



Title	乱れた構造を利用したフォノンニックデバイスに関する基礎研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	吉弘, 達矢
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14865号
Issue Date	2022-03-24
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/85152
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Tatsuya_Yoshihiro_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 吉弘 達矢

学位論文題名

乱れた構造を利用したフォノンニックデバイスに関する基礎研究
(A fundamental study on phononic devices using disordered structures)

固体中のフォノンや音響波を用いたデバイスの研究・開発は長年にわたり行われてきた。代表的なものに、表面弾性波を用いた SAW (Surface Acoustic Waves) デバイスや超音波エコーが挙げられる。さらに人工的な周期構造を利用したフォノンニック結晶 (PnC) を用いて、バルク音響波回路や表面弾性波、負の屈折率を持つ系が研究されてきた。PnC は、音響インピーダンスの異なる物質を、目的に応じて 1 次元から 3 次元まで周期的に配列した構造を持つ。音響波の分散関係は、周期構造によりバンド構造を示し、電子のエネルギーバンドと同じく、伝導帯では音響波のモードが存在するため PnC 中を透過する。これにより、音響波を選択的に透過できる。一方、禁止帯では音響波のモードが存在しないため、PnC に入射出来ず、全反射される。これにより、音響波回路を構築したり、環境外からのノイズを遮蔽したりできる。バンド構造は、系を構成する物質とその系の次元性、周期構造の形状に強く依存するため、これらの変化による、音響波の分散関係の変化が多くの研究の対象となっている。同時に、禁止帯と伝導帯を自由に調整できれば、PnC は音響波を制御するための非常に有用なデバイスになると期待できる。一方、PnC には周期構造であるために避けられない問題が存在する。1 つは、禁止帯の幅を任意に大きく取れないことである。PnC のバンド構造には、周波数の変化とともに禁止帯と伝導帯が必ず交互に現れる。このため、その禁止帯を挟む伝導帯からの音響波を遮蔽できず、例えば音響波回路の漏れの増大や環境ノイズの遮断能の低下を招く。もう 1 つの問題は、高分解能の音響波バンドパスフィルターを考えた場合、周波数幅が著しく狭い伝導帯では、分散関係が平坦になることである。その結果、著しく伝送速度が低下し、高分解能の音響波フィルタリングには限界が生じる。

本学位論文では、これらの課題を解決する新たな PnC として、周期構造の代わりに乱れた構造を用いたフォノンニックデバイスを提言する。乱れた構造における波動の伝播は、非周期構造による散乱で決定されるため、周期構造のようなバンド構造を示さない。しかしながら乱れた構造中の波動の散乱経路と、その反対の向きの経路をたどる波動は互いに干渉し、その現象は全ての散乱経路にわたり生じる。結果、波動は局在する。この現象をアンダーソン局在と呼ぶ。アンダーソン局在は空間次元に強く依存し、次元数が少ないほど局在しやすい。そこで、2 種の異なる材料をランダムに積層することで構築される 1 次元ランダム超格子 (RSL) を用いると、全ての周波数領域で禁止帯を持ち、音響波を遮蔽できると期待される。さらに、RSL の各構成層の厚さが、音響波の半波長の整数倍に等しい場合に生じる共鳴透過を利用することで、特定の周波数で非局在化させ、周波数選択的に音響波を透過するバンドパスフィルターの実現が可能となる。非局在化は共振周波数付近で発生するため、伝送速度は周波数に対し鋭いピークを示す。このように、音響波のアンダーソン局在現象と非局在化を利用して、伝播特性を制御できる。

上述の RSL を用いる事で新たなタイプの音響デバイスが出来るように思われるが、その実応用のためには明らかにすべき課題がある。RSL に関する先行研究は、音響波の界面に垂直入射を想

定しており、音響波をスカラー波としたものであった。そのため、実応用時に想定される、音響波が RSL に斜入射し、縦音響波 (LA) および横音響波 (TA) のベクトル波である場合の局在状態については全く理解されていない。LA または TA のいずれかが異なる媒質の界面に斜入射すると、両方のモードの音響波が反射波と透過波として、境界条件を満たすように生成される。このモード変換は、RSL 内のすべての界面で生じる。このとき、一つの仮説として、個々のモードで RSL での干渉条件が異なることから、アンダーソン局在によりどちらかのモードのフォノンが減衰しても、別のモードのフォノンが伝達され、音響波の伝播が減衰しないことが考えられる。一方、相反するもう一つの仮説として、界面でのモード変換により、LA でも TA でもない新たな結合モードが生じ、そのモードがアンダーソン局在を起こすことで音響波の伝播が減衰することが考えられる。本学位論文の第 1 の目的は、上述の斜入射の場合の音響波の伝播とモード変換の効果を明らかにする事である。

また、上述の RSL は固体を構成要素として用いているため、一旦作製すると、その周波数特性を随意に変更することは出来ない。目的に応じて音響波の透過と反射を制御出来れば、デバイスの応用範囲が広がる。これを実現する方法として、RSL を構成する物質として固体と液体の組み合わせを用い、固体層を移動させることにより、透過と反射の周波数特性を制御することが考えられる。本学位論文の第 2 の目的は、固体/液体 RSL を用いた音響波の透過制御の方法を確立することである。

本学位論文の構成は以下の通りである。

第 1 章では、序論として本論文の主題である乱雑な構造を利用したフォノンニックデバイスに関する研究の背景と、従来技術の問題点について述べる。

第 2 章では、RSL に垂直入射した音響波のアンダーソン局在の理論的な解析について紹介するとともに、アンダーソン局在に特有な、(1) 音響波の透過率の周波数依存性、(2) サンプル依存による透過率の揺らぎと平均透過率との普遍的な関係、(3) 透過率の確率分布について紹介する。

第 3 章では、音響波が斜めに RSL に入射する場合の、モード変換が引き起こすアンダーソン局在への影響、および透過特性への影響を明らかにする。これにより、斜め入射の場合でもアンダーソン局在が音響波の伝播を制限していることを示す。

第 4 章では、実用上必要になると考えられる、固体/液体 RSL の透過特性の制御方法について明らかにし、RSL のデバイスへの応用の可能性を示す。

最後に第 5 章では、結論と今後の展望を述べる。