

## 核共鳴非弾性によるFe量子ワイヤーのフォノン状態密度の研究

瀬戸 誠<sup>a</sup>, 三井 隆也<sup>b</sup>, 北尾 真司<sup>a</sup>, 小林 康浩<sup>a</sup>, 春木 理恵<sup>a</sup>,  
依田 芳卓<sup>c</sup>, 奥野 拓也<sup>d</sup>, 壬生 攻<sup>e</sup>, 新庄 輝也<sup>f</sup>

<sup>a</sup>京都大学・原子炉実験所, <sup>b</sup>日本原子力研究所・関西研究所, <sup>c</sup>高輝度光科学研究センター,  
<sup>d</sup>京都大学・化学研究所, <sup>e</sup>京都大学・低温物質科学研究センター, <sup>f</sup>国際高等研究所

量子ワイヤー・ドット等のナノ物質系においては、量子サイズ効果や表面およびその近傍の占める割合が増加することにより、通常のマクロサイズの物質系とは異なった電氣的・熱的性質が現われることが知られている。例えば熱的性質に関しては、バルク系と比較して、デバイ温度の低下、比熱の増加といった現象が見られる。このように、ナノ物質系においては振動状態等のダイナミクスの変化も生じているものと考えられるが、フォノンによる伝導電子の散乱等をとおして、電気伝導特性にもバルクとは異なった影響を及ぼすものと考えられる。また、ナノ物質系においては、境界においてフォノンが散乱されることにより、フォノンの寿命がバルク系と比較して短くなるといった特異な現象が起こりうる。よって、これらの系のフォノン状態について調べる事は、基礎的観点だけでなく応用上の観点からも意義のあるものと考えられる。

本研究は、放射光核共鳴非弾性散乱法によりFe量子ワイヤーのフォノン状態密度の測定を行うことで、バルクのフォノン状態密度との違いについて調べ、またどのようにバルクのスペクトルから理解できるかを調べる事を目的とするものである。放射光核共鳴非弾性散乱法では、特定元素の共鳴励起過程を用いて測定を行うため<sup>1)</sup>、基板上的量子ワイヤーについての測定を行う場合でも、基板の状態を観測することなく量子ワイヤーを構成しているFe原子についてだけの情報が得られるという特色があるものと考えられる。

実験は、日本原子力研究所のBL11XUで

行った<sup>2)</sup>。高分解能Siモノクロメータを用いて、<sup>57</sup>Feの核共鳴励起エネルギー(14.413 keV)付近で放射光をエネルギー幅3.2 meV (FWHM) に分光し、試料に照射することで、フォノンエネルギースペクトル測定を行った。試料から散乱されてくる核共鳴励起に伴う時間遅れ成分は多素子APD検出器を用いて測定した<sup>3)</sup>。

測定に用いた試料は、Si基板上に生成した2種類の<sup>57</sup>Fe量子ワイヤー (a) [幅30nm、高さ30nm、ワイヤー中心同士の間隔150nm] および (b) [幅125nm、高さ30nm、ワイヤー中心同士の間隔250 nm] である。また、比較のためにバルクの状態である  $\alpha$ -<sup>57</sup>Feフォイルの測定も行った。測定は全て室温で行った。測定されたスペクトルを図1に示す。バルク

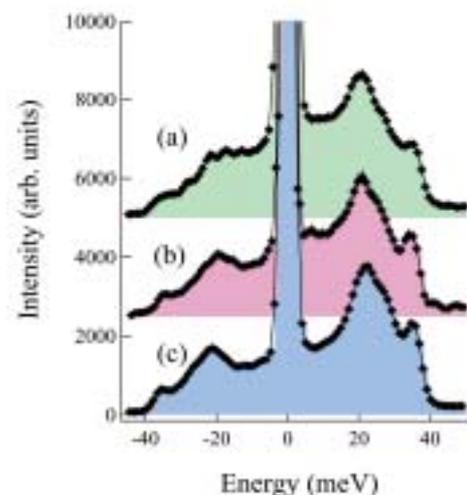


図1 Fe量子ワイヤーおよびFeフォイルの放射光核共鳴非弾性散乱スペクトル。(a) [幅30 nm、高さ30 nm、ワイヤー中心同士の間隔150 nm]、(b)[幅125 nm、高さ30 nm、ワイヤー中心同士の間隔250 nm] (c)  $\alpha$ -<sup>57</sup>Feフォイル。

の $\alpha$ -Feフォイルのスペクトルと比較して、Fe量子ワイヤーのスペクトルでは15 meV以下のフォノン成分が相対的に増加している事が分かる。また、35 meV付近のピーク強度が相対的に減少し幅も広がっている。これらの傾向はワイヤーの幅が狭い (a) のスペクトルで顕著になっていることが分かる。これらのスペクトルから求めたフォノン状態密度を図2に示す。低エネルギーのフォノンが増加する効果はナノサイズのFe粒子のフォノンスペクトルでも観測されている<sup>4)</sup>。これらは表面およびその近傍に存在する原子に起因するものと考えられている<sup>5)</sup>。また、量子ワイヤーのフォノン状態密度では、バルクの

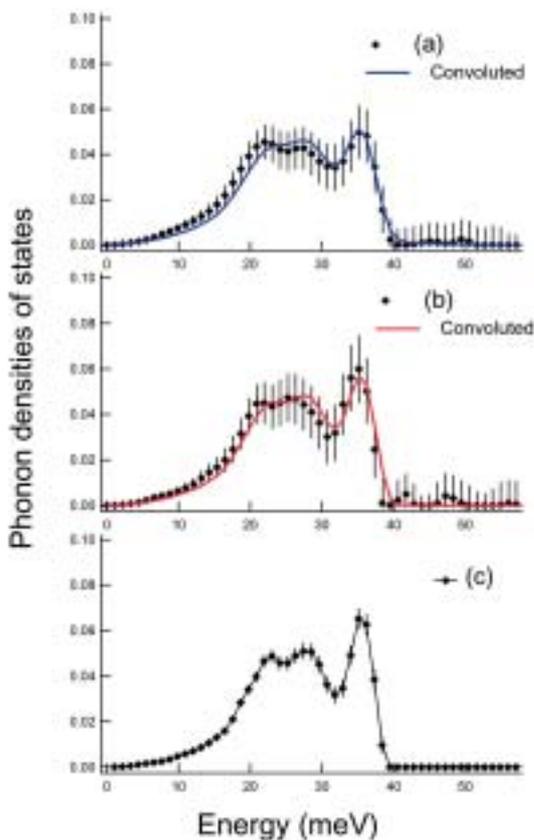


図2 Fe量子ワイヤーおよびFeフォイルのフォノン状態密度。(a)[幅30 nm、高さ30 nm、ワイヤー中心同士の間隔150 nm]、(b) [幅125 nm、高さ30 nm、ワイヤー中心同士の間隔250 nm] (c)  $\alpha$ -<sup>57</sup>Feフォイル。(a)および(b)における実線は、(c)のスペクトルにエネルギー幅を重畳してフィットしたもの。

表1 量子ワイヤー試料におけるフォノンのエネルギー幅 $\Gamma$ および寿命 $\tau$ 。(a)[幅30 nm、高さ30 nm、ワイヤー中心同士の間隔150 nm]、(b) [幅125 nm、高さ30 nm、ワイヤー中心同士の間隔250 nm]。

試料	( a )	( b )
$\Gamma$ (meV)	1.2	0.3
$\tau$ (ps)	1.1	4.4

フォノン状態密度と比較して、低エネルギー成分が増大している事より無反跳分率が若干低くなっており、デバイ温度も低下しているものと考えられる。さらに、量子ワイヤー等のナノ物質系においては、フォノン寿命の短縮が起こっているものと考えられるが、その場合には各フォノンのエネルギー幅が $\delta$ 関数的なものから広がったものになる。ここでは、バルクの $\alpha$ -Feフォイルのスペクトルに(1)式のようなローレンツ型の関数を重畳したものを用い、フォノンのエネルギー広がり幅 $\Gamma$ をパラメータとして、量子ワイヤーのフォノン状態密度のフィッティングを行った<sup>4,6)</sup>。

$$f(E) = \frac{\Gamma/2\pi}{E^2 - \Gamma^2/4} \quad (1)$$

フィッティングにより得られたスペクトルを図2(a),(b)に実線で示す。また、 $\Gamma$ の値と $\tau \approx 2\eta/\Gamma$ という関係から評価された寿命の値 $\tau$ を表1に示す。Fe量子ワイヤーのフォノン状態密度は、全体としてはバルクのFeフォノン状態密度から再現することが出来たが、低エネルギー側ではずれが見られる。これは前述した表面付近の原子に起因する成分を考慮していないためだと推測されるが、定量的な評価が必要であると考えられる。

放射光核共鳴非弾性散乱測定により、量子ワイヤーのフォノン状態密度においてサイズ依存性が確認された。今後は様々な形状の量子ワイヤーの系統的な測定を行うことで、表面近傍の原子からの寄与およびフォノン寿命と形状との定量的な相関、さらにはフォノン状態密度と熱伝導および電気伝導との相関に

ついて研究を行っていくものである。

#### 参考文献

- [1]. M. Seto, Y. Yoda, S. Kikuta, X. W. Zhang, and M. Ando, Phys. Rev. Lett. **74** (1995) 3828.
- [2]. T. Mitsui, S. Kitao, X. W. Zhang, M. Marushita, and M. Seto, Nucl. Instrum. Methods **A467-468** (2001) 1105.
- [3]. S. Kishimoto, Nucl. Instrum. Methods phys. Res. A **309**, (1991) 603.
- [4]. B. Fultz, C. C. Ahn, E. E. Alp, W. Sturhahn, and T. S. Toellner, Phys. Rev. Lett. **79** (1997) 937.
- [5]. Kara and T. S. Rahman, Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 1453.
- [6]. Bonetti, L. Pasquini, E. Sampaolesi, A. Deriu, and G. Cicognani, J. Appl. Phys. **88**, (1997) 4571.