	はっとり　かずひろ
氏　　名	**服　部　一　裕**
学位(専攻分野)	博　士（学術）
学位記番号	博甲第　５０５　号
学位授与の日付	平成 20 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 3 条第 3 項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科　情報・生産科学専攻
学位論文題目	**Theory of Diffraction and Scattering from Periodic Surfaces with Binary Fluctuations** （２値的なゆらぎを持つ周期的不規則表面による波動の回折散乱理論）
審査委員	(主査) 教授　中山純一 教授　秋山正博 教授　中森伸行 教授　遠藤久満

論文内容の要旨

本論文は、電磁界理論の立場から、２値的なゆらぎを持つ周期的表面による平面波の回折と散乱を解析する理論を述べたものである。

第１章は、緒論であり、研究背景と研究目的、周期的表面からの回折現象、ゆらぎを持つ周期的表面からの回折・散乱現象、および本論文での解析手法について述べている。

第２章と第３章では、完全導体の方形溝回折格子に単一欠陥がある場合の平面波の散乱問題を論じている。完全に周期的な表面からの回折波が、単一欠陥によって散乱されるとの物理的描像を用いて、２段階解析法を考案している。第一段階では良く知られた modal expansion method により回折波を決定し、第２段階では単一欠陥による回折波の散乱問題として、散乱波のスペクトルに関する積分方程式と溝内部の導波モード振幅の散乱成分が満たす無限次元連立方程式を導いている。同時に、散乱波のスペクトルが満たすべき光学定理を導出している。ＴＥ波平面波入射を扱う第２章では、打ち切り次数を導入して連立方程式を解き、近似的にモード振幅の散乱成分を決定し、微分散乱断面積を計算している。近似精度を検討するため、光学定理の関係を数値的に評価し、臨界入射角を除く入射角では、近似精度が高いことを示している。一方、ＴＭ波平面波入射を扱う第３章では、帯域幅をうち切って積分方程式を解き近似的にスペクトルを決定し、微分散乱断面積を計算している。散乱の角度分布に鋭いピークとディップとして異常散乱が発生することを示し、異常散乱の物理的メカニズムについて検討している。

第４章と第５章では、確率汎関数法を用いて、ゆらぎが２値的な周期的不規則表面による平面波の回折と散乱を解析している。問題の移動不変性により散乱波が周期定常確率過程となること、周期定常確率過程を２値不規則系列の直交確率汎関数に展開し、さらに調和級数表現を導入すれば、散乱波を求めることは汎関数の核関数を決定する問題に帰着することを述べている。次に、境界条件から核関数が満たす階層方程式を導いている。ＴＥ波入射の第４章では、階層方程式を解き２次までの核関数を決定し、微分散乱断面積を計算している。２値ゆらぎの場合には２次核関数の散乱断面積への寄与が小さいこと、表面凹凸の高さが小さい場合には近似解が光学定理の関係を精度良く満たすことを示している。一方。ＴＭ波平面波入射を扱う第５章では、多重繰り込みマスオペレータを導入して階層方程式を近似的に解き、０次と１次の核関数を決定し、微分散乱断面積を計算している。TM 波の場合には、臨界入射角において回折波の振幅が急激に変化する Wood Anomaly が現れ、また、散乱の角度分布に異常散乱が現れることを示している。また、光

学定理の関係を検討し、臨界入射角においては回折波が増え散乱が減少すること、低入射角を除いては光学定理の関係を精度良く満たすことを示している。

第６章では、全体をまとめ、同時に今後の展望を述べている。 また、付録では、２値確率系列の確率汎関数と直交確率汎関数展開に関する数学公式、周期定常過程の調和級数展開に関する公式をまとめている。

論文審査の結果の要旨

集積回路における配線や液晶パネルにおける電極、光学素子としての回折格子などは周期構造をもっている。本論文は、散乱現象を用いて、これら周期構造の欠陥を検査し計測することを目的として、電磁界理論の観点から基礎的研究を行ったものである。２次元問題に限定して、完全導体方形溝周期格子において１つの溝だけが形成されない単一欠陥の場合、及び、凸または凹が周期的に配置された表面において凹と凸が等確率で現れる周期２値不規則表面の場合を取り扱っている。

第２章と第３章では、単一欠陥による平面波の散乱問題を取り扱っている。これは過去に解析例がない電磁界の問題であるため、申請者は新たな定式化を提案している。すなわち、欠陥のない完全に周期的な場合の回折波をまず求め、次に、そのような回折波が欠陥により散乱されるとの物理的描像を用いて、散乱波の振幅が満たす積分方程式と溝内部の導波モードの散乱成分が満たす無限次元の連立方程式を導いている。同時に、光学定理の新しい公式と単一散乱近似解の解析的表現を得ている。ＴＥ波入射の場合に、次元数をうち切り連立方程式を数値的に解き、多重散乱効果が小さいことを示している。ＴＭ波入射の場合には多重散乱効果を組み込んだ積分方程式の解法が必要となること、散乱の角度分布に鋭いピークとして異常散乱が現れること、表面上を伝搬する自由伝搬導波モードと散乱波が結合するため異常散乱が発生することなどを明らかにしている。

第４章と第５章では、周期２値不規則表面による平面波の散乱を、確率汎関数法を用いて解析している。表面の凹と凸が配列された表面形状が２値確率系列から生成される周期定常確率過程となるため、散乱波は周期定常確率過程なり２値系列の確率汎関数展開を用いて表現できることが知られていた。従来の研究では、近似境界条件を用いて１次の汎関数を決定していたが、不規則表面の平均が平坦面となる場合には汎関数が発散するという欠点があった。そのような欠点を解決するため、多重散乱効果を取り入れた近似解の構成法を申請者は提案している。厳密な境界条件を用いて、ＴＥ波入射の場合は２次までの汎関数を、ＴＭ波の場合には０次と１次のの汎関数を解析的に決定し、これらを用いて光学定理と微分散乱断面積を数値的に計算した。完全な周期的表面では離散的な方向への回折が発生することは広く知られているが、申請者は表面に周期性がない場合でも相関関数が周期的であれば離散的な方向への回折が発生すること、２値確率系列の特殊性のため２次汎関数の散乱断面積への寄与は小さくなること、などを明らかにした。さらに、ＴＭ波入射の場合には、完全な周期的表面の場合と類似の Wood Anomaly が現れること、不規則性に基づく異常散乱が散乱の角度分布に現れることを明らかにした。また、本論文で得られた近似解の精度と有効範囲を光学定理の関係を用いて数値的に検討している。

以上のことから、本論文の内容には新規性と信頼性があり、学術的価値が高いと判断した。

本学位論文は以下の４編の学術論文（その内３編は公表済み、他の１編は投稿中）を基礎としている。これらの学術論文は全て申請者が筆頭著者である。

（学術論文）

1. **K. Hattori and J. Nakayama, Scattering of TE plane wave from periodic grating with single defect, IEICE Trans. Electron., Vol. E90-C, no. 2, pp. 312-319, (2007).**
2. **K. Hattori, J. Nakayama and Y. Tamura, Scattering of TM plane wave from periodic grating with single defect, IEICE Trans. Electron., Vol. E91-C, no. 1, pp. 17-25, (2008).**
3. **K. Hattori, J. Nakayama and H. Matsuoka, Wave scattering from a periodic random surface generated by a stationary binary sequence, Waves in Random Media, Vol. 11, pp.1-20, (2001).**
4. **K. Hattori, J. Nakayama and Y. Tamura, Diffraction and scattering of TM plane wave from a binary periodic random surface, Submitted for publication in Waves in Random and Complex Media.**