

X線回折法による半導体ナノワイヤーの評価

川村朋晃 NTT 物性科学基礎研究所 〒243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1
 S. Bhunia NTT 物性科学基礎研究所 〒243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1
 藤川誠司 兵庫県立大学 〒678-1297 兵庫県赤穂郡町光都 3-2-1
 渡辺義夫 NTT 物性科学基礎研究所 〒243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1

要旨 近年ナノワイヤーやナノ結晶など多くの半導体ナノ材料が作製されているが、TEM/SEM等を用いた局所構造解析に比べX線回折による構造評価例は少なく、マクロスコピックな光学的・電気的特性とナノ構造を詳細に対応付けた例は多くない。その理由の一つとしてナノ材料ではそのサイズ領域から形状・サイズ分布などの外形効果の影響を本質的に避けることができず、解析が複雑になることがある。ここではInP基板上にエピタキシャル成長した垂直配向ナノワイヤーのBragg反射プロファイルを詳細に解析することにより、ワイヤー内の歪み、サイズおよび分布などの種々の構造情報が得られることを示すとともに、X線回折による構造情報がSEMによる局所構造情報および光学測定結果とどのように対応しているかを示す。

1. はじめに

近年ナノテクノロジーの進展に伴い種々のナノ構造材料の研究が進められており、一次元半導体ナノワイヤーもその一つとして注目されている。半導体一次元ナノワイヤー構造には微細加工技術を用いたSi細線や選択成長を利用した化合物半導体の量子細線などが知られており、単電子トランジスターや量子レーザーへの応用が進められている。しかしこれらはいずれもトップダウン方式で作製されているため、室温動作するデバイスに必要な数nmレベルのナノワイヤーを作製することは容易ではない。最近原子・分子レベルでの自己組織化現象を利用したナノワイヤーが注目されており、半導体以外に酸化物材料等のナノワイヤーも作製されている。これらの新しいナノワイヤーは(1)触媒粒子を用いたVLS (Vapor-Liquid-Solid) 成長機構を用いて作製されるため数nmレベルのワイヤーを実現する

ことができる、(2)エピタキシャル成長が必須ではないため材料としての自由度が大きい、(3)格子マッチングを考慮しなくても良いため歪みフリーの結晶作製が可能である、(4)触媒粒子のサイズを制御することによりナノワイヤーのサイズ制御が可能である、(5)溶液中に分散させることによりナノワイヤー単体での利用も可能であるなどの特長を持っている。また量子デバイス应用のみならず、光応用、バイオ・医療のための基本ナノ構造体 (Building block)¹⁾ (Fig. 1) としても注目されている。

VLS成長による半導体ナノワイヤーはWagnerが1964年にSiH₄ガスを用いたSiのナノワイヤー作製に初めて成功²⁾して以来、IV族³⁻⁹⁾、III-V族^{1,10-16)}、II-VI族¹⁷⁾や酸化物半導体¹⁸⁾等種々の半導体材料を用いたナノワイヤーの作製が試みられてきた。VLS成長では触媒粒子に対する原料ガスの取り込み確率が大きいことを利用しており、金属のひげ結晶の成長メカニズムとしても知られてい

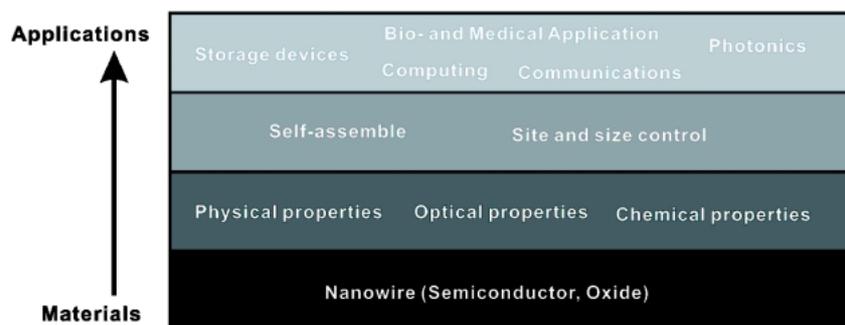


Fig. 1 Schematic hierarchy of nanowire applications.

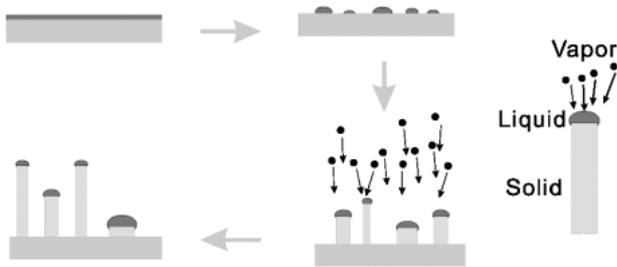


Fig. 2 Schematics of vapor-liquid-solid mechanism.

る¹⁹⁾。Fig. 2にVLS成長機構の概略を示す。最初に基板に触媒用金属薄膜または金属微粒子を蒸着後、基板を加熱すると触媒粒子が液滴化する。次に成長用原料ガスを供給すると液滴化した微粒子は原料ガスを取り込むことにより、半導体との合金を形成する。引き続き原料ガスの供給を継続すると液滴合金は過飽和状態となり、やがて半導体結晶の析出・成長が開始される。このとき析出は基板との界面で起きやすいため半導体ナノワイヤーの成長方向は基板に垂直となることが多い。またナノワイヤー成長中は原料ガスの供給と成長が均衡しており、触媒粒子がある限りワイヤーの成長が継続する。

初期のナノワイヤーは直径が数百nm-数ミクロンと比較的大きく完全なワイヤー形状でないものも多かったが、最近触媒粒子のサイズを精密に制御することにより数nm程度の細いナノワイヤーの作製が可能となっている³⁾。またナノワイヤーの構造も長軸方向に超格子構造を持つヘテロナノワイヤー²⁰⁻²³⁾、コア-シェル構造ナノワイヤー⁹⁾など種々の構造を持つワイヤーが作製されている。さらにナノワイヤーを用いたデバイスへの応用も進められており、Siナノワイヤーを用いたFET^{24,25)}や単電子トランジスタ²⁶⁾、共鳴トンネルダイオード²¹⁾、クロスバースイッチアレイ²⁷⁾への応用も提案されている。

しかしながら半導体ナノワイヤーを用いた素子・システムを実現するためには克服すべき課題が多く残されており、その一つとしてナノワイヤーサイズの精密制御技術の確立がある。ナノワイヤーのサイズ制御の問題は触媒粒子の大きさをどのように制御するかという点に帰着することが多いため、パターンニング¹¹⁾、化学合成¹⁾やエアロゾル²¹⁾などの方法による触媒粒子サイズ制御の試みが行われてきた。またナノワイヤーのサイズ評価はPL発光特性やTEM, SEMによって行われることが多く、サイズの分布についてはSEMイメージ解析による評価も試みられている²⁸⁾。ここでPL測定によるサイズ評価の問題点としてSEM/TEM解析の結果とどう一貫性を保つかということがある。すなわちPL測定では測定領域が数ミクロン-数mm程度と比較的大きいのに対しSEM/TEMではミクロン以下と小さいため両者を直接比較する場合の妥当性が保証されていない。これに対してX線回折法では測定範囲

がPL測定と同等であり、直接ナノワイヤーの構造情報と光学特性を比較することが可能となる。また将来のデバイス応用を考えた場合、基板全体におけるナノ材料の構造把握・マッピング等も重要となるが、これらの構造情報もX線回折により求めることが可能となる。

X線回折法によってナノ構造を解析する場合、ナノ構造の外形効果をきちんと考慮する必要がある²⁹⁾点が通常の薄膜・粉末のX線回折と異なっている。またナノ構造からの信号は通常基板と比較して非常に弱いため全反射領域での測定も試みられているが、この場合はX線の全反射による強度の変調を考慮する必要が生じることもある³⁰⁻³²⁾。これらについてはヨーロッパでさかんに研究されており、Si基板上に成長したSiGeナノワイヤーやナノドットの歪みの解析^{30,33)}、InAs量子ドット内の形状・歪み解析を斜入射X線回折で行った例³⁴⁾等エキタキシャル成長で作製したナノ構造の解析に多く用いられている²⁹⁾。一方VLS成長により作製したナノワイヤーではナノワイヤー構造の同定に用いられた例はあるが^{35,36)}、ナノワイヤー自体をX線回折により詳細に解析した例はない。そこで本稿では基板上に形成した垂直配向InPナノワイヤーの構造を斜入射X線回折により解析した結果³⁷⁾について述べるとともに他の手法(PLおよびSEM/TEM)による解析結果との比較についても述べる。

2. InP ナノワイヤーの作製および特性評価

InPナノワイヤーの作製はSPRING8 BL24XUビームラインに設置したMOCVD装置^{38,39)}を用いて行った。基板にはFeドープInP(111)B、触媒として直径20nmの金コロイド粒子を用い、原料ガスとしてTBP(tertiarybutyl phosphine)およびTMI(trimethylindium)を使用し二段階成長法でナノワイヤーを作製した。なお具体的な成長条件についてはRef.^{40,41)}にその詳細が記述されている。

Fig. 3(a), (b)に作製したInPナノワイヤーのSEM観察イメージを示す。高密度のInPナノワイヤーがほぼ均一に成長しており、またナノワイヤーの先端には触媒粒子が存在していることから、InPナノワイヤーはVLS機構により成長していることを示している。またFig. 3(c)に垂直方向から観察したSEMイメージとこれより求めたナノワイヤーのサイズ分布を示す。なおここではナノワイヤーと触媒粒子のサイズが同じであると仮定しており、実際のサイズは若干小さい可能性がある。粒子径から求めた平均サイズは半径12nmとなり成長に用いた触媒粒子のサイズ(直径20nm)と定性的に一致している。またナノワイヤーのTEM観察像およびEDXによるナノワイヤーの元素分析の結果をFig. 4に示す。ナノワイヤー先端部の触媒粒子とナノワイヤーとの間に明瞭な界面が観察され、ナノワイヤーの成長がほぼ均一に起きていることを示している。また元素分析よりワイヤー先端の触媒粒子中にはAu, Inお

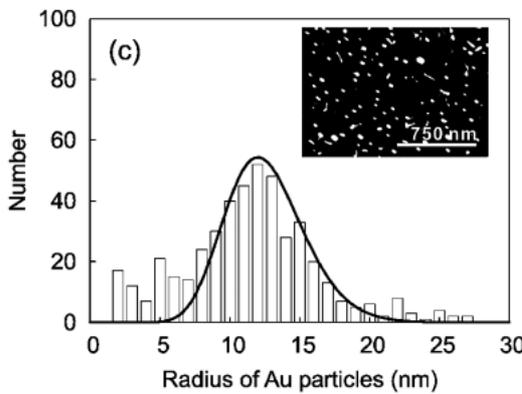
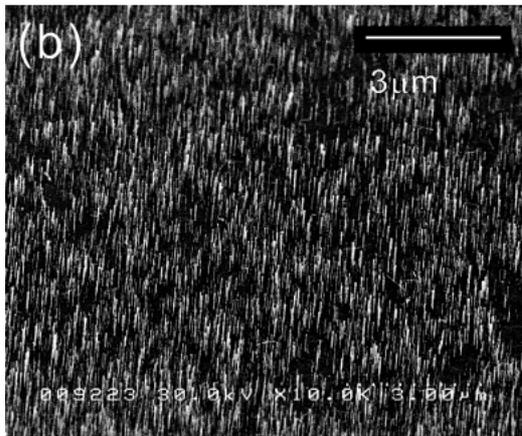
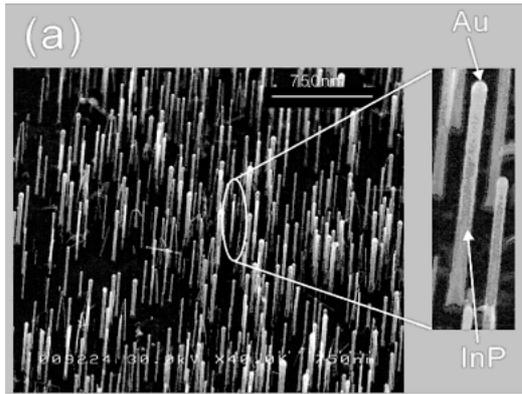


Fig. 3 Scanning electron microscopic images of InP nanowires. (a) Low and (b) high magnification images of nanowires. The images were taken at a tilt angle of 40°. (c) Size distribution of nanowires, estimated from SEM images viewed from the top, shown as inset.

よびが存在するのにに対してナノワイヤー部分には In およびしか存在しておらずナノワイヤー成長時には良好な相分離が生じていることを示している。

Fig. 5 に Ar レーザーを用いて室温で測定した InP ナノワイヤーの PL スペクトルを示す。ナノワイヤーの発光ピークが高エネルギー側に 32 meV だけシフトしており、量子閉じ込め効果が発現していることを示している。ナノワイヤーの発光ピークの半値は 70 meV であり、基板から

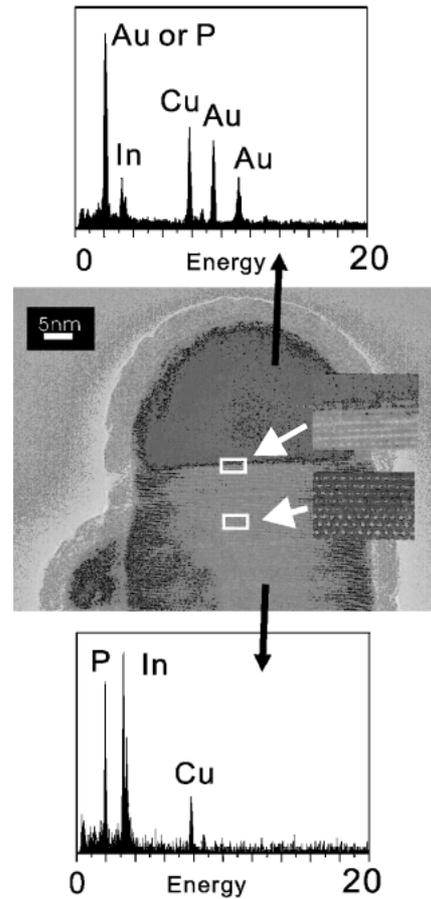


Fig. 4 Transmission electron micrograph of a single InP nanowire with energy dispersive x-ray spectra. A top part of nanowires contains both gold and InP while bottom one has only InP composition.

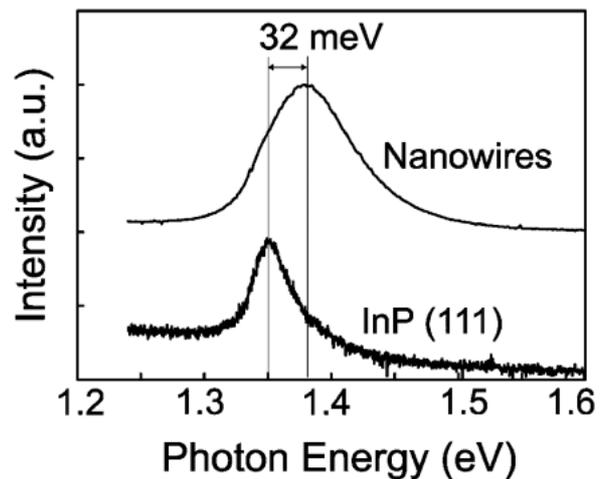


Fig. 5 Photoluminescence spectra of the InP nanowires and the reference sample at room temperature.

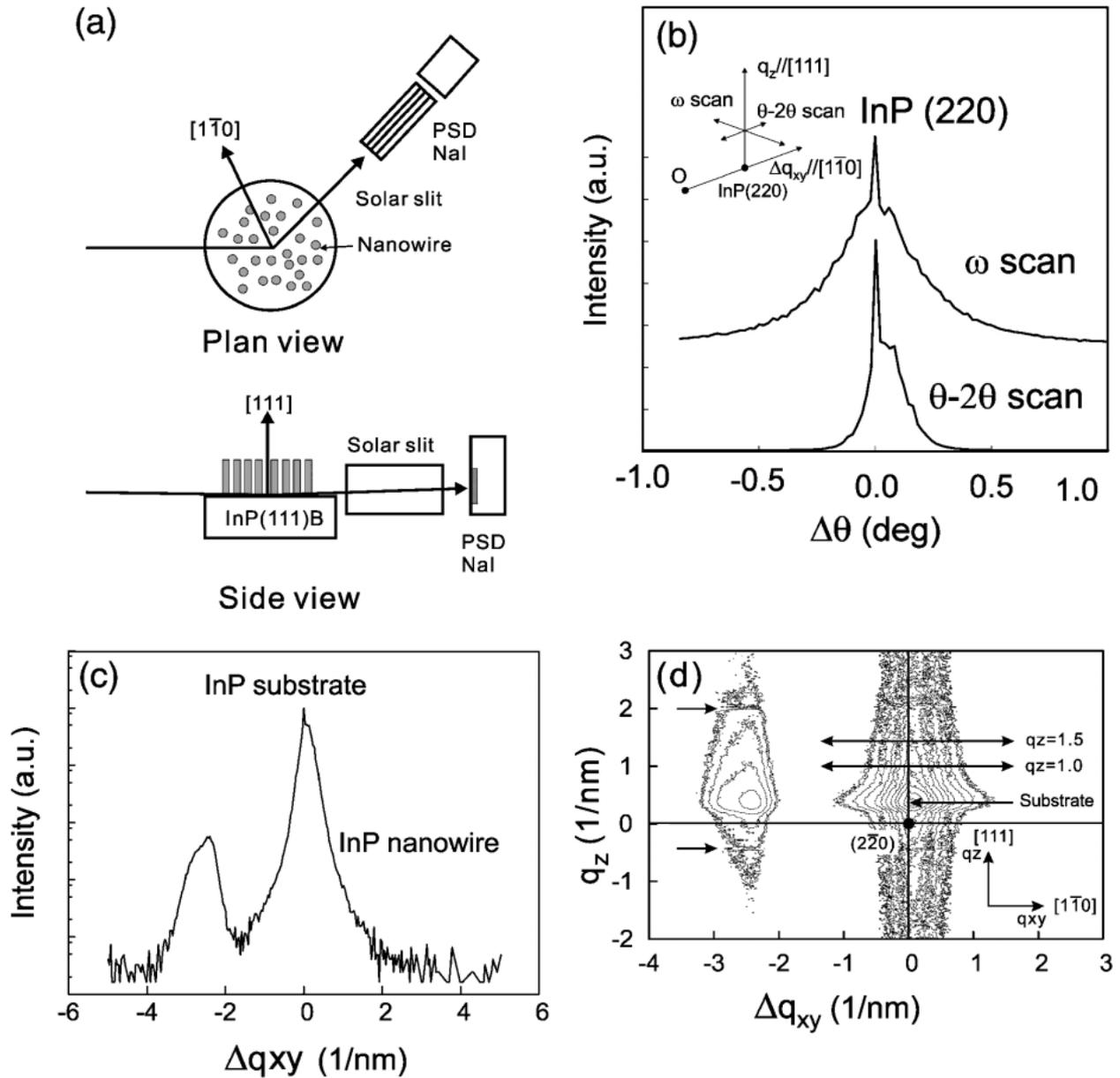


Fig. 6 (a) An experimental layout and (b)–(d) x-ray scattering profiles of InP nanowires. (b) Bragg profiles of $(2\bar{2}0)$ for the ω and θ -2 θ scan. Inset shows the scan direction in reciprocal space for each measurement. (c) Wide range profile of $(2\bar{2}0)$. A peak at the left of InP $(2\bar{2}0)$ suggests the formation of catalytic crystal. (d) Intensity distribution at InP $(2\bar{2}0)$. The observed Bragg position shifted to $q_z > 0$ region due to the total reflection effect.

のピーク（半値幅33 meV）と比べると大きい。これはナノワイヤーのサイズのばらつきに対応すると考えられる。またピークエネルギーのシフト量から推定したナノワイヤーのサイズは半径約9 nmとなり、SEM観察結果の値よりも若干小さい。

3. X線回折による評価

3.1 測定および結果

X線回折測定はSPring8 BL24XUビームラインに設置したZ軸型X線回折計³⁸⁾を用いて行った。Fig. 6(a)に測

定配置を示す。基板表面に垂直な面である $(2\bar{2}0)$ を測定面として選び、基板からの散乱の寄与を減らすため全反射条件近傍（入射角約 0.2° ）で測定を行った。波長として0.124 nmを用いるとともにバックグラウンドを下げるため検出器の前に水平方向の発散角が 0.2° であるソーラースリットを設置した。また検出器としてNaIおよび一次元比例計数管(PSPC)を用い、in-planeおよびout-of-plane方向のX線散乱強度を測定した。なお測定に用いたInPナノワイヤー試料は一度大気に取り出しSEM観察およびPL測定を行った後X線測定を行っており、ナノワイヤーの表面が多少酸化していた。

Fig. 6(b), (c)に ω -scan, $\theta/2\theta$ -scan で測定した Bragg 反射プロファイル, (d)に PSPC で測定した面内および表面垂直方向の散乱強度分布を示す。 ω -scan および $\theta/2\theta$ -scan で測定した散乱プロファイルは明らかに異なっており, ナノワイヤーの方位が成長方向でばらついているのに対しワイヤー自体は単結晶であることを示している。 ω -scan の半値幅から求めた[111]方向のナノワイヤーの角度分散は約0.4°程度であり, SEM イメージから判断するとこの分散はナノワイヤーの弾性変形によるものが大きいと思われる。また θ - 2θ -scan においてナノワイヤーのピークが基板に対して約0.07°高角側にシフトしており, ナノワイヤーが直径方向に約0.4%圧縮されていることを示している。さらに Fig. 6(c) から判るように InP ($2\bar{2}0$) 反射の低角側に他の反射によるピークが観察されているが, このピークは成長前には測定されないことからナノワイヤー成長に起因する Bragg 反射と考えられる。このピークの起源については明確ではないが, 格子定数から推定すると触媒粒子である Au と InP の合金ではないかと思われる。

Fig. 6(d)に PSPC により測定した ($2\bar{2}0$) 近傍での面内および鉛直方向の散乱強度分布を示す。ここで $\Delta q_{xy} (\equiv q_{xy} - q_{xy}^{(2\bar{2}0)})$ は InP ($2\bar{2}0$) 反射を原点としたときの面内方向の散乱ベクトル, q_z は基板鉛直方向の散乱ベクトルを示す。なお基板の Bragg 反射が $q_z \neq 0$ で生じているが, これは全反射領域で測定していることによるものである。さらに基板からの CTR 散乱が $q_z < 0$ 方向にも伸びているが, これは基板端面からの散乱の寄与が含まれているためと思われる。基板の Bragg 反射近傍にナノワイヤーによる散乱が存在しており q_z が増加するとともに散乱強度が減少していることから, ナノワイヤーは基板に対してエピタキシャルに成長していることを示している。また低角側 ($\Delta q_{xy} = -2.5 \text{ nm}^{-1}$) に観測された触媒粒子に起因すると思われるピークもナノワイヤーと同様の強度分布を示していることから, 成長後の触媒粒子もほぼ単結晶の合金相となっていることを示唆している。

3.2 散乱プロファイルの解析

ナノワイヤーはそのサイズが nm オーダーであることから散乱プロファイルの解析にはナノワイヤーの形状・サイズ効果を考慮することが必要である。結晶の形状効果については Laue や Patterson らによって種々の形状因子が求められているが^{42,43)}, 今回測定したナノワイヤーは SEM 観察より円筒タイプであると思われることから本解析では円筒形に対応する形状因子を用いた。またナノワイヤーやナノ粒子のサイズの分布は SEM 観察結果からも判るように分散が大きく, これを正規分布で取り扱うことは誤差が大きくなるため適当ではない。ナノ粒子の分布を記述するための分布関数はいくつか提案されているが⁴⁴⁾, 今回は high-k 材料の空孔解析⁴⁵⁾に用いられた γ -分布関数を用いた。また今回測定したナノワイヤーは円筒形かつ一軸配向で

あるため q_{xy} 方向と q_z 方向を独立に取り扱うことが可能である。以下に q_{xy} 方向での散乱強度と形状およびサイズ分布の関係を示す。

$$G(t(r, R_0), N) = \frac{t^{N-1} e^{-t}}{2^N \Gamma(N)}. \quad (1)$$

$$t(r, R_0) = 2(N-1) \frac{r}{R_0}. \quad (2)$$

$$\sigma_g = \frac{\sqrt{N}}{N-1} R_0. \quad (3)$$

$$I(\Delta q_{xy}, q_z) = I^B(\Delta q_{xy}, q_z) + I^{NW}(\Delta q_{xy}, q_z) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} I^{NW}(\Delta q_{xy}, q_z) &= \text{Const.} |F(q_{xy}, q_z)|^2 \\ &\times \frac{\sin(2\pi q_z H)}{2\pi q_z H} \int_0^\infty |S(\Delta q_{xy})|^2 G(t(r, R_0), N) dr. \end{aligned} \quad (5)$$

ここで R_0, N はそれぞれナノワイヤーの平均サイズおよび分散パラメーター, $S(\Delta q_{xy})$ はナノワイヤーの形状因子である。また解析には基板の Bragg 反射からの散乱を避けるため, $q_z = 1.0$ および 1.5 nm^{-1} で測定したデータを用いた。

ナノワイヤーの平均サイズおよび分散をパラメーターとして最適化を行ったところ, 平均サイズとして半径 5 nm, 分散が 2.5 nm のときにベストフィットが得られた。Fig. 7(a), (b)にそれぞれ $q_z = 1.0$ および 1.5 nm^{-1} における計算値を SEM および PL による計算値と併せて示す。この結果から SEM および PL 測定より求めたサイズパラメーターでは測定プロファイルを再現できておらず, X 線回折によって測定したナノワイヤーのサイズパラメーターが SEM および PL 測定で観測できるものとは異なることを示している。SEM と X 線回折の値が異なる理由であるが, SEM 観察の場合触媒微粒子を測定しており直接ナノワイヤーを観察していないことおよびナノワイヤー上の酸化膜の影響が考えられる。一方 PL 測定については幾つかの要因が考えられ, その一つとしてナノワイヤーの量子効率率がサイズによって異なることや欠陥・再結合などのため発光効率が小さくなることが考えられる。もし発光強度がナノワイヤーの体積に比例すると仮定すると大きなサイズのナノワイヤーからの発光強度が増加し, 発光ピーク波長が見かけ上サイズが大きいほうにシフトする。この仮定により PL 測定より求めたナノワイヤーの平均サイズを計算すると約 6.3 nm となり, X 線解析による値とほぼ同等となる。X 線回折の値が PL 測定によるものより依然として小さい原因であるが, 細いナノワイヤーでは表面積の占める割合が大きいことから表面再結合等により細いワイヤーでは発光効率が小さくなることが考えられる。これに対して X 線回折法ではナノワイヤーの結晶部分からの散乱がすべて Bragg 反射に寄与するためより真に近い構造情報を求めることが可能となる。

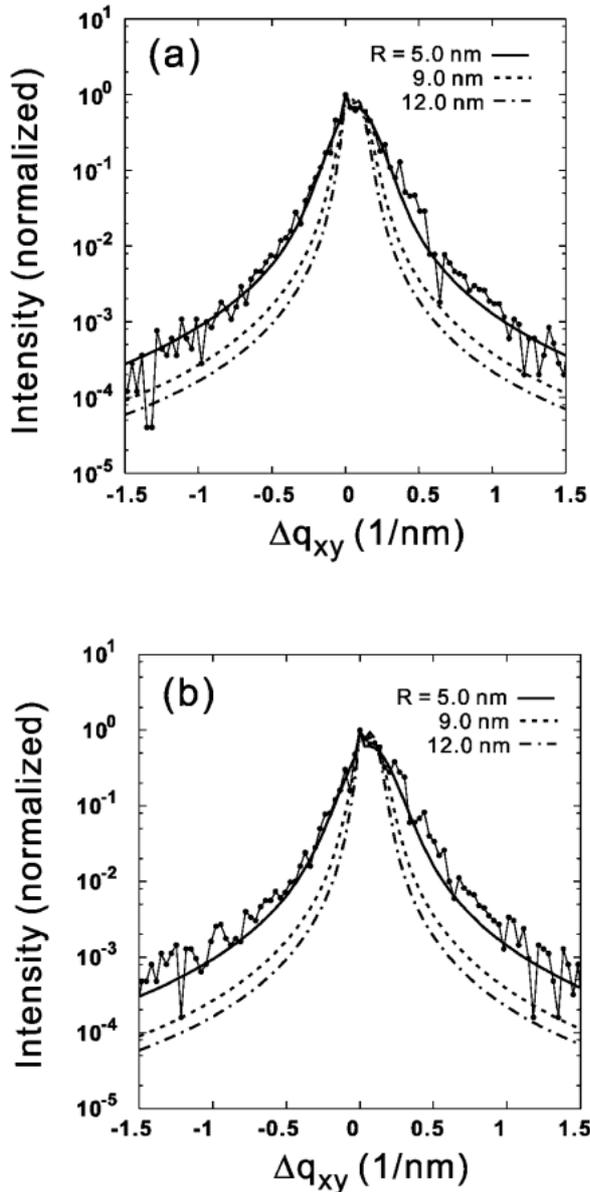


Fig. 7 Measured and calculated profiles at (a) $q_z = 1.0$ and (b) 1.5 nm^{-1} . Profiles using size and its dispersion determined from SEM and PL shows smaller peak width, suggesting low sensitivity for smaller nanowires.

4. おわりに

X線回折法はナノ構造材料の詳細な構造情報を得ることのできる有力な手法であるにも関わらず、X線回折法をナノ構造の評価に用いた例は少ない。その一因としてナノ構造の解析の場合薄膜等とは異なり測定対象の外形・形状効果の影響が大きいこと、解析が複雑になる点が挙げられる。通常の薄膜・粉末材料では試料の形状効果が無視できるような測定配置を選択することが可能であるのに対し、ナノ構造材料ではそのサイズが nm 領域にあることから外形効果は無視することは本質的に困難である。また外

形・サイズの分布に関してもナノ構造材料では正規分布で取り扱えないことが多く、解析には分布関数を慎重に吟味する必要がある。本稿では基板上に自立した InP ナノワイヤーを斜入射 X線回折法により解析することにより、X線回折法によるどのような構造情報が得られるかを示すと共にナノ構造材料における外形効果の取り扱い方の一例を示した。また SEM や PL 測定と X線回折法を比較することにより従来法に対する X線回折法の利点・問題点を示した。なお今回はあまり触れていないがナノ構造材料における形状歪みや加工歪みを定量的に評価することもデバイス応用を考えると今後非常に重要となってくる。また今回はナノワイヤーの平均構造を解析したが、将来はナノビームを用いて一本のナノワイヤーの構造を解析することも重要となってくると思われる。

謝辞

本研究を BL24XU ビームラインで行うにあたり種々のサポートを頂いた兵庫県立先端科学技術支援センターの千川純一先生および松井純爾先生、および兵庫県立大学の籠島靖先生、津坂佳幸先生に感謝いたします。また SPring8 で本装置を使って実験するにあたって安全面で世話頂いた多田順一郎安全室室長を初めとする安全管理室の皆さん、BL24XU ビームライン利用にあたって世話頂いたひょうご科学技術協会岩崎英雄審議役を初めとするスタッフの皆さんに感謝いたします。さらにビーム調整、装置保守などで世話になった兵庫県立大学大学院物質理学研究科 X線光学講座の皆さんに感謝致します。

参考文献

- 1) X. F. Duan, Y. Huang, Y. Cui, J. F. Wang and C. M. Lieber: *Nature* **409**, 66 (2001).
- 2) R. S. Wagner and W. C. Ellis: *Appl. Phys. Lett.* **4**, 89 (1964).
- 3) A. M. Morales and C. M. Lieber: *Science* **279**, 208 (1998).
- 4) H. Kohno and S. Takeda: *Appl. Phys. Lett.* **73**, 3144 (1998).
- 5) J. Westwater, D. Gosain, S. Tomiya and S. Usui: *J. Vac. Sci. Technol.* **B15**, 554 (1997).
- 6) J. D. Holmes, K. Johnston, R. C. Doty and B. A. Korgel: *Science* **287**, 1471 (2000).
- 7) Y. F. Zhang, D. Yu, Y. Ding, Z. G. Bai, Q. L. Hang and S. Q. Feng: *Appl. Phys. Lett.* **75**, 1842 (1998).
- 8) S. T. Lee, N. Wang and C. S. Lee: *Mater. Sci. Eng.* **A286**, 16 (2000).
- 9) L. J. Lauhon, M. S. Gudiksen, D. Wang and C. M. Lieber: *Nature* **420**, 57 (2002).
- 10) K. Hiruma, T. Katsuyama, K. Ogawa, G. P. Morgan, M. Koguchi and H. Kakibayashi: *Appl. Phys. Lett.* **59**, 431 (1991).
- 11) K. Hiruma, M. Yazawa, T. Katsuyama, K. Ogawa, K. Haraguchi, M. Koguchi and H. Kakibayashi: *J. Appl. Phys.* **77**, 447 (1995).
- 12) M. Yazawa, M. Koguchi, A. Muto, M. Ozawa and K. Hiruma: *Appl. Phys. Lett.* **61**, 2051 (1992).
- 13) X. Duan, Y. Huang, Y. Cui, J. Wang and C. M. Lieber: *Nature* **409**, 66 (2001).

- ture **409**, 66 (2001).
- 14) B. J. Ohlsson, M. T. Björk, M. H. Magnusson, K. Deppert and L. Samuelson: Appl. Phys. Lett. **79**, 3335 (2001).
 - 15) M. T. Björk, B. J. Ohlsson, T. Sass, A. I. Persson, C. Thelander, M. H. Magnusson, K. Deppert, L. R. Wallenberg and L. Samuelson: Appl. Phys. Lett. **80**, 1058 (2002).
 - 16) S. Bhunia, T. Kawamura, Y. Watanabe, S. Fujikawa and K. Tokushima: Appl. Phys. Lett. **83**, 3371 (2003).
 - 17) X. Duan, Y. Huang, R. Agarwal and C. M. Lieber: Nature **421**, 241 (2003).
 - 18) M. Kawakami, A. B. Hartanto, Y. Nakata and T. Okada: Jpn. J. Appl. Phys. Part2 **42**, L33 (2003).
 - 19) S. M. Arnold: Am. Electroplaters Soc. **42**, 26 (1956).
 - 20) K. Hiruma, H. Murakoshi, M. Yazawa and T. Katsuyama: J. Cryst. Growth **163**, 226 (1996).
 - 21) M. T. Björk, B. J. Ohlsson, C. Thelander, A. I. Persson, K. Deppert, L. R. Wallenberg and L. Samuelson: Appl. Phys. Lett. **81** 4458 (2002).
 - 22) M. T. Björk, B. J. Ohlsson, T. Sass, A. I. Persson, C. Thelander, M. H. Magnusson, K. Deppert, L. R. Wallenberg and L. Samuelson: Nano Lett. **2**, 87 (2002).
 - 23) Y. Wu, R. Fan and P. Yang: Nano Lett. **2**, 83 (2002).
 - 24) Y. Cui and C. M. Liber: Science **291**, 851 (2001).
 - 25) Y. Cui, Z. Zhong, D. Wang, W. U. Wang and C. M. Liber: Nano Lett. **3**, 149 (2003).
 - 26) C. Thelander, T. Martensson, M. T. Björk, B. J. Ohlsson, M. W. Larsson, L. R. Wallenberg and L. Samuelson: Appl. Phys. Lett. **83**, 2052 (2003).
 - 27) Z. Zhong, D. Wang, Y. Cui, M. W. Bockrath and C. M. Liber: Science **302**, 1377 (2003).
 - 28) Y. Cui, L. J. Laihon, M. S. Gudiksen, J. Wang and C. M. Lieber: Appl. Phys. Lett. **78**, 2214 (2001).
 - 29) V. Holý, U. Pietsch and T. Baumbach: "High Resolution X-ray Scattering from Thin Films and Multilayers", Springer Tracts in Modern Physics, Vol. 149 (Springer Verlag, Berlin, 1999).
 - 30) V. Holý, A. A. Darhuber, J. Stangl, S. Zerlauth, F. Schäffler, G. Bauer, N. Darowski, D. Lübbert, U. Pietsch and I. Vávra: Phys. Rev. B **58**, 7934 (1998).
 - 31) S. A. Stepanov and R. Koehler: J. Phys. D: Applied Physics **27**, 1923 (1994).
 - 32) S. A. Stepanov, U. Pietsch and G. T. Baumbach: Z. Physik B **96**, 341 (1995).
 - 33) T. Roch, V. Holý, A. Hesse, J. Stangl, T. Fromherz, G. Bauer, T. H. Metzger and S. Ferrer: Phys. Rev. B **65**, 245324 (2002).
 - 34) I. Kegel, T. H. Metzger, P. Fratzl, J. Peisl, A. Lorke, J. M. Garcia and P. M. Petroff: Europhys. Lett. **45**, 222 (1999).
 - 35) M. H. Huang, Y. Wu, H. Feick, N. Tran, E. Weber and P. Yang: Adv. Mater. **13**, 113 (2001).
 - 36) W. I. Park, D. H. Kim, S.-W. Jung and Gyu-Chui Yui: Appl. Phys. Lett. **80**, 4232 (2002).
 - 37) T. Kawamura, S. Bhunia, Y. Watanabe, S. Fujikawa, J. Matsui, Y. Kagoshima and Y. Tsusaka: J. Appl. Phys. **97**, 084318 (2005).
 - 38) T. Kawamura, Y. Watanabe, Y. Utsumi, K. Uwai, J. Matsui, Y. Kagoshima, Y. Tsusaka and S. Fujikawa: Appl. Phys. Lett. **77**, 996 (2000).
 - 39) T. Kawamura, Y. Watanabe, S. Fujikawa, K. Uchida, J. Matsui, Y. Kagoshima and Y. Tsusaka: J. Cryst. Growth **237-239**, 398 (2002).
 - 40) S. Bhunia, T. Kawamura, S. Fujikawa and Y. Watanabe: Physica E **24**, 138 (2004).
 - 41) S. Bhunia, T. Kawamura, S. Fujikawa, K. Tokushima and Y. Watanabe: Physica E **21**, 583 (2004).
 - 42) M. von Laue: Ann. Phys. **26**, 55 (1936).
 - 43) A. L. Patterson: Phys. Rev. **56**, 972 (1936).
 - 44) M. Zinke-Allmang, L. C. Feldman and M. H. Grrabow: Surf. Sci. Rep. **16**, 377 (1992).
 - 45) K. Omote, Y. Ito and S. Kawamura: Appl. Phys. Lett. **82**, 544 (2003).

● 著者紹介 ●



川村朋晃

NTT 物性科学基礎研究所機能物質科学研究部・主任研究員

E-mail: kawamura@will.brl.ntt.co.jp

専門：X線回折，散乱による半導体材料の構造評価

【略歴】

名古屋大学大学院工学研究科結晶材料工学専攻修士課程修了，工学博士。日本電信電話公社（現 NTT）武蔵野研究所を経て現職に至る。現在は X 線による半導体材料の構造評価，成長過程の実時間観察に従事。



藤川誠司

兵庫県立大学物質科学専攻博士後期課程在学中

E-mail: fujikawa@sci.himeji-tech.ac.jp

専門：X線回折による表面構造評価

【略歴】

2002年姫路工業大学大学院理学研究科博士前期課程修了。兵庫県立大学大学院理学研究科物質科学専攻博士後期課程在学中。現在，InP 系化合物半導体表面構造・成長メカニズムの研究に従事。



Satyaban Bhunia

Saha Institute of Nuclear Physics • Research Scientist

E-mail: stbn@phy.iitb.ac.in

専門：化合物半導体結晶成長

【略歴】

インド工科大学博士課程修了，理学博士。電気通信大学博士研究員，NTT 物性科学基礎研究所博士研究員を経て現職に至る。現在は INDUS-II, India において表面構造解析用ビームラインの建設に従事。



渡辺義夫

NTT アドバンステクノロジー材料分析センター所長

E-mail: yoshio.watanabe@ntt-at.co.jp

専門：化合物半導体結晶成長，ナノ構造の物性計測評価

【略歴】

早稲田大学大学院理工学研究科物理学および応用物理学専攻修士課程修了，工学博士。日本電信電話公社（現 NTT）武蔵野研究所，NTT 物性科学基礎研究所を経て現在に至る。

X-ray diffraction analysis of semiconductor nanowires

Tomoaki KAWAMURA NTT Basic Research Laboratories,
3-1, Morinosato Wakamiya Atugi-shi, Kanagawa 243-0198, JAPAN

Satyaban BHUNIA NTT Basic Research Laboratories,
3-1, Morinosato Wakamiya Atugi-shi, Kanagawa 243-0198, JAPAN

Seiji FUJIKAWA University of Hyogo, 3-2-1, Kouto Kamigori Ako, Hyogo 678-1297, JAPAN

Yoshio WATANABE NTT Basic Research Laboratories,
3-1, Morinosato Wakamiya Atugi-shi, Kanagawa 243-0198, JAPAN

Abstract Indium phosphide (InP) nanowires epitaxially grown on InP (111) B were investigated by using grazing incidence x-ray diffraction. A broad scattering at the tail of InP (220) diffraction and an additional peak at the low angle side were observed, showing the formation of nanowires and alloys of the gold catalysts and indium. Scattering intensity along the $[1\bar{1}0]$ direction was compared with calculations based on a cylinder model. The best fit was obtained for a 5.5 nm radius with 2.5 nm deviation, which was smaller than the values determined from secondary electron microscopy (SEM) and photoluminescence spectroscopy (PL) measurements. This result is explained by an oxide layer on the nanowire sidewalls and the low quantum efficiency of photoluminescence yields for small nanowires since x-ray diffraction directly detect crystalline structure of nanowires.