

(続紙 1)

京都大学	博士 (工 学)	氏名	乾 善貴
論文題目	フォトニックヘテロ共振器におけるラマン効果を用いた光の量子統計性変換の理論検討		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、フォトニックヘテロ構造共振器の 2 つの共振モードをラマン効果に応用した場合に得られる現象について、古典的なレート方程式による解析結果、および量子論的な手法による解析結果と数値計算結果をまとめたものであり、7 章から成る。</p> <p>第 1 章は序論であり、まず微小共振器の 2 つの共振モードを用いたラマン効果において、特に誘導ラマン効果がシリコンフォトニクスにおける光増幅・発振素子として注目されたことを述べ、シリコンフォトニックヘテロ構造共振器を含む様々な微小共振器でラマンレーザの連続発振が実現されていることを述べている。しかしながら、ラマンレーザは励起光としてコヒーレント光源を必要とする波長変換素子であるため、量子統計性に注目することにより新規的な量子状態を実現することが重要であること、実験的に検討されてきたコヒーレント励起の他に黒体輻射光により励起するインコヒーレント励起の検討が重要であることを述べている。一方で、先行研究においては励起モードとして光共振モードを扱い、連続的な励起に対する定常的な特性を検討した研究が不足していることを述べている。従って、ラマン効果の励起モード(ポンプモード)をボソン場として扱い、その減衰と励起を考慮する量子論的な研究が必要であることを述べている。</p> <p>第 2 章では共振器におけるラマン効果を量子光学的に扱う手法をまとめている。本論文で扱う系を示し、その運動を表す密度行列方程式を示している。密度行列方程式がどのような近似のもとで、微小共振器の研究で用いられている初等的なレート方程式と対応するかを述べ、初等的なレート方程式を用いた検討の問題点を述べている。また密度行列を、コヒーレント状態、個数状態、黒体輻射状態を用いて展開する手法を示し、その手法によりフォッカープランク方程式などの密度行列方程式と等価な量子論的な方程式を導いている。更に密度行列方程式の代わりにそれらの方程式を用いる利点を述べている。特にラマン効果はポンプモードとストークスモードの 2 つの光共振モードをもつが、2 つのモードの役割は等価ではないため、2 つのモードを別の手法で展開する手法が有効である可能性に注目している。</p> <p>第 3 章では、シリコンのフォトニックヘテロ共振器を想定して、フォノン周波数だけ周波数の離れた 2 つの共振モードを持ち、また 2 つの共振モードが高い Q 値をもち、かつ小さいモード体積をもつ構造を設計している。設計にはフォノン周波数に近い周波数差をもつ 2 つの導波路モードをまず設計し、2 つの導波路モードからそれぞれフォトニックヘテロ構造による局在モードを得る手法を用いている。設計した構造についてラマン効果の結晶方位依存性を考慮して、ヘテロ共振モード間ラマン散乱の大きさを計算している。更にレート方程式を用いて、ポンプモードへの光注入に対して、ラマン効果によりポンプモード、ストークスモード間でどのように光が分配されるかを示している。設計した構造の一つでは無閾値レーザとして知られる、発振モードの光子数からは見かけ上閾値を確認できなくなる現象の兆候が見られることを示している。また、フォトニックヘテロ共振器の計算上の最高 Q 値に近い Q 値を持つ場合の検討から、無閾値レーザがラマンレーザにおいて可能であることを示している。</p>			

第 4 章では発振モードの二次相関関数について検討している。数値計算手法として positive-P 法を導入し、発振モードの二次相関関数の励起強度依存性を計算している。原則としてラマンレーザ発振により発振モードは黒体輻射光からコヒーレント光に遷移するが、特に大きい Q 値を持つ構造では、自然ラマン効果によって黒体輻射光よりもコヒーレント光に僅かながら近づいた状態が得られることを示している。更に自然ラマン効果によってストークスモードの二次相関関数が満たす式を解析的な手法により導出し、ラマン効果の大きさと共振器線幅への依存性を示し、この式が数値計算結果を説明できることを示している。また、インコヒーレント励起の場合にも二次相関関数に positive-P 法による計算を行い、自然ラマン効果による二次相関関数が黒体輻射光よりもバンチングした光となること、ラマンレーザ発振がコヒーレント励起と同様に可能であり、閾値以上では発振モードの二次相関関数からはコヒーレント光へ収束することを示している。またインコヒーレント励起の場合にも自然ラマン効果によるストークスモードの二次相関関数を解析的に導いている。

第 5 章では、解析的に検討できる極限において、量子論的な解析的検討を行っている。ラマンレーザ発振後のストークスモードについて Mandel の Q 因子を計算することでコヒーレント状態からの相違をより厳密に検討している。この検討から、コヒーレント励起の場合にストークス光がサブポアソン光へ遷移することを示している。また、ストークスモードの Mandel の Q 因子が、ポンプモードの二次相関関数、ポンプ-ストークスモード間の相互相関関数などを用いて計算できることを示している。これらの相関関数の閾値以上における特性が、閾値以上でポンプモード光子数が発振に必要な光子数と一致する仮定、ポンプモード振幅とストークスモード光子数がともに定数部分と微小揺動部分に分離できる仮定から Mandel の Q 因子を得るのに必要な相関関数の特性を得ている。またそれらを元にストークスモードの Mandel の Q 因子についての解析的な式を提案している。

第 6 章では閾値以上における上述の相関関数の特性およびストークスモードの Mandel の Q 因子について数値計算手法を用いた検証を行っている。このとき二次相関関数の僅かな相違を、十分な精度で計算できる数値計算手法としてポンプモードのコヒーレント振幅のドリフト運動とストークスモードの個数空間運動から成るモンテカルロ法を提案している。この手法を用いてコヒーレント励起下の十分強い励起に対する相関関数とストークスモードの Mandel-Q 因子を計算し、前章で導出した解析的な式が有効であることを確認している。更にモンテカルロ法からストークスモードの個数空間分布を計算し、閾値よりも十分強い励起について、個数空間分布はコヒーレント状態よりも局在した分布となることを示している。また、インコヒーレント励起の場合にも同様にストークスモードの Mandel の Q 因子をポンプモードの二次相関関数とポンプモード-ストークスモード間の相互相関関数を用いて表し、これらの相関関数の特性を用いて Q 因子の解析的な式を得る手法が有効であることを示している。このとき、解析的には閾値より十分強い励起についてストークスモードの Mandel-Q 因子は発振に必要なポンプ光子数と一致する。このため、インコヒーレント励起下の閾値以上におけるストークスモードはコヒーレント光に近いが、より個数空間で広がった分布となることを示している。

第 7 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

氏名

乾 善貴

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、フォトニック結晶導波路にヘテロ接合に類似した誘電率構造を加えて形成されるナノスケールの光共振モードの間で、自然ラマン散乱、誘導ラマン散乱により得られる現象について量子論的な手法を用いた検討を行い、その結果をまとめたものである。得られた主な成果は次の通りである。

1. 大きいQ値とモード間ラマン散乱係数をもつフォトニックヘテロ共振器構造をフォトニック結晶導波路の複数の分枝にヘテロ構造を加える手法により設計し、結晶方位依存性を考慮してラマン効果の大きさを計算した。
2. 共振モードのQ値が大きい場合、自然ラマン効果による光が黒体輻射状態から異なり、無閾値レーザと類似した特性が得られることを確認した。このために必要なQ値はフォトニック結晶についての数値計算による最大Q値で良いことを示した。
3. 閾値より十分強い励起によりストークスモードはサブポアソン光に遷移することを確認し、遷移の詳細を表す解析的な式を量子論的な方程式と少数の仮定から導出した。
4. コヒーレント光の代わりに黒体輻射光により励起した場合、十分強い励起について、ストークスモードの個数空間分布はコヒーレント状態と類似するがより広がった形状を持ち、共振器のQ値が向上するほどコヒーレント状態に近づくことを示した。

本論文は、ポンプモードに光共振モードを用いた場合のラマン効果によるサブポアソン光生成の詳細を示し、インコヒーレント光を励起光として用いた場合にラマン効果によりコヒーレント光を生成できる可能性を示した。これらの研究は高精度測定やシリコンフォトニクスへ応用することができるため、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成29年4月14日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公開可能日： 平成29年5月23日以降