/InP short-period superlattices, *Phys. Rev. B* **72**, 121307 (2005).
- [7] N. Ozaki, Y. Ohno, J. Kikkawa and S. Takeda, Growth of silicon nanowires on H-terminated Si {111} surface templates studied by transmission electron microscopy, *J. Electron Microsc.* **54**, i25 (2005).
- [8] Y. Ohno, Photoinduced stress in a ZnSe/GaAs epilayer containing 90° α partial dislocations, *Appl. Phys. Lett.* **87**, 181909 (2005).
- [9] Y. Ohno, Y. Kawai, and S. Takeda, Vacancy-migration-mediated disordering in CuPt-ordered (Ga, In)P studied by in situ optical spectroscopy in a transmission electron microscope, *Phys. Rev. B* **59**, 2694 (1999).
- [10] Y. Ohno, S. Takeda, and M. Hirata, Clustering process of interstitial atoms in gallium phosphide studied by transmission electron microscopy, *Phys. Rev. B* **54**, 4642 (1996).
- [11] P. J. Pauzauskie, D. J. Sirbuly, and P. Yang, Semiconductor nanowire ring resonator laser, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 143903 (2006).
- [12] X. Duan, Y. Huang, Y. Cui, J. Wang and C. M. Lieber, Indium phosphide nanowires as building blocks for nanoscale electronic and optoelectronic devices, *Nature* **409**, 66 (2001).
- [13] M. H. Huang, S. Mao, H. Feick, H. Yan, Y. Wu, H. Kind, E. Weber, R. Russo, and P. Yang, Room-Temperature Ultraviolet Nanowire Nanolasers, *Science* **292**, 1897 (2001)
- [14] N. Hayazawa, Y. Inouye, Z. Sekkat, and S. Kawata, Metallized tip amplification of near-field Raman scattering, *Opt.Commun.* **183**, 333 (2000).

- [15] Y. Ohno, H. Koizumi, T. Taishi, K. Fujii, H. Goto, T. Yao, and I. Yonenaga, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 011922 (2008).
- [16] K. Maeda, K. Suzuki, Y. Yamashita, and Y. Mera, Dislocation motion in semiconducting crystals under the influence of electronic perturbations, *J. Phys.: Condens. Matter* **12**, 10079 (2000).
- [17] E. Muller, D. Gerthsen, P. Bruckner, F. Scholz, Th. Gruber, and A. Waag, Probing the electrostatic potential of charged dislocations in n-GaN and n-ZnO epilayers by transmission electron holography, *Phys. Rev. B* **73**, 245316 (2006).
- [18] N. Yamamoto, H. Itoh, V. Grillo, S.F. Chichibu, S. Keller, J.S. Spence, S.P. DenBaars, U.K. Mishra, S. Nakamura, G. Salviati, Cathodoluminescence characterization of dislocations in gallium nitride using a transmission electron microscope, *J. Appl. Phys.* **94**, 4315 (2003).
- [19] M. Albrecht, H.P. Strunk, J.L. Weyher, I. Grzegory, S. Porowski, T. Wosinski, Carrier recombination at single dislocations in GaN measured by cathodoluminescence in a transmission electron microscope, *J. Appl. Phys.* **92**, 2000 (2002).
- [20] H. Kohno and S. Takeda, Chains of crystalline-Si nanospheres: growth and properties, *e-J. Surf. Sci. Nanotechnol.* **3**, 131 (2005).

発表論文・著書

- 1) *In-situ* analysis of optoelectronic properties of semiconductor nanostructures and defects in electron microscopes:
Y. Ohno, accepted for publication as a book chapter in *Optoelectronic Devices and Properties*, INTECH (2011).
- 2) Electrical breakdown of individual Si nanochains and silicide nanochains:
H. Kohno, T. Nogami, S. Takeda, Y. Ohno, I. Yonenaga, S. Ichikawa, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* (2010) in press.
- 3) *In-situ* analysis of optoelectronic properties of twin boundaries in AlGaAs by polarized cathodeluminescence spectroscopy in a TEM:
Y. Ohno, *Journal of Electron Microscopy* (2010) 1–6 in press.
- 4) In situ transmission electron microscopy observation of the graphitization of silicon carbide nanowires induced by Joule heating:
H. Kohno, Y. Mori, S. Takeda, Y. Ohno, I. Yonenaga, S. Ichikawa, *Applied Physics Express* **3** (2010) 055001/1–3.
- 5) Transformation of a SiC nanowire into a carbon nanotube:
H. Kohno, Y. Mori, S. Ichikawa, Y. Ohno, I. Yonenaga, S. Takeda, *Nanoscale* **1** (2009) 344–346.
- 6) *In-situ* analysis of optoelectronic properties of dislocations in ZnO by TEM observations:
Y. Ohno, T. Taishi, I. Yonenaga, *physica status solidi (a)* **206** (2009) 1904–1911.
- 7) Converting an insulating silicon nanochain to a conducting carbon nanotube by electric breakdown:
T. Nogami, Y. Ohno, S. Ichikawa, H. Kohno, *Nanotechnology* **20** (2009) 335602/1–5.
- 8) Optical properties of dislocations in wurtzite ZnO single-crystals introduced at elevated temperatures:
Y. Ohno, H. Koizumi, T. Taishi, K. Fujii, H. Goto, T. Yao, and I. Yonenaga, *Journal of Applied Physics* **104** (2008) 073515/1–6.

Title:

In-situ analysis of optical response in semiconductor nanostructures by near-field- and micro-optics in a transmission electron microscope

Name:

Y. Ohno, T. Taishi, and I. Yonenaga

Abstract:

We have developed an apparatus for making an intense localized evanescent field spot on a specimen equipped in a transmission electron microscope. We have applied the apparatus for evaluating an optical response of dislocations in ZnO crystals. In-situ TEM under light illumination and optical spectroscopy revealed that, screw dislocations and edge ones form the deep level with the depth of 0.9–1.0 eV and that of 1.2–1.4 eV, respectively, and they act as non-radiative recombination centers. On the other hand, mixed dislocations including 60 degrees dislocations form the shallow levels of 0.05 and 0.3 eV in depth, and they act as radiative recombination centers.