

半導体ナノワイヤのバンド端変形ポテンシャルと曲げ歪・表面弾性

ナノテクノロジー

SATテクノロジー・ショーケース2015

■ はじめに

半導体単結晶ナノワイヤ(NW)はバルク結晶に比して機械的に強靱であることが知られており、破断歪が大きい。この為、バンド構造も大きく歪変調でき、歪による電子素子の高速化、発光・受光素子の波長変調、レーザー発振閾値の低減が期待される。バンドギャップ E_g の変調幅は、破断歪 ε_{ij} とバンドギャップ変形ポテンシャル a_{ij} [= $dE_g(\varepsilon_{ij})/d\varepsilon_{ij}$; $i, j = x, y, z$]の積で決まる。酸化亜鉛(ZnO)の場合、静水圧変形では $a_p = dE_g/d\ln(V) = -4$ eVである。しかし、応用上重要な非等方圧変形では、文献値が分散しており、歪応用デバイスの設計が困難である: c 軸方向1軸応力($a_{cc} = -0.37 \sim -4$ eV)、 c 面内2軸応力($a_B = -2 \sim +2$ eV)。本研究では、 c 軸方向1軸応力下でのZnO NWの破断歪 ε_{ccF} と変形ポテンシャル a_{cc} の精密評価を行い、それを基に文献値の分散要因を検討した。

■ 活動内容

1. ナノプローブSEM-CL顕微分光装置の開発

本装置は、低温走査電子顕微鏡カソードルミネッセンス(SEM-CL)顕微分光装置に金属ナノプローブ電極、3軸ナノ駆動機構、微弱電流検出機構を導入したものである。これにより、駆動ナノプローブ電極の3機能(ナノ構造採取・応力印加・探針電極)と、既存の低温SEM-CL顕微分光評価、微弱電流検出を組み合わせた、複合的・多面的なナノ構造評価が可能になった。

2. 選択的ホモエピタキシャル溶液成長法の開発

本手法は、前駆体溶液中でのZnO結晶成長と、フォトレジスト被覆ZnO基板の電子線描画を組み合わせたものである。これにより、 c 軸配向したZnO自立NWをZnO基板上に任意の位置・直径で配列成長できるようになった。

3. ナノワイヤの破断歪 ε_{ccF} と変形ポテンシャル a_{cc} の評価

ZnO自立NW(直径150nm)の曲げ変形サイクルによる名目/塑性変形量をSEMその場観察評価し、バンドギャップをSEM-CL顕微分光法で評価した。曲げ変形による局所弾性歪と局所バンドギャップとの相関を精密評価した。

● c 軸破断歪 ε_{ccF} の評価

NWの曲げ変形の統計評価から、NWがバルク結晶より1桁大きな破断歪($\varepsilon_{ccF} = 0.04$)を有する事が判った。

● 変形ポテンシャル a_{cc} の評価と曲げ依存性の原因

a_{cc} は一般に定数であるが、本評価では曲率 $R^{-1} = 0 \mu\text{m}^{-1}$

の極限(≈ 1 軸引張・圧縮応力)で $a_{cc} = -1.7$ eVであり、曲げ変形による a_{cc} の減衰がみられた。この減衰は、曲げたNWを横切る方向に歪勾配が生じ、励起子が発光再結合するまでにバンドギャップ勾配によりNW側端へドリフトすることで、 a_{cc} が過小評価されていると考えられる。

● 表面弾性の影響の検討

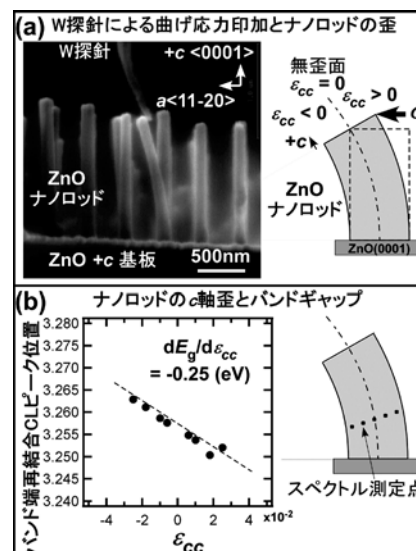
本評価法では、これまでの報告の中で最も表面敏感(~ 5 nm)な測定を実現し、 $a_{cc} = -1.7$ eVを得た。これは、バルク値 -4 eVに比べて著しく小さい。文献値を用いた解析・比較検討の結果、この差異は、表面深さ20nm程度の領域固有のものであり、非等方圧下では表面の結晶格子の歪緩和が生じ、バンドギャップが変化しにくくなると考えられる。

4. まとめ

曲げ変形を与えたZnOナノワイヤの顕微発光分光評価により、バンドギャップの c 軸歪変形ポテンシャル a_{cc} を精密評価し、文献値と比較検討した。①歪勾配下では、励起子ドリフトにより a_{cc} が減衰すること、②非等方圧下では、表面の結晶格子の歪緩和により、表面で a_{cc} が小さくなること、が分かった。表面弾性、及び、歪勾配の電子物性値への波及効果を捉えたものは本報告が始めてであり、微細化が進む歪応用デバイスの設計指針を与える。

■ 関連情報等

本研究は、(独)日本学術振興会・科研費補助金・若手研究(B) No. 23760022、若手研究(B) No. 26790046、及び、「低炭素研究ネットワーク(LC-net)」の援助を受けて行った。



代表発表者 渡辺 健太郎 (わたなべ けんたろう)
 所属 (独)物質・材料研究機構
 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点
 問合せ先 〒305-0044 茨城県つくば市並木1-1
 TEL: 029-851-3354 (ext. 8895)
 WATANABE.Kentaro@nims.go.jp

■キーワード: (1) 半導体ナノワイヤ
 (2) バンドギャップ歪変調
 (3) 歪応用デバイス