

1C01

超伝導 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 薄膜におけるコヒーレントフォノンの光学的制御

(分子研¹, 総研大², CREST³, 東工大⁴) ○岡野 泰彬¹, 香月 浩之^{1,2},
中川 佳大^{1,2,3}, 高橋 弘史⁴, 中村 一隆^{3,4}, 大森 賢治^{1,2,3}

【研究の背景】これまで我々のグループでは、物質の量子位相をアト秒レベルで操作するための変調器 (APM: Attosecond Phase Modulator) を開発し、主に孤立分子系でのコヒーレント制御研究を行ってきた。コヒーレント制御とは波としての光の位相を物質の量子波へ転写し制御する技術であり、例えば APM により位相をロックしたレーザーパルス対を用いれば、分子中に二つの電子波束または振動波束を励起しそれぞれの波束の干渉を制御することが可能となる。この APM による波束干渉技術により、気相中の孤立ヨウ素分子に対しアト秒かつピコメートルという極めて高い精度をもった時空間コヒーレント制御を実現している[1]。

一方、近年ではコヒーレント制御を気相以外の様々な環境下で実現するため、レーザー冷却された極低温 ^{87}Rb 原子集団や分子間の相互作用が非常に小さい固体パラ水素、さらには半金属バルク固体などの凝縮系における研究を進めている。原子分子レベルの物質が示す顕著なコヒーレンスが系の複雑化や拡大とともにいかにして失われていくか (デコヒーレンス) は未だよく理解されておらず、デコヒーレンスの観測・制御は凝縮系でのコヒーレント制御研究における重要な研究テーマの一つである。これまで行ってきた半金属バルク固体での実験においては、ビスマス試料中に励起したコヒーレントフォノンを操作することにより結晶の格子振動を2次元空間で制御することに成功している。しかし、これらの実験ではコヒーレントフォノンや電子応答は観測されているものの、電子コヒーレンスについては現状では観測されていない。これは凝縮系が激しいデコヒーレンス環境にあるため、電子コヒーレンス寿命に対し観測レーザーのパルス幅が十分でないことが要因として挙げられる。これまでの実験で用いてきたレーザーのパルス幅は約 30 fs であるが、この電子コヒーレンスにアクセスするためにはより短いパルス光源を用いて励起直後の応答をより詳細に調べる必要がある。

このデコヒーレンスの観測・制御を実現するため、我々は現在、sub-10fs の超短パルスレーザーを導入し固体試料を対象としたコヒーレント制御実験系の開発を行っている。本発表では凝縮系におけるコヒーレント制御に向けた第一段階として、超伝導状態における $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) 薄膜上に誘起したコヒーレントフォノンの制御実験を行ったのでこの概要について紹介する。

【 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 高温超伝導体とコヒーレントフォノン制御】

物質固有のフォノンの振動周期よりも十分に短い超短パルスレーザーを照射すると、物質中に位相の揃ったコヒーレントフォノンを誘起することができる。このコヒーレントフォノンは、複数のレーザーパルスにより時間差をつけてコヒーレントフォノンを誘起することで、位相差のついたフォノン間の干渉効果によりフォノン強度を操作できることが知られている[2]。高温超伝導体である YBCO においても、これまでに、非超伝導状態である室温条件下で二つのコヒーレント光学フォノンモード (Ba および Cu モード) の同時制御が実現されている[3]。これらのコヒーレントフォノンモードと超伝導状態の間には、フォノン強度に大きな変化が見られない Cu モードに対し、Ba モードでは転移温度以下でフォノン強度が急激に増加するなどの相関があることが明らかになっている[3,4]。この様に、フォノンと強くカップリングした超伝導状態下においてフォノン制御を実現することができれば、超伝導

状態の制御に対して何らかの知見を与えることが期待される。本研究では、固体のデコヒーレンスの観測・制御へ向けて開発を進めているコヒーレント制御実験系を用い、超伝導状態の YBCO 試料に対するフォノン制御実証実験へと応用した。

【実験および結果】コヒーレントフォノン制御実験は、ポンプ・コントロール・プローブの手法により行った (図 1)。光源には、中心波長~800 nm、パルス幅 6 fs FWHM で 80 MHz で発振する Ti:Sapphire オシレーターを用いた。出力パルス光はビームスプリッターにより 90:10 の強度比で二つに分岐し、10%をプローブ光として利用した。残りのパルスはマイケルソン型の干渉計により同一特性のパルス対を生成し、ポンプ光およびコントロール光としてそれぞれコヒーレントフォノンの誘起および制御に用いた。試料は MgO 基板上に単結晶成長させた厚さ 500 nm の YBCO 薄膜で、転移温度 ($T_c=88.1$ K) 以下に試料を冷却するためにクライオスタット内に配置した。YBCO 試料上に誘起したコヒーレントフォノンはプローブ光の遅延時間 τ_{probe} に対する反射率変化として観測した。その結果、誘起された Ba および Cu モードは、室温 ($T=296$ K) だけでなく転移温度以下 ($T=78$ K および 8 K) においてもポンプ・コントロール光のパルス間隔 τ_{control} が各モードの振動周期の整数倍もしくは半整数倍の時に選択的にそれぞれ強め合い、もしくは打ち消し合うことを観測し、超伝導状態においてもフォノン制御が可能であることを実証した (図 2)。

発表では具体的な計測系や計測結果とともに、超伝導状態におけるフォノンモードの選択励起について紹介する。

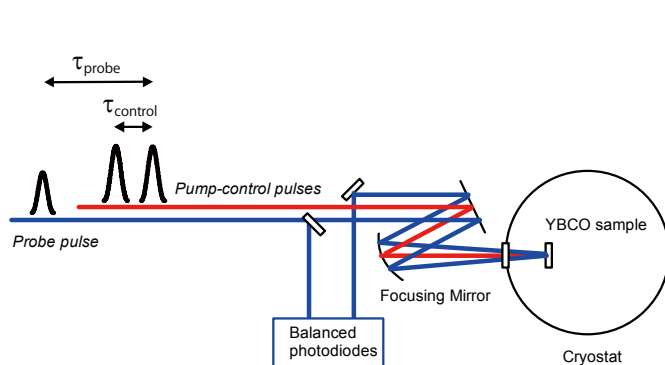


図 1. ポンプ・コントロール・プローブ実験系の概要

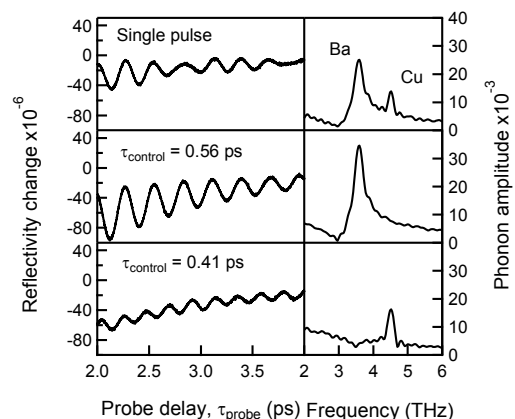


図 2. 超伝導状態 ($T=8$ K) におけるコヒーレントフォノンの選択励起。左側：フォノン信号、右側：フォノンスペクトル。

謝辞

本研究の一部は、分子科学研究所協力研究および応用セラミックス研究所共同利用研究の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] H. Katsuki, and K. Ohmori *et. al.*, Science **311**, 1589 (2006); Phys. Rev. Lett. **102**, 103602 (2009).
- [2] M. Hase *et. al.*, Appl. Phys. Lett. **69**, 2474, (1996).
- [3] H. Takahashi, K. Ohmori and K. G. Nakamura *et. al.*, Solid State Commun. **149**, 1955 (2009).
- [4] W. Albrecht, Th. Kruse and H. Kruz, Phys. Rev. Lett. **69**, 1451 (1992).
- [5] O. V. Misochko, K. Kisoda, K. Sakai, S. Nakashima, Phys. Rev. B **61**, 4305 (2000).