



Title	Research about coherent ultra-violet light sources based on nonlinear conversion with borate crystal
Author(s)	曲, 晨
Citation	大阪大学, 2017, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/67066
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (曲 晨)	
論文題名	Research about coherent ultra-violet light sources based on nonlinear conversion with borate crystal (ホウ酸結晶の非線形波長変換を用いたコヒーレント紫外光源に関する研究)
論文内容の要旨	
<p>高コヒーレント紫外光源は、優れたビーム品質を有し、微細加工、半導体検査などの分野での応用を視野に入れた研究開発が活発化している。非線形光学結晶による紫外光源は、半導体レーザ励起の固体赤外レーザを基本光源として、2次の非線形光学効果を利用した複数段の波長変換により構成されている。ホウ酸結晶は、非線形光学定数が大きい、物理的安定性が良い、紫外吸収端が短いなどの特性を持っており、非線形波長変換素子として注目されつつある。</p> <p>本研究は波長1064nmの固体レーザをベースとして、ホウ酸結晶を用いた波長変換により、様々な紫外光源の開発を行った。</p> <p>本研究室で開発したCLBO結晶の紫外域吸収端近傍の波長変換を狙って、189nmの固体紫外光源の開発を行った。189nm域の紫外光発生は、Nd:YAGレーザを基本波光源に用いて、LBOと2個のCLBO結晶により、5倍波である213nm光を得た。一方、基本波1064nm光を励起光として、PPLNを用いた光パラメトリック発振器(OPO)を構築し、アイトラー光(2850nm)の共振により、シグナル光(1698nm)を発生させた。最終段のCLBO結晶で213nm光と1698nm光の和周波混合(SFG)により189nm光発生を行い、213nm光から7%の変換効率で11.5mWの出力を実現した。同システムでLBOとCBOの位相整合特性を調査し、CBOの新しい位相整合特性曲線を検証した。</p> <p>更なる短波長の179nmの発生を試みるため、波長1064nmの固体レーザを基本波とし、OPOを含む7段階の波長変換光学系を構築した。平均出力11.5WのNd:YVO₄基本波光源に用いて、LBOから532nm光を第2高調波発生(SHG)により出力し、この緑色光を励起光としたKTP-OPOにより978nm赤外光を発振、共振器内に挿入したLBOにより内部共振器型SHGを行い、波長が半分の青色の489nm光を発生させた。次に、青色光から後段のCLBO-SHGで244.5nm紫外光を発生させ、さらに基本波とのSFGをCLBOで実施して、198.8nmを発生させた。最後に、基本波残留光で励起した波長1799.9nmの赤外光とのSFGにより179nm光の発生を試みた。その結果、LBOによる179nmの発生が実現し、位相整合特性が明らかになった。</p> <p>高出力の355nm光紫外レーザは微細加工用ツールとして期待が高く、この発生では高レーザ損傷耐性を有するCLBO結晶を波長変換素子として利用するため、新たに入射光のウォークオフ角を補正できる非同軸位相整合方式のプリズム接合素子を開発し、高効率波長変換を試みた。最大出力9WのNd:YVO₄レーザを基本波光源として、LBOにより532nm光を発生させ、残留基本波光とともにプリズム接合素子に集光入射して355nm光発生を行った。その結果、532nm光から35%の変換効率で1.86Wの出力を得て、通常のCLBO素子に比べ1.43倍の変換効率を実現した。</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (曲 晨)			
論文審査担当者	(職)	氏 名	
	主 査	教 授	森 勇介
	副 査	教 授	吉村 政志
	副 査	教 授	片山 竜二
	副 査	教 授	尾崎 雅則
	副 査	教 授	伊藤 利道
	副 査	教 授	片山 光浩
	副 査	教 授	近藤 正彦
	副 査	教 授	森 伸也
	副 査	教 授	八木 哲也

論文審査の結果の要旨

本論文はホウ酸系非線形光学結晶を用いた紫外光波長変換を主題として行った研究成果をまとめたものであり、全 6 章で構成されている。ホウ酸系結晶により波長 189nm 光、179nm 光の波長変換、及びその位相整合特性を明らかにしている。また、355nm 光の波長変換を、新たに非線形光学結晶 CsLiB₆O₁₀ (CLBO) で実現している。

第 1 章では、研究背景を紹介している。最先端の半導体フォトマスクの欠陥検査光源として、波長 190nm 台の深紫外光が実用化されている。本研究では欠陥検査の分解能向上を目的として、より短波長の真空紫外光の発生を検討し、また、レーザー加工分野で実用化が始まった近紫外光 355nm 光の波長変換を、高い出力を見込む CLBO を用いて実施している。

第 2 章では、本論文の研究で使われている理論として、非線形光学の基本と非線形光学結晶による位相整合の原理を解説している。

第 3 章では、波長変換によって得られる Nd 系固体レーザー（波長 1064nm）光の 5 倍波（213nm）と赤外光 1698nm 光の二つの光を和周波混合させると、真空紫外光（189nm）の発生を述べている。位相整合可能なホウ酸系結晶の候補として、LiB₃O₅ (LBO)、CsB₃O₅ (CBO)、CsLiB₆O₁₀ (CLBO) が挙げられ、この中で CBO が理論計算で最も高効率変換すると予想された。必要な波長変換光学系を構築して各結晶の位相整合条件を調べたところ、CBO の位相整合は従来用いられていた理論予測と大きく異なり、大阪大学で独自に構築した屈折率分散式の結果と比較的よく一致する結果が明らかになった。189nm 光の発生には CLBO が最も優れていること、波長変換出力 11.4mW、5 倍波からの変換効率 7.3% が得られることを世界で初めて実証している。

第 4 章では、現在フォトマスクの検査に用いられている深紫外光（199nm）と赤外光（1780nm）の二つの和周波混合を行うと、真空紫外光（179nm）の発生を述べている。ホウ酸系結晶の候補として、吸収端波長の短い LBO と CBO が挙げられる。この波長変換を行うために、Nd 系固体レーザーを基本波とした波長変換光学系を独自に構築し、各結晶の位相整合特性を調査した。CBO は上述のように短波長波長変換では従来の予測結果と大きなずれが生じており、179nm 光は発生しなかった。一方、LBO を用いて 179nm 光の発生に成功し、入射波長を可変してこの波長帯の位相整合特性を世界で初めて明らかにすることができている。

第 5 章では、CLBO によって 355nm 光発生を述べている。CLBO は実効非線形光学定数が大きい、結晶内で相互作用光が分離するウォークオフ効果が顕著で、十分な変換効率が見込めなかった。そのため、既存の LBO 結晶に比べ、これまで 355nm 光波長変換の検討が全くなされていなかった。本研究では、入射する 1064nm 光と 532nm 光のウォークオフ角を非同軸位相整合によって解消し、高効率な波長変換を実現することを試みた。しかしながら、ウォークオ

フ角が大きいため従来の斜入射素子では全反射することが分かり、オブティカルコンタクト法によるプリズム接合素子を独自に設計、試作した。実際に 355nm 光の波長変換を行ったところ、入力 (1064nm 光 3.6W、532nm 光 3.9W) の条件で、従来の CLB0 素子での変換効率 (入射 532nm 光から計算) 33.4%、LB0 での効率 41.3%に対し、新しい非同軸位相整合 CLB0 素子で 47.6%の効率を得ることに成功した。プリズム接合素子による非同軸位相整合、及び CLB0 による 355nm 光発生は世界で初めての研究成果である。

第 6 章では、本論文を通じて得られた成果をまとめ結論を述べている。

以上のように、本論文は 189nm、179nm の紫外光発生を検討し、新しい位相整合特性を解明した。また、CLB0 による 355nm の紫外光発生に、ウォークオフ角の解消策を提案し、高い変換効率を達成した。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。