

学位論文題名

Properties of Radiation from
Partially Coherent Sources and
Its Propagation through a Periodic Structure

(部分的コヒーレント光源からの放射特性と放射光の周期的構造内伝搬特性)

学位論文内容の要旨

光源から放射されるエネルギーの流れに関する諸問題は、従来、インコヒーレント光源である熱的光源を対象として、幾何光学の理論に基づき研究されてきた。しかし、コヒーレント光源であるレーザの出現以来、光源の放射特性と光源のコヒーレンスとの間に存在する密接な相互関係が認識され、その理論的解明を目的とする研究が活発に行われている。それらの研究は、面発光レーザを例とする新しいタイプの光源の積極的開発を理論的側面から支援するものとなるばかりではなく、放射における新たな物理現象の予見及びそれに基づく新しい光応用技術の探求に貢献するものとして、最近新たな注目を集めている。本研究は、光の放射・伝搬特性を、特にその空間的コヒーレンス特性との関係から理論的に明らかにすることを目的としている。そのための手法として、様々なタイプの部分的コヒーレント光源モデルを導入し、それによって生じる放射場の特性と光源との関係を系統的に研究している。更に出射光の応用として、それが周期的構造を持つ媒質内部を伝搬した場合の効果を、コヒーレンス理論に基づき解析している。ここで導入されている周期的構造とは、光学素子の集積化を目指す集積光学の分野において、その高機能性のために応用が期待されている周期的構造をもつ素子のモデル化である。本論文は、11章で構成されている。以下、各章についての概要を述べる。

第1章では、部分的コヒーレント光源からの放射特性と放射光の伝搬特性に関する研究の動向を概説し、本研究の目的について述べる。

第2章では、本論文の理論的基礎となる光のコヒーレンス理論を概説する。具体的には、コヒーレンスの概念を説明した後、物理的基礎量として導入される種々の相関関数の定義とその諸性質を示す。特に、本論文で取り扱う全ての研究において重要な役割を果たす相関関数の伝搬法則と、それに関連する諸定理について詳細に解説する。

第3章では、光源から放射されるエネルギーの流れを定式化する基礎として、従来の幾何光学に基づく理論と、コヒーレンス理論の導入に基づくその拡張理論について述べる。本章と前章は、本論文の研究を進める上で必要となる基礎理論に対応する。

第4章では、部分的コヒーレント平面光源の放射特性を、放射場の空間的コヒーレンス特性とその場の強度分布の面から理論的に研究する。そのための光源モデルとして、有限サイズの一様強度分布光源を導入し、特に、光源の持つエッジの効果を中心に解析している。更に、それらの研究との関連から、放射場の空間的コヒーレンスを制御する方法として、光源に対する直接的な空間フィルタリング法を提案している。その手法の有効性が、いくつかの例を通して理論的に証明されている。

第5章では、部分的コヒーレント平面光源の放射特性を、放射効率の面から研究している。ここで導入される放射効率は、光源内部に存在する見かけ上のエネルギーと遠方界へ放射される全エネルギーの比として定義されている。本章では、前章との関係から、光源に対する空間フィルタリングの放射効率に及ぼす効果を明らかにし、放射効率変動の物理的起源を解明している。また、本章の解析では、そのコヒーレンス特性がベッセル関数系で記述される新しい光源モデルを提案している。その結果、放射効率の低下の原因が、エネルギーの伝送に寄与しないエバネセント波の存在とは無関係であることが明らかにされている。

第6章では、3次元の広がりを持つ部分的コヒーレント光源の放射特性を、第5章の研究との関連から、放射効率を用いて理論的に研究する。3次元の広がりを持つ光源は、放射特性から、平面(2次元)光源とは明確に区別されることが最近の研究により明らかにされている。本章では、第5章で導入した光源の3次元の拡張モデルを用いているため、両章で得られた解析結果の比較研究により、放射における平面光源と3次元光源の明確な相違点が明らかとなる。その結果、両者の光源の間には、放射効率と光源の空間的コヒーレンス状態との関係について、ある種の相反関係が存在することが明らかにされている。

第7章では、平面光源と3次元光源の放射特性の相違を生み出す物理的起源を明らかにすることを目的として、3次元非等方的 Gaussian Schell-model 光源の放射特性を研究する。この光源は、適当な光源パラメータの選択により、球(3次元)光源から円形(平面)光源への遷移状態を表現することが可能である。本章では、放射特性として、近年特に重要性が認識されている、光源の空間的コヒーレンス状態に起因する出射光のスペクトル変化(Wolf効果)を中心に解析を行う。得られた結果から、放射場のスペクトル変化の測定に基づく、光源情報の推定の可能性も明らかにされている。

第8章では、高機能光素子としての可能性をもつ周期的構造を開口とレンズの組み合わせによりモデル化し、その内部を伝搬するインコヒーレント光の振る舞いをモード展開の手法を用いて理論的に研究する。特に、周期的構造の持つ未知の可能性を探求することを第一の目的として、光の伝搬に伴う空間的コヒーレンス特性の変化を中心とする解析を行う。本解析は、レーザモードを解析する際に導入される手法に類似しているため、レーザ出射光の高コヒーレンス性の起源を理論的に説明するものでもある。本章の解析により、伝搬に伴う空間的コヒーレンスの向上に及ぼす開口の回折効果と、その変化の物理的メカニズムが明らかにされている。

第9章では、前章に類似する周期的構造に、多モードレーザ光が入射し伝搬する場合の効果の研究する。一般に集積光学の分野では、その機能性を高めるために、小型の半導体レーザと光学素子の一体化を目指す試みが行われている。しかし、半導体レーザは構造上から多モードで発振することが多く、理想的に最低次モードのみを分離して利用することは困難である。そこで本章では、周期的構造に多モードレーザ光が入射した場合を考え、伝搬光の空間的コヒーレンス特性を中心とする諸性質を明らかにしている。

第10章では、周期的構造を伝搬する光のスペクトル変化をWolf効果と密接に関連づけて研究する。前章までの研究結果により、周期的構造を伝搬する光の空間的コヒーレンスは、その構造に依存して変化することが明らかとなった。一方、第7章の研究課題でもあるように、Wolf効果と呼ばれるコヒーレンス状態に起因するスペクトル変化の現象が注目を集め、近年、その通信、計測、情報処理等への応用の可能性が積極的に追求されている。そのため、本章の研究は、新しい原理に基づく光応用技術の探求を目指すものとして、重要な役割を果たすことになる。

第11章では、本論文によって得られた結果を総括し、結論を述べる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 朝 倉 利 光
副 査 教 授 三 島 瑛 人
副 査 教 授 小 柴 正 則
副 査 教 授 大 塚 喜 弘
副 査 教 授 末 宗 幾 夫

学位論文題名

Properties of Radiation from Partially Coherent Sources and Its Propagation through a Periodic Structure

(部分的コヒーレント光源からの放射特性と放射光の周期的構造内伝搬特性)

光源から放射されるエネルギーの振る舞いに関する諸問題は、インコヒーレント光源である熱的光源を対象として研究されてきた。しかし、コヒーレント光源であるレーザの出現以来、光源の放射特性と光源のコヒーレンスとの間に存在する密接な相互関係が認識され、その解明を目的とする研究が活発に行われている。光波のランダム性を統計的に記述するコヒーレンスの概念は、光波の挙動を広く支配するものであり、種々の光学装置の性能を決定する上で重要な役割を果たしている。そのため、光波を利用する多くの分野においては、光源から放射される光波のコヒーレンス特性及びそれに起因する諸現象の理論的解明が求められている。以上を背景として、本論文では、部分的コヒーレント光源の放射特性及びその放射光の周期的構造内伝搬特性を、光のコヒーレンス理論に基づき理論的に研究している。

第1章では、部分的コヒーレント光源からの放射特性と放射光の伝搬特性に関する研究の動向を概説し、本論文の研究目的と各章の概要について記述している。

第2章では、本論文の理論的基礎となる光のコヒーレンス理論を概説している。

第3章では、光源からの放射エネルギー流を定式化する基礎として、従来の幾何光学に基づく理論と、コヒーレンス理論の導入に基づくその拡張理論について述べている。

第4章では、部分的コヒーレント平面光源の放射特性を、放射場の空間的コヒーレンスと強度分布の面から理論的に研究している。その結果、放射場の空間的コヒーレンスの制御には、光源の強度分布を直接変化させる光源フィルタが有効であることを明らかにしている。

第5章では、部分的コヒーレント平面光源の放射特性を放射効率に基づき研究している。ここで導入される放射効率は、光源内部に存在する見かけ上のエネルギーの遠方界へ放射される割合として定義され、光源の放射特性を定量化する重要な指標の一つとなる。本章では、前章との関係から、放射効率に及ぼす光源フィルタの効果を明らかにし、放射効率変動

の物理的起源を解明している。

第6章では、発光原子の集団等を例とする3次元の広がりを持つ部分的コヒーレント光源の放射特性を、放射効率を用いて理論的に研究している。本章では、光源モデルとして、第5章で導入された光源の3次元の拡張モデルを用いているため、両章で得られた結果の比較研究により、放射における平面光源と3次元光源の明確な相違点が明らかにされている。

第7章では、平面光源と3次元光源の放射特性の相違を生み出す物理的起源を明らかにすることを目的として、3次元非等方的ガウス型シェルモデル光源の放射特性を研究している。この光源は、パラメータの適当な選択により、3次元光源から平面光源への遷移状態を表現することが可能となる光源モデルの一つである。解析により、光源の異方性形状(2次元性・3次元性)が放射場のスペクトル構造を制御することが明らかとなり、放射場のスペクトル計測に基づく光源推定の可能性を指摘している。

第8章では、高機能光素子としての可能性が期待されている周期的構造をもつ光デバイスを、開口とレンズの組み合わせによりモデル化し、その内部を伝搬するインコヒーレント光の振る舞いをモード展開の手法を用いて理論的に研究している。その結果、光伝搬に伴う空間的コヒーレンス特性の変化の物理的メカニズムが明らかにされている。

第9章では、前章に類似する周期的構造に、多モードレーザー光が入射し伝搬する場合の効果の研究している。その結果、空間的コヒーレンス特性の位置に対する依存性を意味する場の均一性が、光源のモード構造に強く依存して変化することが定量的に明らかにされている。

第10章では、周期的構造を伝搬する光波のスペクトル変化を Wolf 効果と密接に関連づけて研究している。ここで、Wolf 効果とは光源のコヒーレンス状態に起因する放射光のスペクトル変化現象を意味する。本章の研究により、周期的構造を伝搬する光波のスペクトル構造を研究するための新しい手法として、Wolf 効果の理論の適用が有効であることが明らかにされている。

第11章では、本論文によって得られた結果を総括し、結論を述べている。

これを要するに、著者は、光のコヒーレンス理論に基づき部分的コヒーレント光源の放射特性及び放射光の周期的構造内伝搬特性を、新しいタイプの理論解析モデルを導入することによって明らかにし、多くの有益な新知見を得ており、統計光学及び光電子工学の進歩に貢献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があるものと認める。