

色素レーザーの高出力化に関する研究

山村 暁 宏

要 旨

有機色素レーザーは、近紫外から近赤外の非常に広い波長範囲に亘って連続的に波長同調が可能であると言う、他のレーザーにはない優れた特徴を持っている。この可変波長特性を利用して、1) 高分解能分光計測、2) ウラン濃縮、3) レーザー・レーダ、4) 医学への応用など極めて広範囲な可変波長レーザー応用が図られている。高分解能分光学は可変波長光を用いて共鳴効果で原子・分子の内部構造を調べる学問であり、可変波長レーザーの出現により近年急速に発達した。また、工業的応用として有望なものにレーザーウラン濃縮がある。1960年代にソ連の Basov らによって提案されたが、当時はあまり注目されず、1980年代になってから急速に研究・開発が行われた。この方式は従来の遠心分離法やガス拡散法に比べ極めて高効率な濃縮が可能である。リモートセンシングの応用としては、共鳴散乱方式レーザー・レーダにより地球超高層大気中の微量成分（アルカリ原子を始めとする様々な金属原子や NO などの様々な分子）の検出がなされ、超高層大気の状態を解明する新しい観測方法として、盛んに研究・開発が行われている。医学への応用では、癌細胞の共鳴蛍光と共鳴吸収を利用して癌の診断が試みられている。非接触でしかも NMR 等と異なり造影剤なしで出来るだけでなく、治療も同時に行えるなど、近い将来癌治療法の主力となるものと期待されている。ただし、これらの研究や応用は現在原理的に成功したものが殆どであり、工学的にまた実生活の場で実用化するには、装置の高出力化・低消費電力化さらに低価格化は不可欠の条件と言える。

色素レーザー装置のうち、比較的容易に大出力が得られ、安価で、しかもメンテナンスも容易な装置の一つに直管型放電管励起色素レーザーがある。本学十文字研究室・内山研究室では、このレーザーが様々な分光計測やウラン濃縮用レーザーの本命のレーザーと考え、20年に亘って研究・開発を行ってきた。その結果、ショートパルスでは 110J/pulse という世界最大のレーザー出力が、ロングパルスでは、発振持続時間 1.47 msec という画期的な超長パルス発振が実現されている。しかしながら、八戸工業大学の研究グループではもちろん、世界の他の研究グループにおいても、その発振効率の上限や出力限界について触れた論文は殆どない。これらのパラメータが何によって制限されるのかが解明出来れば、高分解能分光計測などの理学的応用のみならず、レーザーウラン濃縮、遺伝子工学などへの工学的応用、また医学への応用が今以上に急速に進展するものと思われる。

本論文は、この様な観点から放電管励起色素レーザーの高出力化・高効率化に関する研究を行った。論文は全部で8章で構成されている。

第1章は総論であり、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では色素レーザーの高出力化・高効率化における問題点を調査研究する。レーザー発振効率を新しい観点から調べ直し、従来レーザー出力の大小によらず一定と考えられていたレーザー発

学位記番号と学位：第16号，博士（工学）

授与年月日：平成15年3月20日

授与時の所属：大学院工学研究科電気電子工学専攻博士後期課程

振効率に出力エネルギー依存性があることを発見した。

第3章では調査研究で明らかになったレーザー発振効率を理論的に解析し、発振効率理論式を導き出す。つぎに、この理論式による数値計算結果とこれまでに報告されている実験値を比較・検討し、理論式が妥当かどうかを確かめる。これにより、高出力レベルでは理論値は実験値をよく説明出来るが、低・中出力レベルにおいては実験値が理論値に比べかなり低いことを明らかにした。さらに、発振効率を理論値まで高めるため、放電管励起色素レーザー装置の技術的諸問題を洗い出し、レーザー発振効率を改善するための装置の設計指針を得た。

第4章では前章で得られた設計指針に基づき、新しいコンセプトによる放電管励起色素レーザー装置の試作を行う。すなわち、従来の装置とは全く異なる方式の角形セル・密接励起方式を提案し、高出力化・高効率化を計る。さらに主放電回路の工夫についても詳しく述べる。

第5章では放電管励起色素レーザーの高出力化に有効な放電管予備電離回路の研究について述べる。放電管を自動的にグロー点灯させる方法だけでなく、省エネルギー化の方法についても検討する。

第6章では、以上述べた様々な高出力化・高効率化の工夫を組み入れた新しいコンセプトに基づく試作装置をまとめ上げ、その動作特性について述べる。続いて試作装置によるデータ、およびこれまでに報告されているデータと理論計算値との突き合わせを行う。これにより、提案した発振効率理論式が正しいかどうか確かめる。

第7章では新しいコンセプトによる装置の将来展望について述べる。理論的および実験的検討により得られた様々な装置の改良方法は、放電管励起色素レーザーのどの出力エネルギーレベルまで適応可能であるか、さらにどの程度までの改善率が期待出来るか、詳細に検討を行う。

第8章では、本論文で得られた結果を総括し、全般にわたり検討および考察を行い、結論とする。本研究で得られた成果は、まとめると次の通りである。

1. これまでに報告されている色素レーザー装置の調査研究により、レーザー発振効率には強い出力エネルギー依存性があること発見し、Yarivの線形理論によりレーザー発振効率理論式を求めた。
2. 従来方式の装置は低出力レベルおよび中出力レベルで発振効率が、理論計算値に比べ非常に低いことを示した。
3. 色素レーザー装置の技術的諸問題を理論的に検討し、高出力化・高効率化の設計指針を得た。
4. 新しいコンセプトに基づく装置を試作し、従来の5倍以上の発振効率を実現した。
5. 得られたデータおよびこれまで報告されているデータを理論計算結果と突き合わせ、提案した理論式が正しいことを確かめた。
6. 低出力レベルと高出力レベルの装置では十分満足行く発振効率を得られたが、中出力レベルの装置には改善の余地があることを明らかにした。

以上である。

主指導教員 十文字正徳

A study on High-Energy Dye Lasers

Akihiro YAMAMURA

Abstract

Organic dye lasers are widely tunable from near ultra violet to near infrared wavelengths, and have been employed in a variety of applications, including high resolution spectroscopy, uranium enrichment, resonance scattering laser radar, and in medicine. High resolution spectroscopy has developed rapidly using tunable dye lasers and has revealed structural details of extremely complicated atoms and molecules. Laser uranium enrichment was first proposed by Basov in the 1960s, but did not immediately attract much research attention. However, this method has been developing rapidly since the 1980's, and has become industrially promising. The method offers a simple processing procedure, excellent isolation factors and low energy consumption compared to conventional enrichment methods. Application of dye lasers to remote sensing has also been studied by many workers, with the more minor constituents of the upper atmosphere being detected by resonance scattering laser radar. This technique is expected to lead to a new generation of atmospheric observation methods. The use of organic dye lasers in medical applications has also produced promising results. Diagnosis and treatment of cancer have been studied through resonance fluorescence and resonance absorption induced by the irradiation of cancer cells with a dye laser beam. Laser cure is a non-contact method that does not require contrast medium additives, in contrast to NMR diagnosis. However, high output power and energies as well as good tunability and low cost are required to make these applications feasible.

Various dye laser excitation methods have been developed to obtain high energies, high beam quality and good tunability. Among these, linear flashlamp-pumping is very promising because it delivers high output energies, good tunability, ease of maintenance and low cost compared to other excitation methods. M.Jyumonji and H.Uchiyama of our institute have been researching and developing flashlamp-pumped dye lasers for high resolution spectroscopy and uranium enrichment over the last 20 years. As a result, very high laser output energies of 110 J/pulse have been achieved in short pulses, while longer pulses with durations of up to 1.47 ms have been achieved. However, the upper limits of lasing efficiency and output energy have not yet been explored in detail either theoretically or experimentally. If the parameters needed to reach these upper limits can be found, organic dye lasers could be applied to an even wider range of tunable laser applications. This study examines lasing efficiency and output energies of organic dye lasers. The paper consists of 8 chapters.

An introduction to and historical background of dye laser technology is presented in chapter 1. Chapter 2 describes technical problems that arise when developing high energy,

high efficiency dye laser apparatus. Through investigation of the existing body of data regarding flashlamp-pumped dye lasers, it has been found that laser efficiency depends strongly on laser output level. An expression for laser efficiency calculated from Yariv's theory is presented in chapter 3, along with numerical results. The analysis agrees well with the experimental results reported by many researchers regarding higher output levels, and additionally suggests that laser efficiencies at lower output levels are quite low. To improve laser efficiency at lower output levels, a new laser design is proposed. The new laser design is then described in more detail in chapter 4. A close-coupled cavity containing a rectangular dye cell and long circular reflector is used for dye excitation. A flashlamp drive circuit that enables multiple flashlamps to be operated in either serial or parallel operation is also presented.

Chapter 5 describes a flashlamp pre-discharge circuit for realizing a stable main discharge and enhancing dye laser output. This newly developed circuit features self-starting operation and very low power dissipation.

In chapter 6, the performance of the newly developed dye laser apparatus is demonstrated. Data obtained from operation of the device is compared to theoretical predictions. This analysis verifies the correctness of the theoretical analysis.

Chapter 7 looks at the future prospects of flashlamp-pumped dye lasers, particularly with respect to the newly proposed design. The applicability of the derived theoretical laser efficiencies to higher laser output levels is also discussed, along with possible efficiency improvements.

Results of this study are summarized in the last chapter, and are :

1. Laser efficiency was found to be strongly dependent on laser output energy level. Laser efficiency was derived theoretically using linear Yariv theory.
2. Theoretical analysis revealed that laser efficiency previously reported at lower output levels is extremely low compared with that of higher output levels.
3. A theoretical study of the technical problems in standard organic dye laser apparatus led to the design of a new high energy, high efficiency dye laser.
4. Dye laser apparatus was developed based on this new design idea. Extremely high output energies, 5 times those previously reported, were achieved.
5. Theoretical predications were in good agreement with both the performance of older dye laser apparatus and performance of the newly developed apparatus, confirming the correctness of the theoretical analysis presented.
6. The efficiencies of flashlamp-pumped dye laser are satisfactory at both low and high output levels. However, efficiencies at medium output levels still need to be improved considerably.

Professor (Chairperson) Masanori JYUMONJI