

学位論文題名

クロムとニッケルにおける
ピコ秒音響フォノンパルス励起機構

学位論文内容の要旨

超短光パルスを金属表面に照射させると、金属中に格子と熱平衡状態にない非平衡電子を励起可能であり、近年積極的に研究されている。超短光パルスによって励起された縦波音響フォノンパルスを励起・検出するピコ秒超音波法は空間・時間領域での非平衡電子の運動を研究するのに優れている。時間幅がサブピコ秒以下の励起パルス光が金属表面に入射すると電子がフォトン吸収し、電子温度 T_e は格子温度 T_i よりも高温になる ($T_e > T_i$)。光励起された非平衡電子は拡散しながら電子-格子相互作用により格子にエネルギーを与え、最終的に格子と熱平衡な平衡電子となる ($T_e = T_i$)。電子からエネルギーを得た格子の温度上昇により熱膨張が起きフォノンパルスが励起される。したがってフォノンパルスの波形は一般に非平衡電子拡散、熱拡散(平衡電子拡散)、電子-格子相互作用によって決定される。したがって実験から測定されるフォノンパルスを解析することでピコ秒音響フォノンパルス励起機構、すなわち電子の超高速現象を解明できる。

励起された縦波フォノンパルスは金属薄膜中を伝播し基板に反射されて表面に戻ってくる。この反射フォノンパルスにより金属表面の屈折率が光弾性効果により変化する。また試料表面の変位も変化する。これらの変化は検出パルス光を用いて測定することができる。励起パルス光と検出パルス光の金属表面への入射時間を連続的に変化させることによってフォノンパルスをピコ秒オーダーの実時間領域で観測することができる。

ピコ秒超音波法によるフォノンパルスの励起機構はこれまで金、銀、銅に対して主に研究されてきた。金、銀、銅より電子と格子の結合が強いクロムとニッケルでは、時間幅が短く(~ 10 ps)、周波数の高い(~ 100 GHz)フォノンパルスを励起することができる。高周波数のフォノンは減衰が大きいので、フォノンパルスは薄膜中を伝播するにつれて変形する。通常フォノンパルスは超短光パルス光を使って光学的に測定されるので、実験から得られるフォノンパルスを解析するには光弾性効果を考える必要がある。このように超音波減衰と光弾性効果を考慮しなければならないので実験結果の定量的な解析は複雑である。このような理由からこれまで電子-格子結合が強い金属に対するフォノンパルスの励起機構は研究されてこなかった。本研究ではクロムとニッケルにおけるピコ秒音響フォノンパルス励起機構を解明した。

波長 415 nm、パルス幅(強度半値幅) ~ 200 fs の励起パルス光を用いてフォノンパルスを励起した。入射エネルギー密度は ~ 0.01 mJcm $^{-1}$ であり、この条件で電子温度は ~ 100 K、格子温度は ~ 1 K 上昇する。光強度が励起パルス光よりも十分弱い検出パルス光には励起パルス光と同一のレーザーから放射された波長 830 nm のパルス光を用いた。フォノンパルスは光学干渉計を利用して、光反射係数の振幅変化・位相変化として測定した。また検出パルス光を試料に対して斜めに入射させることにより表面変位を直接測定した。

実験結果と理論を比較するには電子温度 T_e と格子温度 T_i の時間・空間的な変化を求める必

要がある。そして $T_i(z, t)$ からフォノンパルス歪み $\eta(z, t)$ として求め、振幅変化・位相変化および表面変位を計算しなければならない。 T_e, T_i は two temperature model (TTM) から計算できる。TTM は電子系と格子系に対する二つの非線形方程式で記述される。TTM では電子の拡散 (非平衡電子拡散と熱拡散) と電子から格子へのエネルギー移動が考慮されている。したがってこの理論と実験結果を比較することで電子の超高速現象を明らかにできる。本研究では TTM を線形化して η を解析的に求めた。非平衡電子拡散と熱拡散を考慮して求めた計算結果 (なめらかな実線) が実験結果と最もよく一致した。クロムとニッケルのような比較的電子-格子の結合が強い金属におけるピコ秒音響フォノンパルス励起機構には非平衡電子拡散と熱拡散の両方が寄与していることが分かった。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 ライト・オリバ
副 査 教 授 石 政 勉
副 査 教 授 山 下 幹 雄

学 位 論 文 題 名

クロムとニッケルにおける

ピコ秒音響フォノンパルス励起機構

超短光パルスを金属表面に照射させると、金属中に格子と熱平衡状態にない非平衡電子を励起可能であり、近年積極的に関心されている。超短光パルスによって励起された縦波音響フォノンパルスを励起・検出するピコ秒超音波法は空間・時間領域での非平衡電子の運動を研究するのに優れている。時間幅がサブピコ秒以下の励起パルス光が金属表面に入射すると電子がフォトン吸収し、電子温度 T_e は格子温度 T_i よりも高温になる ($T_e > T_i$)。光励起された非平衡電子は拡散しながら電子-格子相互作用により格子にエネルギーを与え、最終的に格子と熱平衡な平衡電子となる ($T_e = T_i$)。電子からエネルギーを得た格子の温度上昇により熱膨張が起きフォノンパルスが励起される。したがってフォノンパルスの波形は一般に非平衡電子拡散、熱拡散 (平衡電子拡散)、電子-格子相互作用によって決定される。したがって実験から測定されるフォノンパルスを解析することでピコ秒音響フォノンパルス励起機構、すなわち電子の超高速現象を解明できる。

励起された縦波フォノンパルスは金属薄膜中を伝播し基板に反射されて表面に戻ってくる。この反射フォノンパルスにより金属表面の屈折率が光弾性効果により変化する。また試料表面の変位も変化する。これらの変化は検出パルス光を用いて測定することができる。励起パルス光と検出パルス光の金属表面への入射時間を連続的に変化させることによってフォノンパルスをピコ秒オーダーの実時間領域で観測することができる。

ピコ秒超音波法によるフォノンパルスの励起機構はこれまで金、銀、銅に対して主に研究されてきた。金、銀、銅より電子と格子の結合が強いクロムとニッケルでは、時間幅が短く (~ 10 ps)、周波数の高い (~ 100 GHz) フォノンパルスを励起することができる。高周波数のフォノンは減衰が大きいので、フォノンパルスは薄膜中を伝播するにつれて変形する。通常フォノンパルスは超短光パルス光を使って光学的に測定されるので、実験から得られるフォノンパルスを解析するには光弾性効果を考える必要がある。このように超音波減衰と光弾性効果を考慮しなければならないので実験結果の定量的な解析は複雑である。このような理由からこれまで電子-格子結合が強い金属に対するフォノンパルスの励起機構は研究されてこなかった。本研究ではクロムとニッケルにおけるピコ秒音響フォノンパルス励起機構を解明した。

波長 415 nm、パルス幅 (強度半値幅) ~ 200 fs の励起パルス光を用いてフォノンパルスを励起した。入射エネルギー密度は $\sim 0.01 \text{ mJ cm}^{-2}$ であり、この条件で電子温度は ~ 100 K、格子温度は ~ 1 K 上昇する。光強度が励起パルス光よりも十分弱い検出パルス光には励起パルス光

と同一のレーザーから放射された波長 830 nm のパルス光を用いた。フォノンパルスは光学干渉計を利用して、光反射係数の振幅変化・位相変化として測定した。また検出パルス光を試料に対して斜めに入射させることにより表面変位を直接測定した。

実験結果と理論を比較するには電子温度 T_e と格子温度 T_i の時間・空間的な変化を求める必要がある。そして $T_i(z, t)$ からフォノンパルスを歪み $\eta(z, t)$ として求め、振幅変化・位相変化および表面変位を計算しなければならない。 T_e , T_i は two temperature model (TTM) から計算できる。TTM は電子系と格子系に対する二つの非線形方程式で記述される。TTM では電子の拡散 (非平衡電子拡散と熱拡散) と電子から格子へのエネルギー移動が考慮されている。したがってこの理論と実験結果を比較することで電子の超高速現象を明らかにできる。本研究では TTM を線形化して η を解析的に求めた。非平衡電子拡散と熱拡散を考慮して求めた計算結果が実験結果と最もよく一致した。クロムとニッケルのような比較的電子-格子の結合が強い金属におけるピコ秒音響フォノンパルス励起機構には非平衡電子拡散と熱拡散の両方が寄与していることが分かった。

これを要するに申請者は、クロムとニッケルにおけるピコ秒音響フォノンパルス励起機構を明らかにすることを通し、金属中の電子の高速現象の解明したものである。この知見は応用物理学の発展に貢献するところ大なるものがある。よって申請者は北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。