

論文の要旨

氏名 吉川 遼

論文題目 Theoretical study on peculiar optical responses in metal grating
(金属グレーティングにおける特異な光学応答の理論的研究)

金属棒を周期的に配列した構造である金属グレーティングは、古くから光の分野において広く用いられている。重要な応用例として分光器の回折格子、導波路カップラ、また最近では表面プラズモンを用いたプラズモンセンサなどがある。一方で、金属グレーティングは「Wood's-Rayleigh (WR) アノマリ」と呼ばれる現象や、「異常透過」と呼ばれる現象などを始め、様々な特異な光学応答を示すことも知られている。構造の単純さとは対照的に、これらの物理的メカニズムは複雑であり、ごく最近に至るまで議論が続いた。本研究では応用上重要な、基板上、あるいは誘電体導波路上に配置された金属グレーティング、すなわちカップラ構造における光学応答を調べ、そこで生じる特異な現象を明らかにすることを目的とした。

第2章では用いた解析手法(空間的結合モード法、時間的結合モード法)を説明した。

第3章では透過のアノマリ(WRアノマリ、異常透過)に基板の存在が及ぼす影響を調べた。WRアノマリとは、回折波が放射化する波長付近で光の強度が急激に変化する現象であり、1902年にWoodにより報告された。また異常透過とは、サブ波長サイズの微細な孔の配列を設けた金属膜構造体における回折限界を超えた透過現象であり、1998年に発見された。これらの現象を引き起こすメカニズムや相互の関係に関しては、近年まで多くの議論が行われてきた。2014年にYoonらが透過率スペクトルのディップとピークを、プラズモン共鳴が関与したFano共鳴の考え方で統一的に説明したことで、メカニズムがおおむね明らかになったが、依然として完全に解明された訳ではない。例えばYoonらの論文では、空気中に配置したグレーティングを想定しているが、実際にデバイスなどで使用する際は必ず基板の上に配置しなければならない。そのため、基板が存在する場合と存在しない場合の振る舞いの違いを理解しておくことは重要である。本研究では半導体基板を想定し、透過率や近接場増強度を調べた。その結果、グレーティング厚さに依存してシフトするピークが系の束縛モードに対応することを確認した。束縛モードはグレーティングのスリットにおけるファブリ・ペロー共鳴に対応し、グレーティングを薄くすると短波長側にシフトする。束縛モードがグレーティング波長よりも短波長化すると、放射化して消滅し、これに対応してスペクトル上に現れるピークも消滅することが分かった。束縛モードの消滅は、グレーティング上下の誘電率が等しい場合には起こらず、構造の非対称性が強い場合に生じる特徴であることも明らかにした。

第4章と第5章では、誘電体導波路上に配置した金属グレーティングに注目し、近年

注目を集めている **bound states in the continuum (BIC)** や **exceptional point (EP)** の出現条件を詳しく解析した。なお、この系における **EP** の発現は本研究で初めて発見されたものである。

BIC とは外部へのエネルギー放射が存在する系におけるエネルギー散逸のない固有モードであり、外場との対称性の不一致、あるいは二つの固有モードの放射場の干渉により生じる。**BIC** により微細な構造への光の閉じ込めを強めることが可能となり、高調波発生、単一モードレーザー、センサ等への応用が提案されている。

EP は、エネルギーが保存しない非エルミート系で起こりうる現象の一つで、二つの異なる固有モードが完全に一つになる（固有値、固有ベクトル共に等しくなる）特異的な点のことである。非エルミート系の物理への理学的な興味に加え、**EP** では一方向にのみ無反射になる光学素子を実現できることなどから、レーザーにおける戻り光防止や光ネットワーク素子など、新たなデバイスへの応用も期待されており、盛んに研究されている。

第4章では、まず **BIC** の存在を確認した。本研究が対象とした金属グレーティングをカプラとする導波路系において、**BIC** は導波路内の二つの導波モードの放射場の干渉により生じる。この系の **BIC** の特徴は、近接場結合により反交差したブランチの片方に **BIC** が存在する点である。入射偏光に対する依存性を調べた結果、入射電場の向きがグレーティング溝に垂直な場合（**P** 波）に **BIC** が低周波側のブランチに生じるのに対し、入射電場が溝に平行な場合（**S** 波）は高周波側のブランチに発生することを発見した。時間的結合モード法および空間的結合モード法による解析の結果、**BIC** の出現ブランチは、関与する2モード間の結合位相と、各モードと外界との結合位相の差によって決まることを明らかにした。

第5章では **P** 波入射時の光学応答のグレーティング厚さ依存性を調べた。その結果、グレーティング厚さの変化とともに反交差のギャップが徐々に減少して、あるグレーティング厚さで縮退し、その後再びギャップが開くことを見出した。更に、ギャップが閉じる前後で **BIC** の出現ブランチが逆転する事を見出した。グレーティング厚さ変化に伴うギャップの変化はスリット内のファブリ・ペロー共鳴で理解できることも明らかになった。また、時間的結合モード法により、ある特定のグレーティング厚さにおいて **EP** が存在することを予測し、空間的結合モード法による電磁場解析により、導波路-金属グレーティング系で、予想通り **EP** が発現することを示した。

グレーティング厚さによる反交差ギャップの変化がスリット内のファブリ・ペロー共鳴で説明できることから、グレーティングに印加する電圧を変えることで **BIC** や **EP** の出現を制御できる可能性がある。これにより **EP** や **BIC** を用いた全く新しく、かつ電圧による高速変調が可能なデバイスやセンサの実現が期待される。

以上の様に本研究では、基板や誘電体導波路上に配置された金属グレーティングという、応用上重要な系に生じる特異的な光学応答の振る舞いを明らかにした。第6章にこれらのまとめと今後の展望を述べた。