

学位論文題名

超格子における音響フォノンの分散関係
ならびに共鳴透過と反射に関する研究

学位論文内容の要旨

ナノスケールヘテロ半導体薄膜積層構造である人工超格子は、高温超伝導体等と共に新しい光、電子材料として重要である。さらに、この数あるいは数十原子層からなるマイクロ（または、メソスコピック）な構造における音響振動（フォノン）のダイナミクスは単に基礎物性の解明上のみならず、THz領域におけるフォノン光学素子への応用上からも興味をもたれている。

周期的な超格子におけるフォノンの物理的特性は、波数と周波数の間に成立する分散関係によって支配される。これは、無限周期系において意味をもち、フォノンのバンド構造を決めている。一方、現実には作製される有限周期超格子において、この分散関係と直接比較できる物理量としてフォノンの透過率があり、前者の周波数ギャップ内で後者は鋭くゼロに落ちこむ。これらの量は共に超格子系におけるフォノン場の転送行列を用いて計算され、その計算結果とフォノン・スペクトロスコーピー法あるいはフォノン・イメージング法による実験結果とは良く一致している。

しかし、これまでのフォノンの分散関係の計算は、主に立方晶の[001]方向に積層された超格子に対するものが殆どである。一方、立方晶の[111]方向にも超格子は成長可能であり、実際縦波フォノンの透過実験が初めて行われたのは(111)GaAs/AlAs超格子においてである。(111)超格子においては界面が鏡面対称性をもたないため、斜方入射に対してフォノンの入射角と反射角は等しくならず、その分散関係に(001)超格子とは異なる特徴が期待される。本論文ではこの点を詳細に検討し、分散関係にゾーンの中心と端以外の波数で周波数ギャップが生じることを見出した。さらに、この系におけるフォノンの透過、反射特性を転送行列法に基づいて明かにした。

一方、フォノンの斜方入射においては、垂直入射で生じるフォノンの単一モード間のブラッグ反射の他に、モード遷移を伴うブラッグ反射が理論、実験の両面から新たに見い出されている。これらは、フォノンの分散関係で二つの分枝が音速の違いにより互いに交差しようとする周波数で生じる。そのような周波数においては、さらにフォノン間にモード変換を伴う共鳴的透過が生じる可能性がある。本研究では、この共鳴的透過が実際に存在すること、またそれが単に周期的超格子のみならず、層厚を「共鳴透過条件」を満たす値の前後で徐々に変化した超格子においても生じる事を、解析的および数値的計算により示した。後者の非周期的超格子はCHIRP超格子と呼ばれ、電子デバイスへの応用上興味を持たれている。

本論文の構成は次の通りである。まず、序論において、本研究の背景および目的について論じた。ひき続き、第1章では、弾性定数テンソルの座標変換の下での変換則ならびに、(111)超格子内での独立なフォノンモードである界面に平行に偏極する横波(SHモード)に対する転送行列を導いた。さらに、反射率および、透過率、エネルギー流束、分散関係等の導出を行った。

第2章では、(111)超格子内で相互作用する二つのフォノンモード、つまりSHモードに垂直に偏極する横波(Tモード)と縦波(Lモード)に対する転送行列を導き、さらに等周波数曲線、偏極ベクトル、エネルギー流束、透過と反射に関する構造因子等の導出を行った。また、等方近似した構成層をもつ超格子を考察する準備として転送行列等の等方媒質での表現を導出した。

第3章では、周期的な(111)超格子の具体例としてGaAs/AlAs超格子を考察し、SHモードの透過率および反射率、分散関係を第1章で与えた手法に基づき数値計算により求めた。鏡面对称性をもつ界面の超格子と異なり、周波数ギャップは一般にブリルアンゾーンの中央や端でなく、ゾーン内部に現われる。摂動論的考察に基づき反射過程を記述する構造因子を導入することより、これらの周波数ギャップにおけるフォノンのブラッグ反射を解析した。この際、構造因子の算出に必要な界面からの振幅反射係数が転送行列より与えられる事を示した。さらに、分散関係中に周波数ギャップが発生する条件および、ブラッグ反射の条件、ブラッグ反射の消滅則、周波数ギャップのゾーン内部での位置を転送行列を用いて表現した。また、フォノンの垂直入射のときに有効であるRytovによる分散関係がSHモードの斜方入射に対しても拡張可能であることを示した。

第4章では、周期的な(111)超格子内のフォノンの結合モードであるTとLモードに対する第2章の具体例として、第3章と同様のGaAs/AlAs超格子を考察した。特に透過過程を記述する構造因子を算出し、「共鳴透過条件」の存在を明かにした。共鳴透過条件が成立する周波数では、二つのTとLモードが超格子中を伝搬する際にエネルギーの授受を行い、エネルギー保存則を満たすように各モードの透過率が逆位相で振動する。また、転送行列より得られるフォノンの透過率および反射率の周波数依存性と入射角依存性は、構造因子の結果と良く一致していることを明らかにした。この際、構造因子の算出に必要な界面での複数のモードに対する振幅反射係数と振幅透過係数が第3章と同様に転送行列より与えられる事を示した。

第5章では、第4章で議論した共鳴透過現象を解析的に解くことを次章で試みる準備として、周期的超格子の各層を等方的と近似し、分散関係および、透過率の数値計算を行なった。さらに、第4章で示した伝搬距離に対する各モードの透過率の振動がこの等方近似でも存在することを示した。また、TとLモードの透過に対する構造因子を用いて、透過率の振動周期を表現する式を与えた。

第6章では、等方近似した構成層をもつ超格子に対し、TおよびLモードのフォノン振幅に対する連立一階差分方程式を転送行列から導出した。これより、非周期的なCHIRP超格子の中央に共鳴透過条件を満たす層を配置した場合、フォノンが伝搬するに従いモード変換を伴いながら透過率が振動し、次第に一方のモードから他方のモードにエネルギーが移動する現象を解析した。また、第5章で示した共鳴透過条件が成立する周期的超格子における各モードの透過率の伝搬距離依存性に対し、厳密な解析解を与えた。

第7章は研究の総括であり、本論文の結論、結果の応用、ならびに今後の課題について述べた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 田 村 信 一 朗

副 査 教 授 中 山 恒 義

副 査 教 授 徳 田 直 樹

学 位 論 文 題 名

超格子における音響フォノンの分散関係 ならびに共鳴透過と反射に関する研究

ナノ・スケールの半導体薄膜積層構造である人工超格子は、高温超伝導体等と共に新しい光、電子材料として重要である。さらに、この数あるいは数十原子層からなる微小構造における音響振動（フォノン）のダイナミクスの解明は、単に基礎物性上の興味にとどまらず、THz領域におけるフォノン光学素子への応用上からも注目を集めている。

周期的な超格子におけるフォノンの物理的特性は、波数と周波数の間に成立する分散関係によって支配される。本論文は、これまでに十分な解析が行われていなかった(111)超格子におけるフォノンの分散関係を詳細に検討したものである。特にミニゾーンの中心と端以外の波数で周波数ギャップが生じることを新たに見い出し、また、この系におけるフォノンの透過、反射特性を転送行列法に基づいて明らかにした。

さらに、分散関係で二つの分枝が音速の違いにより互いに交差しようとする周波数で、フォノン間にモード変換を伴う共鳴的透過が生じることを初めて明らかにした。またそれが単に周期的超格子のみならず、層厚を「共鳴透過条件」を満たす値の前後で徐々に変化させた非周期超格子においても生じる事を、解析的および数値的計算により示した。

本論文の構成は次の通りである。

まず、序論において、本研究の背景および目的について論じ、ひき続き第1章では、弾性定数テンソルの座標変換の下での変換則、ならびに(111)超格子内での独立なフォノンモードである、界面に平行に偏極する横波SHモード、に対する転送行列を導いた。さらに、分散関係、反射率および、透過率、エネルギー流束等の導出を行っている。

第2章では、(111)超格子内で相互作用する二つのフォノンモード、つまりSHモードに垂直に偏極する横波(Tモード)と縦波(Lモード)に対する転送行列を導き、さらに等周波数曲線、偏極ベクトル、透過と反射に関する構造因子等の導出を行った。また、転送行列等の等方媒質での表現を導出した。

第3章では、周期的な(111)超格子の具体例としてGaAs/AlAs超格子を考察し、SHモー

ドの透過率と反射率、および分散関係を第1章で与えた手法に基づき数値計算により求めている。鏡面对称性をもつ界面を有する超格子と異なり、周波数ギャップは、一般にブリルアンゾーンの中央や端でなく、その内部に現われることを見出し、さらに摂動論的考察に基づき反射過程を記述する構造因子を計算することで、これらの周波数ギャップにおけるフォノンのブラッグ反射を理論的に解析した。

第4章では、周期的な(111)超格子内のフォノンの結合モードであるTとLモードに対し、特に透過過程を記述する構造因子を算出し、「共鳴透過条件」の存在を発見した。共鳴透過条件が成立する周波数では、二つのTとLモードが超格子中を伝搬する際にエネルギーの授受を行い、エネルギー保存則を満たすように各モードの透過率が逆位相で振動すること、また転送行列より得られるフォノンの透過率、および反射率が、構造因子の計算結果と良く一致していることを明らかにした。

第5章では、周期的超格子の各層を等方的と近似し、分散関係および、透過率の数値計算を行なった。さらに、第4章で示した伝搬距離に対する各モードの透過率の振動がこの等方近似でも存在することを示した。また、TとLモードの透過に対する構造因子を用いて、透過率の振動周期を表現する式を与えている。

第6章では、等方近似した構成層をもつ超格子に対し、TおよびLモードのフォノン振幅が従う連立一階差分方程式を転送行列から導出している。これに基づき、非周期超格子の中央に共鳴透過条件を満たす層を配置した場合、フォノンが伝搬するに従いモード変換を伴いながら透過率が振動し、次第に一方のモードから他方のモードにエネルギーが移動することを見出した。また、共鳴透過条件が成立する周期的超格子におけるフォノンの透過率の伝搬距離依存性に対し厳密な解析解を与え、さらに共鳴透過現象を観測するための実験的手法を提案している。

第7章は研究の総括であり、本論文の結論、結果の応用、並びに今後の課題について述べられている。

これを要するに、著者は、超格子における音響フォノンの分散関係ならびに共鳴透過と反射に関する研究について新知見を得たものであり、量子物理工学ならびに応用物理学の進展に寄与するところ大なるものがある。

よって著者は、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。