

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月1日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360029

研究課題名（和文） 準連続発生高出力 VUV コヒーレント光源の開発

研究課題名（英文） development of high-power quasi-cw vuv coherent light source

研究代表者

渡邊 昌良（WATANABE MASAYOSHI）

電気通信大学・情報理工学研究科・教授

研究者番号：00175697

研究成果の概要（和文）：基本光源と予備実験結果を基に、VUV 光の高出力発生のための高効率波長変換技術の開発を実施した。準連続発生マルチモード赤外コヒーレント光源（波長 800nm）の波長変換による高出力 UV 光を VUV 光発生のための紫外域の基本光源とし、エンハンスメント共振器へのビーム結合の最適化のためにモード形状制御およびパルス形状精密測定、さらに共振器のカップリング値の選択を行うことで、UV 光入力 790mW のとき波長 199nm で 60mW 出力を発生し、また波長変換効率 7.6% を達成した。

研究成果の概要（英文）：A high-power 199-nm coherent light source has been developed. In order to get a highly efficient frequency conversion for high power output in a vuv region, we employed a newly developed nonlinear crystal KBBF and an enhancement cavity technique. An output power of 60mW with a conversion efficiency of 7.6% has been generated at 199nm.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
2010年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2011年度	3,000,000	900,000	3,900,000
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用光学・量子光工学

キーワード：コヒーレント光源、非線形光学結晶、波長変換、VUV 光源

1. 研究開始当初の背景

本研究は波長 200nm 以下のいわゆる真空紫外（VUV）域でこれまでにない新しい高品質かつ高出力なコヒーレント光源を開発し、VUV 域の新たな基本光源を提供し当該領域の光応用に関する科学技術分野の新たな展開に資することを目指した。この領域で用いられているエキシマレーザー（ArF:波長 193nm）

は産業界の最前線技術として高性能な装置が実用化されているが、パルス発振であり、活性ある気体を含む装置の取り扱いには複雑となり、さらに広い分野への光学技術の展開においてはよりスペクトル特性が高品質で様々な形態での精密な制御や計測が可能となるコンパクトな全固体の連続発生のコヒーレント

光源が必須であるとともに高い出力の両立が望まれている。

本提案と類似の試みは長年進められてきたが、本研究課題のようなコヒーレント光源開発は、従来手法では複雑さ困難さのためこれまで殆ど行われなかった。ところが、最近、第二高調波発生 (SHG) で VUV 領域発生が可能という従来にない特長の新たな波長変換用結晶が開発され、VUV 光源新時代の鍵として注目を集めている。本研究計画は、我々がこれまで培った光制御や非線形結晶による高効率波長変換技術等を駆使して、波長 190nm 台で実用的な高出力・高品質 VUV コヒーレント光発生技術で世界に先鞭をつけることをめざした。

2. 研究の目的

本研究計画は、波長190nm台で当該領域では高出力となる100mWクラスの高品質コヒーレント光発生技術の確立をめざした。目標達成に向け、各年度に解決すべき開発課題を設定し、基本光源の制御から2段階のSHG波長変換を経て目標とする光源の実現を試みた。例えば波長200nm以下へのアプローチは基本光源波長が近赤外域のおよそ800nmとなる。第一段のSHGには当該波長域で評価が高いLBO結晶を採用し、第二段に新規開発のKBBF結晶を用いる。基本光源としてチタンサファイアレーザーをマルチモードで安定動作させ、エンハンスメント共振器を用いて狭帯域スペクトルで極めて高い変換効率を実現し目標を達成することとした。

3. 研究の方法

高効率な波長変換システムの開発が本研究のコアとなる課題である。従来、同波長域での狭帯域コヒーレント光の発生例はあるが基礎科学分野の分光用光源として開発されたもので小出力 (サブ mW 程度) にとどまっている。ここでは、狭帯域とピーク強度を両立するマ

ルチモード光と光共鳴による光強度の増強 (エンハンスメント) 効果を利用する独立した光共振器、および新開発の非線形結晶を組み合わせ、通常レベルを超える変換効率を追求し、これまでにない高出力 VUV 光の発生を狙う。簡単のため全体構成概略を図 1 に示す。

開発する光源システムは高いコヒーレント光と高効率波長変換の両立であり

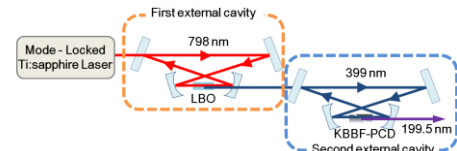


図 1 VUV 光源の全体構成。

本研究ではマルチモードの CW コヒーレント光としてモード同期パルスレーザーを用いる方法を採用した。マルチモードレーザーの通常動作はスペクトルや出力が不安定で基本光源として不向きであるが、モード同期の手法で各モードの相互位相を制御することで準連続発生レーザー (連続発生パルス) として安定動作となる。このときスペクトルを構成する全モードは常時安定発振しているため、モード間隔を厳密に一致させた光共振器に入射させればすべてのモードの同時共鳴が可能となる。共振時のエンハンスメント効果による高い光強度で高効率な波長変換が可能となってくる。このようなエンハンスメント共振器による方法はシングルモード光への適用例が一般的であったが、我々は以前の研究でマルチモード光への応用に成功し、紫外光発生で高効率波長変換法を開発した実績および、190nm 台の光の発生・制御技術に関しては、シングルモード光の最短波長 (発表時) 発生に成功するなどの研究実績を踏まえた研究展開を狙った。

VUV 領域といわれる波長 200nm 程度以下への波長変換は位相整合の限界から利用可能な非線形結晶は限られ、また、最短波長の発生実験では複数光源を用いる和周波混合による方法が必要な

ため高効率・高出力化には不向きであった。ところが、短波長域で優れた特性を持つ非線形結晶 (KBBF: $\text{KBe}_2\text{BO}_3\text{F}_2$) が新たに開発され、我々 (東京大学・渡部教授: 研究分担者) は、開発者 (中国科学院・Chen 教授: 研究協力者) と共同で基礎特性の計測と波長変換実験で、SHG で 190nm 帯発生を実証により KBBF は非線形光学係数も大きな値が確認され、これらの実績や実験結果の経緯により、マルチモード準連続レーザーを基本光源とし、KBBF 結晶を最終段とする二段の SHG 波長変換システムを構築すれば見通しよく高品質な新たな VUV 光源が実現可能と考え本研究方式による計画を実施した。

4. 研究成果

本研究開発の主たる課題は、連続する二段階の波長変換の高効率化であり、各段における高出力動作を確保し、非線形結晶を効果的に用いるためにコヒーレント光の特性の制御と活用による可能な技術を駆使することを旨とした研究開発である。具体的には、基本光源、エンハンスメント共振器、非線形結晶に関する技術開を通して目的達成に向けた実験を実施した。

赤外域のシステムの基本光源は、平均出力1.8 W、繰り返し周波数82 MHz、パルス幅1.5 ps、波長798 nmのモード同期チタンサファイアレーザー (Tsunami: Spectra-Physics社) を準連続発生コヒーレント光源として採用した。VUV光発生へのアプローチとなるUV光 (波長399nm) は、非線形結晶LBO結晶と外部共振器による方法で、入力1.8 Wに対して、第二高調波としてUV出力を最大で1.1 Wを得ることができた。外部共振器からの出力であり、カップリングミラーの出力ミラーの波長399nmでの反射損失20%を考慮すると、共振器内の結晶で発生したUVパワーは1.38 Wとなり、変換効率としては76.7%と極めて高効率な波長変換である。これにより、次段で

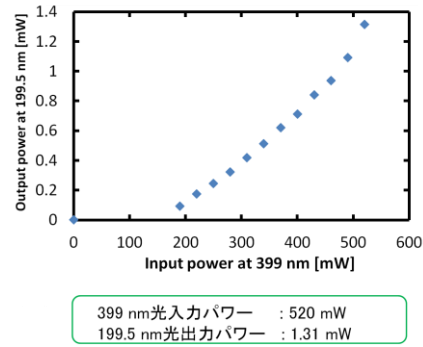


図2 シングルパス VUV 光発生特性.

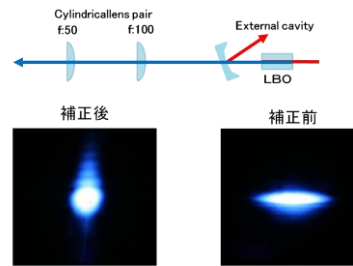


図3 ビーム形状補正.

のVUV発生のための光源としての性能を確保することができた。

VUV光発生は非線形結晶KBBFを用いるが、まず、結晶に対してシングルパス入力となる基本的な構成で波長変換の基礎特性の計測を行った。図2はUV光を用いたSHGによるVUV発生の基本基礎特性実験の計測結果である。UV入力500mWおよそ1.4mWの199nmのVUV発生を確認した。高出力発生にはやはり前段と同様に外部共振器を用いてエンハンスメント効果を利用した高効率発生が必須であるが、基本波を共振器に効果的に入射させ共振させるには入射ビームの空間的な質が重要である。ところがUV発生には、前段の結晶内での波長変換過程に伴うウォークオフによりビームの非対称性があるためこの補正も高効率化への重要な要素となりシリンドリカルレンズを用いた光学系を段間に用いて補正を行った。これらビーム結合の最適化のためにモード形状制御およびパルス形状精密測定、さらに共振器のカップリング値の選択を行った。図3に、UV発生時に生じたウォークオフ

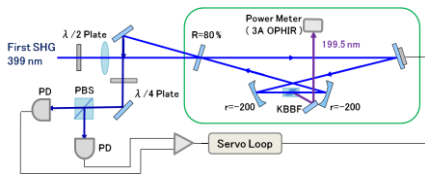


図4 共振器内 VUV 発生実験配置.

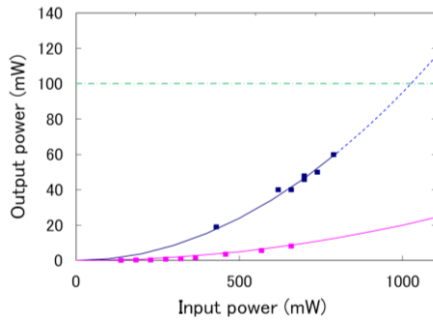


図5 VUV 光発生特性.

によるビーム断面の非対称性をシリンドリカルレンズで補正した様子を示す。

非線形結晶KBBFと外部共振器によるVUV発生実験配置を図4に示す。UV光入力に対するカップリングを前段同様に最適化して実験を行った。UV光入力に対するVUV光発生の特性を図5に示す。図中にシングルパスの場合を参考のため示した(赤丸)。最大出力として、UV光入力790mWのとき60mWの波長199nm出力が得られ、波長変換効率7.6%となった。このとき共振器のエンハンスメントは2.2であった。外部共振器の動作特性を変換係数、残留損失などをもとに計算したものが図中の曲線であり、入力が1.1Wであれば目標とする100mW以上のVUV光の発生が期待される。研究当初(H21年度)1.1WのUV光を得ていたが基本光源の性能劣化により出力減少が見られ、実験では790mW入力までとなった。研究計画では、スタート時(本研究提案申請時)に既存の光源システムを用いることを前提としていたために、経年劣化で出力減となったことは残念であった。しかしながらより実験的に発生するには今回は至らなかった。しかしながら、目標値にめどを

つかることができ、これらの結果は、実施的には当初目標を達成する研究成果といえよう。

技術的な目途をつけた波長変換技術としてさらに残留損失の低減するため仕組みを考案し、特性の解析と光源としての質の向上をめざして開発を実施した。高効率波長変換技術では、ビーム形状制御とともに共振器内の微小の残留ロスがその性能を決定づける大きな要因である。そこで、これまで波長変換結晶の入出力側に新たな低損失構造を設けた(プリュースターカットKBBF・PCD)波長変換実験を実施し、システム完成度を高めた。また更なる研究展開を踏まえ、新たな低損失化共振技術を含む技術確開発を行った。図6は偏光による残留ロスを示したもので、p偏光に対して反射ロスの低減が確認された。光源システムの写真をしめす。光学定盤奥が基本光源手前がUV発生段、VUV発生段を構成する。光源システムの写真を図7に示す。光学定盤の奥が基本光源手前がUV発生段、VUV発生段を構成する。

本研究では、199nmで60mWの準連続コヒーレント光の発生に成功し、同波長

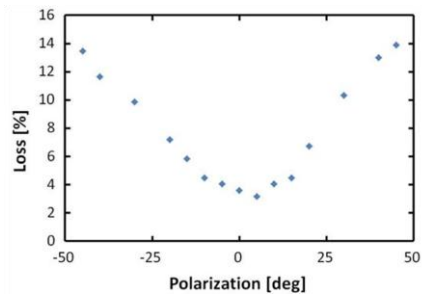


図6 残留損失の偏光依存.

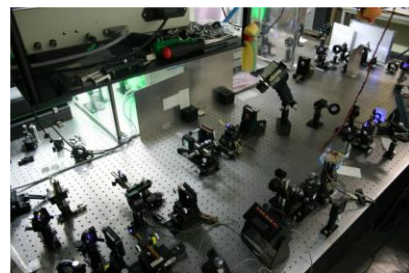


図7 VUV コヒーレント光源

域で新たな短波長コヒーレント光源を実現した。また、目標値とした100mW出力および更なる出力増加への目途と方法を示すことができ、深紫外から真空紫外に至る短波長での新たな光源とその応用の可能性を開いたといえる。また、培った波長変換に係る様々な光の制御技術は他の光源開発へすでに応用して波及効果をもたらしている。さらに、一方では光源の高出力化のため研究課題も見えてきており、今後とも新たな展開となる研究を進めたい。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

- ① Y. Zhang, S. Miyakawa, K. Kasai, Y. Okada-Shudo, M. Watanabe, Efficient phase noise suppression of an external-cavity diode-laser by optical filtering and resonant optical feedback, 査読有, 2012, 10.1007/S00340-012-4918-8 Y. Z
- ② Yun Zhang, Nobuyoshi Watanabe, Yoshiko Okada-Shudo, Masayoshi Watanabe, Masaharu, Hyodo1, Xiaoyang Wang, Yong Zhu, Chuangtian Chen, Teruto Kanai, and Shuntaro Watanabe, Generation of Quasi-CW Deep Ultraviolet Light below 200 nm by Two Successive Cavity Enhanced Second Harmonic Generators, Jpn. J. Appl. Phys. 査読有, 50, 2011, 042703-1- 042703-4
- ③ hang, Y. Sato. N. Watanabe, R. Ananda, Y. Okada-Shudo, M. Watanabe, M. Hyodo, X. Wang, C. Chen, T. Kanai, and S. Watanabe, Generation of quasi-continuous-wave vacuum-ultraviolet coherent light from fourth-harmonic of a Ti:sapphire laser with KBBF crystal, Optics Express, 査読有, 17, 2009, 8119-8124

[学会発表] (計7件)

- ① Yun Zhang, Yoshiko Okada-Shudo, Masayoshi Watanabe, Masaharu, Hyodo1, Xiaoyang Wang, Yong Zhu, Chuangtian Chen, Teruto Kanai, and Shuntaro Watanabe, Generation of Coherent Deep Ultraviolet Light below 200 nm by Fourth-harmonic a Ti:sapphire laser with high repetition, The 1st Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS'12), (Yokohama, Japan, 2012) ALPS3-2 2012/3/26 横浜
- ② 星 遼太, 金井 輝人, 兵頭 政春, X. Wang, Y. Zhu, C. Chen, 渡部 俊太郎, 張 贇, 岡田 佳

子, 渡辺 昌良, プリユースターカット KBBF-PCD を用いた 199.5 nm 光発生、第 59 回応用物理学関係連合講演会、2012, 17p-E8-19 2012/3/17 早稲田大学

- ③ 松盛 裕志, 林 宣之, 三反崎 涼平, 笠井 克幸, 薛 迎紅, 張 贇, 岡田 佳子, 渡辺 昌良, PPKTP 結晶を用いた外部共振器による第二高調波発生の高出力化と高安定化、第 59 回応用物理学関係連合講演会、2012, 17p-E8-18 2012/3/17 早稲田大学
- ④ 林 宣之, 笠井 克幸, 張 贇, 岡田 佳子, 渡辺 昌良, 外部共振器と PPKTP 結晶を用いた 532nm 光の高出力高効率発生、レーザー学会学術講演会第 32 回年次大会、2012, B.7 01a I 2 2012/2/1 仙台
- ⑤ 関本 大介, 金井 輝人, 兵頭 政春, 張 贇, 渡辺 昌良, 岡田 佳子, Y. Zhu, X. Wang, C. Chen, 渡部 俊太郎, 外部共振器 SHG における自己相関紫外光パルス幅測定、第 58 回応用物理学関係連合講演会、2011, 26a-KG-3, 2011/3/26 神奈川工科大学
- ⑥ 関本 大介, 金井 輝人, 兵頭 政春, 張 贇, 渡辺 昌良, 岡田 佳子, X. Wang, Y. Zhu, C. T. Chen, 渡部 俊太郎, 外部共振器 SHG におけるピコ秒光パルス特性の自己相関測定、レーザー学会学術講演会第 31 回年次大会、2011, B.9 10a V 3 2012/1/10 電気通信大学
- ⑦ 渡辺 信義, 金井 輝人, 兵頭 政春, 張 贇, 岡田 佳子, 渡辺 昌良, C. T. Chen, X. Y. Wang, 渡部 俊太郎, KBBF 結晶を用いた準連続発生 VUV 光源高出力化 II 第 70 回応用物理学学会学術講演会、2009, 11a-V-11 2009/9/11 富山大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡邊 昌良 (WATANABE MASAYOSHI)
電気通信大学・情報理工学研究科・教授
研究者番号：00175697

(2) 研究分担者

渡部 俊太郎 (WATANABE SHUNTARO)
東京大学・物性研究所・教授
研究者番号：50143540
(H21 まで)

岡田 佳子 (OKADA YOSHIKO)
電気通信大学・情報理工学研究科・准教授

研究者番号：50231212

張 贇 (ZHANG YUNG)

電気通信大学・情報理工学研究科・助教
研究者番号：00508830