

超高真空中におけるナノワイヤのX線定在波法によるその場観察

齋藤 彰^a, 大橋 恒久^a, 高木 広幸^a, 的場 健司^a, 三木 一司^b,
矢代 航^b, 坂田 修身^c, Yi Min Su^c, 高橋 敏男^d

^a大阪大学大学院工学研究科, ^b産業技術総合研究所, ^c高輝度光科学研究センター, ^d東京大学物性研究所

背景

ナノスケールデバイスにおいて、ナノワイヤはもっとも基本的な構成要素である。さらにワイヤの目的には微細配線という以上に、量子効果にもとづく新しい素子への期待がある。事実、低次元系材料の代表として、ナノワイヤは近年の物性科学において基礎研究と工学にまたがる中心的なトピックスである。

しかしながらナノスケールの低次元系は、「作る」以前にそもそも正確に「見る」こと自体がきわめて困難である。それゆえ物性の正確な予測や評価がむずかしいうえ、形成原理や初期過程がわからないため容易には制御できない。したがって、決め手となる簡便な構造やその作成法はいまだ確立していない。まして量産化技術は遠い道のりである。

そこで本研究では、Si (001) 面内のBiナノワイヤについて、内部構造の精密解析を目的とする。このBiワイヤは半導体デバイスにおける実用界面Si (001) に形成される[1]。さらに重要なのは、この細線が弱い吸着系でなく基板に強く結合しているらしい点である。このため埋めこんでもワイヤが保存されうる、という応用に適した特徴がある。

こうした「自己組織化」に基づく「1次元系」「ナノ構造」は、ナノテクノロジーで要素技術として重要な役割をになう。それを超高真空中で作成しつつ、その場観察するというアプローチは、低次元材料に特有のきわめて困難な構造解析に対して一般性の高い解法になりうる。そしてX線定在波法は「格子に依存した、規則配列をもつ、希薄な」系には特異な力を発揮する手法であり、他の手法で得がたい知見を得られる意義がある。しかも構造が埋もれた場合にも適用でき、構造を比較できる強みがある。

ワイヤの正確な構造を知ることで、発展著しい

理論計算からの解析とあわせ、その電気特性や構造保護のための原理的な理解が得られることが期待される。特に超高真空中でその場観察ができることは、形成メカニズムの解明に大きな利点となる。その結果、単に1種類のワイヤだけでなく、異なる元素の新たな構造の予測や制御、開発にも役立つと期待される。

これまでの関連する結果

上記のBi原子細線について申請者はまず超高真空中でなく、アモルファスSiで保護された試料について、測定しやすい大気中でX線定在波測定を行った(課題番号 2001A0200-ND-np、ステーションBL09XU)。その結果、他の真空中での報告(STM、光電子回折)と異なる結果が得られ、新しい構造モデルが提案された[2]。他の報告と異なる理由はまず保護層の影響と考えられるが、それでは完全性の高いBi細線の安定性と矛盾する。実際、STMの結果等にも不十分な点があり、この疑問を決着するに同一の手法を用いてその場観察を行う必要がある。

また申請者らは課題2002A-0600ND1において、精密回折計を備えた新しい超高真空槽をビームラインに設置し、その立ち上げを行ってきた[3]。

実験

まず事前に、オフラインで安定した超高真空を実現し、その後Si (001) 清浄表面の作成を行った。その際、比較的低い温度(～800℃)の試料加熱で済むように(これは真空度と基板結晶性を損なわないためである)、クリーンルーム内でSi基板を処理し、薄い酸化膜を形成した[4]。その基板を超高真空槽に導入して加熱し、Si清浄面を反射型高速電子線回折(RHEED: Reflection High-Energy Electron Diffraction)で

確認した。その後、一定温度で加熱したSi清浄面にKnudsenセルからBiを単原子層程度蒸着することで、Bi細線が形成された。Bi細線の確認はX線定在波測定の前、終了後の両方において、RHEED像によって行った[1]。

その後の光学系のセッティングは、図1にレイアウトを示す。ビームラインのSi(111)二結晶モノクロメータ(図1では省略)から来るビームを図のように、上流(第1ハッチ)でチャンネルカット結晶に導き、試料基板で用いるのと同じ面指数(004)のブラッグ反射を得る(分散除去のため)。次に、その004反射ビームを下流(第3ハッチ)超高真空槽内の試料基板に導き、試料基板のブラッグ反射(004反射)を得る。回折のモニタにはPINフォトダイオードを用いた。その後、そのブラッグ条件付近で試料を高い角度精度(1パルス0.09秒)で角度走査し、同時にBiからの蛍光X線収量の変化をSSDでとらえた。

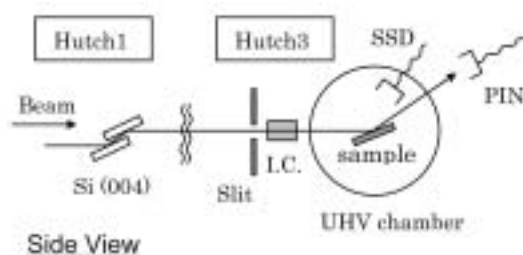


図1 光学系および検出器に関する測定配置。

入射エネルギーはBiのL吸収端励起のために15.8KeVに固定された。また試料の結晶完全性を保証するため、入射X線サイズを絞って照射域(試料上で0.6×0.9mm)を選ぶ必要があった。1次元系を構成するさわめて被覆率の小さいBi原子からのわずかな蛍光X線を、上記の小さなビームサイズで得るにはSPring-8の高輝度光が必須である。なお、Si(001)基板は[110]方向に4°ミスカットのあるものを用いた。これは単一ドメインのBi細線を作ることで、解析が容易にするためである。

結果

図2に入射光強度で規格化された定在波プロフィール(BiのL α 蛍光X線収量の角度変化)と004反射率曲線を示す。反射の半値幅は理論値1.7秒(実際、加熱前の試料ではこの値

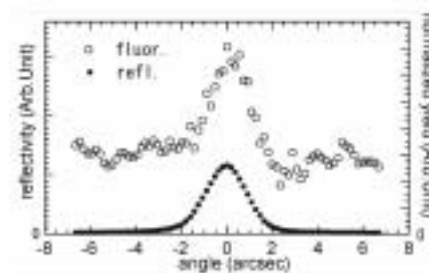


図2 定在波プロフィール(蛍光X線収量の角度変化:○)と反射率曲線(●)

が得られる)よりも若干広がって2.1秒であった。これはBi細線を形成する際、基板の加熱を複数回行う必要があったためである。

定在波プロフィールは図に見られるとおりの大きなコントラストで収量の増減が見られる。詳細な解析はまだ途上であるが、現段階の見積もりでは、Bi原子はこの結果から、全体の約60%に相当する量が同一位相にあり、そのサイトは基板のSi(004)格子面周期から0.38Å真空側に移動している。この値は、これまで測定してきたアモルファスSiでキャップした試料とは異なり、その解釈はこれからの課題である。それには上記の値の誤差範囲を限定し、他の実験手法から得られた結果との整合性を考え、また、ボンド長などの物理量や条件とあわせて構造の変化を考察してゆく必要がある。

謝辞

本実験を行うにあたり、クリーンルーム使用に関して寺岡有殿、吉越章隆 両博士(原研)にお世話になりました。制御・計測用ソフトウェアは依田芳卓博士(JASRI)の作成されたものを用い、また島田恵朋氏(JASRI)に技術サポートを受けました。深く謝意を表します。

参考文献

- [1] K.Miki et al., Surf.Sci. **421**(1999),397.
- [2] A.Saito et al., Jpn.J.Appl.Phys.**42**, 4B (2003) to be published.
- [3] A.Saito et al., SPring-8 User Experiment Report No.9 (2002A) 96.
- [4] K.Miki, K.Sakamoto, and T.Sakamoto: Surf.Sci. **406** (1998) 312.