

称号及び氏名 博士（工学） 小山田 篤幸

学位授与の日付 平成 26 年 3 月 31 日

論文名 「複合的フォトニック結晶構造を用いた  
狭線幅テラヘルツ光源開発」

論文審査委員 主査 石原 一  
副査 堀中 博道  
副査 藤村 紀文

## 論文要旨

近年、テラヘルツ波の研究が盛んに行われ、その技術が急速に発展している。テラヘルツ波とは、周波数が 0.1~10 THz の電磁波を指し、その高い透過性や直進性を利用した応用技術が提案されている。例えば、テラヘルツ波を利用したセンシング技術を用いた覚せい剤・爆発物の所持検査、医薬品検査、ガス分析、材料開発などへの応用や、イメージング技術を用いた空港の安全検査や生細胞イメージング、工業製品の多層塗装、錠剤のコーティング、肌の角質層などの画像解析の応用、そして、テラヘルツ無線技術を用いた高速・大容量通信など、多くの技術開発が行われている。その各技術基板を支える光源の研究開発も盛んであり、「高出力」、「広帯域」、「高安定」、「狭線幅」、「高速・ランダム波長可変」、「室温動作」、「コンパクト化」など光源の高性能化を技術課題とした研究開発がすすめられている。本研究では、特に、「高出力」、「狭線幅」、「ランダム波長可変」、「室温動作」、「コンパクト化」を同時に兼ね備える、従来には実現が困難であったテラヘルツ光源開発を目指し、非線形光学効果を利用した波長変換技術に基づくテラヘルツ波発生手法の理論提案と実験実証を行った。

非線形光学効果を使ったテラヘルツ波発生は、周波数差のある複数の入射光が生じる分極から発生する光を利用する、差周波発生と呼ばれる機構を利用するものが多い。現在、その多くがフェムト秒レーザーの広帯域の入射光周波数差を使ったテラヘルツパルス発生で

あるが、今後のテラヘルツ技術の用途拡大を考えると連続光源の需要は大きい。連続光源の利点はその線幅の狭さにあり、例えばセンシング技術に用いると非常に狭い吸収スペクトルを有する気体の分光分析をも可能とする。気体の分光分析は、宇宙・地球観測の情報解析や、有毒ガスの検出などの用途も考えられている。既存光源を用いた気体の分光分析の取り組みとして、例えば、フォトミキシング技術で数 MHz 線幅のテラヘルツ波を掃引し、MHz オーダーの分解能の分光分析が試みられている。しかし、フォトミキシング技術でのテラヘルツ波発生方式では THz 領域で出力が一気に低下するため、現状では、数 100GHz ~ 1 THz 付近の周波数域までの解析に留まっている。また、THz 領域の解析として多モード発振の量子カスケードレーザを周波数掃引し、解析を行う試みも行われているが、周波数領域は数 100GHz 程度しかないので気体の吸収線を数本計測するレベルに留まる。そのため現状では、気体分子のパラメータを正確に決定することが出来ていない。他にも、THz 領域で広帯域分光分析に利用される周波数可変の発生手法にチェレンコフ位相整合法があるが、MHz オーダーの狭線幅発生を行うと高出力のテラヘルツ波を得ることが出来ないため、広帯域の気体の分光分析技術には今一步の技術革新が必要となる。ここで挙げたものの他にも既存の狭線幅テラヘルツ光源には、数多くの方式がある。例えば、非線形光学効果を用いない発生方式では、自由電子レーザや気体レーザ、共鳴トンネルダイオード、後進波管、マルチプレクサー、p 型ゲルマニウムレーザ、非線形光学効果を用いた発生方式では、周期分極反転疑似位相整合法、チェレンコフ位相整合法、フォトニック結晶などの方式があるが、広帯域の「ランダム波長可変」が可能なテラヘルツ光源は少なく、その発生領域が限られている。更に汎用性を得るため、それらの光源に「コンパクト化」、「常温動作」といった性能も求められている。

そこで、本研究は、フォトニック結晶を利用した独自のテラヘルツ波発生手法を用いることによって、広帯域の「ランダム波長可変」が可能な狭線幅光源を出力し、テーブルトップサイズの「コンパクト」と「常温動作」が可能な従来にない汎用性の高い光源の理論提案を行った。この提案では、入射面に角度を付けて P 偏光と S 偏光の 2 種類の光を入射することによって、周波数の異なる光が周期的薄膜構造中で同時に入射光共鳴増幅効果を起こすことを利用し、発光源となる非線形分極を増大させることで高出力テラヘルツレーザが実現される。更に、入射角を調節することによって従来にない広波長域で周波数可変なテラヘルツ光源となる。本論文では、以下の 6 章で、本研究のテラヘルツ波発生手法の理論解析結果と実験検証結果をまとめた。

第 1 章では、テラヘルツ波の応用技術や既存の狭線幅テラヘルツ光源技術の現状やそれらが抱える技術課題などを明らかにし、本研究の立ち位置や特徴、その用途などを明らかにした。

第 2 章では、本研究独自のテラヘルツ波発生手法の解説を行った。ここでは、フォトニック結晶構造が有するフォトニックバンド端効果と構造的複屈折を同時に利用する発生手法の原理について説明する。更に、光波を平面波に近似した計算を用いて、面内閉じ込め

を考慮しないで単純周期を有するフォトニック結晶の周波数可変性と変換効率のポテンシャルの検証を行った。その中で、単純周期を有するフォトニック結晶に角度付き入射をすると周波数可変性については、0~3 THz と広帯域を確保できることを明らかにした。しかし、P 偏光とS 偏光の光電場増幅効果に差が生じることから、ポンプ光、シグナル光の入射光強度をそれぞれ1 Wとしスポット径を10  $\mu\text{m}$ とした場合、入射光からテラヘルツ光へのパワー変換効率が $10^{-7}$ 、出力では100nWオーダーで程度に留まってしまふことが明らかになった。

第3章では、P 偏光とS 偏光の光電場増幅効果の差を縮める複合フォトニック結晶の概念を紹介し、光波を平面波に近似した計算を用いて、面内閉じ込めを考慮しない系での周波数可変性と変換効率におけるポテンシャルの検証を行った。その中で、入射波長の4分の1の光路長を有する膜厚で設計した反射鏡で構成する複合フォトニック結晶と最適設計を施した複合フォトニック結晶の比較を行い、最適設計を施すことによって、周波数可変域は0.5~2.3 THz から0.5~3 THzへと拡大することが出来ることを指摘した。また、変換効率も上述の入射光条件下で $10^{-6}$  から $10^{-5}$  と1ケタ改善出来ることを明らかにし、10  $\mu\text{W}$ の出力を達成するポテンシャルを持っていることを確認した。更に、複合フォトニック結晶を2重化した構造を取り入れることで、周波数可変域が最大6.7 THz まで拡大出来ることを示した。その変換効率も上述の入射光条件下で $10^{-5}$ オーダーのポテンシャルを有している。ここでは更に、複合フォトニック結晶構造に角スペクトル表現したガウシアンビームを30度で入射して、フォトニック結晶内部で面内方向に光が拡散する現象が光電場増幅効果にもたらす影響を評価した。スポット径が小さくなると、光拡散の影響が大きくなり、面内閉じ込め構造を取り入れずにスポット径を10  $\mu\text{m}$  まで絞ると、光電場増幅効果が得られなくなる結果を明らかにした。

第4章では、固有モード展開法を使った解析手法で面内方向の閉じ込めを行ったフォトニック結晶の光学応答を明らかにした。そこでは、面内閉じ込め構造によって、光拡散を十分に抑制でき、有意な光電場増幅効果が得られることを明らかにした。その結果、複合フォトニック結晶は、周波数域が0~3 THz と非常に広帯域で波長掃引でき、変換効率も上述の入射光条件下で実用上十分な $10^{-6}$  オーダー、出力強度で換算すると1 $\mu\text{W}$ オーダーを達成できることを明らかにした。また、2重複合フォトニック結晶は、周波数域は5.8~6.6 THz と本手法の発生領域の拡大が望め、変換効率は上述の入射光条件下で $10^{-5}$  オーダー、出力強度で換算すると10 $\mu\text{W}$ オーダーに達することを示した。これらの素子は、他の光源技術と比較しても十分に強い出力、広い周波数域が期待できるものである。

第5章では、分子線エピタキシー装置を用いて多層薄膜構造を実際に形成し、それを分光エリプソメトリー法によって光学定数を決定し、同時に、膜厚揺らぎの程度を反射率スペクトル計測によって評価した結果を記載した。分光エリプソメトリー法の光学定数計測から、試料は非常に良質なGaAs / AlAs 膜で構成されており、本手法が想定している900 nm以上の波長領域では吸収がほとんどなく、媒質の吸収によって変換効率の低下が生じない

ことを明らかにした。また、実験で見積もった光学定数や膜厚揺らぎを取り入れても、面内閉じ込めの複合フォトニック結晶の $Q$  値がほとんど低下せず、有意なテラヘルツ波出力が得られることまで明らかにした。

第6章では、以上の結果を総括して本研究の結論をまとめ、今後の展望を述べた。

## 審査結果の要旨

本論文は、フォトニック結晶を利用した独自のテラヘルツ波発生手法による、広帯域の「ランダム波長可変」、テーブルトップサイズの「コンパクト」さ、及び「常温動作」が可能な従来にない汎用性の高い光源の理論提案を行っている。得られた主な結果は、以下の項目に要約できる。

(1) フォトニック結晶構造が有するフォトニックバンド端効果と構造的複屈折を同時に利用する発生手法を考案し、単純周期を有するフォトニック結晶に角度を付けて p 偏光と s 偏光波を入射した場合の、構造複屈折による差周波の周波数可変性については、0~3 THz と、広帯域が確保できることを明らかにしている。

(2) p偏光とs偏光の光電場増幅効果の差を縮める複合フォトニック結晶のアイデアを導入し、最適設計を施すことによって、周波数可変域は0.5~2.3 THz から0.5~3 THzへと拡大することを示した。また、変換効率も上述の入射光条件下で $10^{-6}$  から $10^{-5}$  と1ケタ改善出来ることを明らかにしている。

(3) 複合フォトニック結晶を2重化した構造を取り入れることで、周波数可変域が最大6.7 THz まで拡大出来ることを示し、その変換効率も上述の入射光条件下で $10^{-5}$ オーダーのポテンシャルを有していることを明らかにしている。

(4) 固有モード展開法を使った解析手法で面内方向の閉じ込めを行ったフォトニック結晶の光学応答を明らかにし、面内閉じ込め構造によって、斜め入射による面方向の光拡散を十分に抑制でき、有意な光電場増幅効果が得られることを明らかにしている。また2重複合フォトニック結晶では、周波数域は5.8~6.6 THz と本手法の発生領域の拡大が望め、変換効率は上述の入射光条件下で $10^{-5}$  オーダー、出力強度で換算すると $10\mu\text{W}$ オーダーに達することを示している。

(5) 分子線エピタキシー装置を用いて多層薄膜構造を実際に形成し、分光エリプソメトリー法によって光学定数を決定することによって、現状の試料作製技術で有意なテラヘルツ波出力が得られることを明らかにしている。

以上の研究は、フォトニック構造を用いた新しいテラヘルツ光源の提案を行ったもので、その内容は、同光源開発への新たな、極めて有意な選択肢を与えた価値の高いものである。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識とを有することを証したものである。