可撓中空導光路のパルスCO₂レーザー伝送（Ⅱ） Flexible Hollow Light Guide for High Peak Short Pulse CO₂ Laser（Ⅱ）

橋新裕一、久保宇市

Yuichi HASHISHIN and Uichi KUBO

近畿大学理工学部

Fac. of Sci., & Technol. Kinki University

ABSTRACT

High-peak, short-pulse CO₂ lasers now have a function of sharply cutting biotissues with little thermal damage to them. One may predict that pulse CO₂ lasers will soon be applied to various surgical systems. In so doing, however, these systems must have a laser delivery system for effectively concentrating laser beams, methods for which are being developed by many research groups. Our hollow delivery guide will pave the way for that purpose.

The hollow guide utilizes the rectangular cross-section of a thin aluminized plates separated from each other with a dielectric insulators sandwiched between these plates. The guide provides a transmittance of 90 %/m. To enhance laser transmittance in delivery guides, the laser radiation linearity must be polarized. Also, the transmittance of a guide is determined by the degree of damage caused to the surface of an aluminum reflector installed at the end of the guide's incident part.

We have solved these problems so our hollow guide has a maximum incident peak power of 1.7 MW/pulse and a radiative peak power of 1.5 MW/pulse. Radiative laser beams are focused on a diameter of 0.6 mm. As a result, a laser device equipped with our delivery guide has marked a peak power density of 540 MW/cm², a value enough for cutting biotissues.

The aluminum hollow guide we have developed has thus proved useful as delivery guides for medical pulse CO₂ laser systems.

1. はじめに

レーザー光のパワー伝送は可視・近赤外域で、石英光ファイバーを用いて実現されているが、赤外および紫外域レーザーのパワー伝送系は未だ確立されていない。ここでは、赤外域のCO₂レーザーのパルスパワー伝送を目的とした伝送系として、アルミニウム中空導光路を検討した。この中空導光路は光ファイバー形式に比べ、レーザー光の伝送領域が空気であるから高尖頭値のパルスレーザー伝送に対する損傷耐力に優れる。導光路の長さは、レーザー発振器から被照射物までの比較的短距離（1～3 m）とレーザー装置室から手術室・測定室までの比較的長距離（10～100 m）の導光路の開発を計画している。本論文ではこのうち前者の短距離（1 m）導光路の高尖頭値短パルスCO₂レーザーの伝送特性について調べた。

2. 中空導光路の構造

中空導光路の材料および構造は、連続発振CO₂レーザーの導光路として開発したものと同じである。反射材にはA1薄板、スペーサーにはテフロン、被覆にはポリエチレンを用いた。使用した導光路の外観と寸法を図1に示した。

3. 実験装置および方法

パルス（TEA）CO₂レーザーの仕様を表1に示した。表のごとく、装置はかなり大型である。また、レーザー光は非偏光ビームであり、サイズの大きいゼブラモードの矩形状である。

図1 中空導光路の外観と寸法

レーザー光と導光路の結合方式を図2に示した。

非偏光のレーザーをZnSe板を通して偏光させる。偏光したレーザー光の電界ベクトルの向きを導光路断面の長辺方向に合わせる。矩形状のレーザー光をシリンドリカルレンズで線状に集光して図2のごとく、導光路に入射させる。入射ビームの導光路入射端におけるサイズは6×0.2mmである。

4. 伝送率の偏光度依存性

入射ピークパワーを変えて、導光路からの放射パワーを調べた。その結果を異なる偏光度のレーザーで比較し、図3の結果を得た。導光路断面の長辺方向に平行な電界ベクトル成分をもつレーザーパワーを $P_{\parallel}$ 、垂直成分のレーザーパワーを $P_{\perp}$ で表した。発振器からのビームは非偏光であり、両者のパワー比は1：1のそれぞれ50%である。このビームをZnSe板を用いて、図に示したパワー比に変え、導光路に入射させた。図のごとく、 $P_{\parallel}$ 成分91%の場合に伝送率の高いことが判る。この場合、導光路長100cmの伝送率は90%であった。

表1 パルス（TEA）CO₂レーザーの仕様

Wavelength	: 10.6μm
Peak power	: 22MW
Energy	: 1.8J/pulse
Pulse width	: ca.80ns
Repetition	: under 10pps

Size(Head) : W55×H58×L115cm
Weight(Head): ca.100kg
Electrical power : AC3φ200V,20A

図2 レーザー光と導光路の結合方式

図3 中空導光路の入出力特性

一方、 P_H 成分85%の場合には長さ20cmで80%の伝送率であった。従って、入射レーザービームの偏光度が伝送率に大きく影響することが判った。

更にその影響を明らかにするため、導光路長を変えて伝送率を調べ、その結果を図4に示した。尚、図の縦軸は対数目盛である。図のごとく、 P_H 91%の場合には導光路長に対して伝送率は指数関数的に減衰することが判った。これに対し、 P_H 85%の場合には伝送率が低く、導光路長10cmを境にして伝送率の減衰の傾きが異なる。10cm以上の長さの場合、減衰の傾きは P_H 91%の場合と同じである。この原因は P_V のパワーの長さに対する減衰が大きいためである。従って、伝送率向上には直線偏光(P_H :100%)のレーザービームが必要である。

図4 伝送率と導光路長

5. 中空導光路のパワー伝送限界

入射ピークパワーを変えて放射パワーを調べ、入射伝送でき得るパワー伝送限界を調べた。パルス繰返し10 pps、導光路長20 cmの場合の結果を図5に示した。図のごとく、1.7 MWまで入射伝送させることができたが、これ以上のピークパワーでは、導光路入射部が損傷した。この場合の入射エネルギーは140 mJ/pulseであった。ピークパワー密度、エネルギー密度はそれぞれ57 MW/cm²、4.7 J/cm²・pulseである。

連続発振CO₂レーザーの伝送では、入射パワー100Wまで入射伝送が可能であり、損傷・伝送率の低下はみられなかった^{1,2)}。この場合、1秒間伝送時の入射エネルギー密度は、約3.3 kJ/cm²に達し、前述のパルスレーザーの47 J/cm² (10 ppsの場合)に較べて70倍以上である。従って、A1反射面損傷の原因は、連続入射パワーの熱蓄積によるものではなく、入射ピークパワー密度が高いためと考えられる。使用したA1反射面は電界研磨が施されているが、顕微鏡観察によると幅8 μ m以下の線状の溝が伝送軸方向にみられた。損傷部では20 μ m程の溝に広がっていた。従って、パルスレーザー光はこの溝に吸収されたため、溝が広がり、伝送率が低下したと考えられる。更に高出力のピークパワー伝送を実現するためには、A1反射面の研磨方法を検討し、面精度を向上することが必要である。

図5 中空導光路の伝送限界

6. 中空導光路の横モード変換

発振機からのレーザー光の横モード（ビーム断面の強度分布）は表1に示したごとく、連続発振CO₂レーザーの単一モードとは異なり、矩形状のゼブラモードである。また、表のバーンパターンの縦と横方向のビーム拡がり異なる。このようなビームは一点に集光するのが困難な上、単一モードの場合に較べて集光径は大きくなる。このビームは中空導光路を伝送すると矩形状の強度分布を持つレーザー光に変換される。横モード変換に必要な導光路の長さは約30 cmであった。これらの様子を図6に示した。

長さ100 cm の中空導光路を伝送放射されたレーザー光は導光路断面の長辺方向にはほとんど拡がらず、短辺方向に約3°で拡がる。このビームをシリンドリカルレンズと凸レンズで集光すると約0.6 mm ϕ の円形状に絞られる。

現在得られている最大入射パワー、放射パワーおよび放射パワー密度などをまとめて表2に示した。表のごとく、放射パワー密度は540 MW/cm²、エネルギー密度は43 J/cm²であり、生体切開に十分可能な値が得られた。

7. まとめ

高尖頭値短パルスCO₂レーザーの伝送系として、A1中空導光路を検討した結果、以下のこ

が明らかになった。

- (1) 長さ100 cm あたりの伝送率は90%であり、この値は連続発振CO₂レーザー伝送の場合と同じであることが確認された。
- (2) 入射レーザービームの偏光度が、伝送率に大きく影響することが明らかになった。パルスCO₂レーザーは非偏光であり、これを赤外光学素子で偏光させているが、現状では未だ完全な直線偏光ビームが得られていないので改善が必要である。
- (3) 入射できうる最大ピークパワーは1.70 MW（パワー密度:57 MW/cm²）であり、長さ100 cm を伝送して得られる最大放射パワーは1.53 MWであった。これ以上のパワーでは、導光路入射部のA1反射面に損傷の生じることが判った。この原因はレーザー光のピークパワー密度により、エネルギー蓄積による熱破壊ではないことが明らかになった。伝送パワー向上のためには、A1反射面の研磨法を検討する必要がある。
- (4) 放射ビームを集光して得られる最小ビーム径は0.6 mm ϕ であり、最大ピークパワー密度は540 MW/cm²に達した。

以上のことから、A1中空導光路は高尖頭値短パルスCO₂レーザーの伝送系として実用できることが判った。

図6 中空導光路の横モード変換

参考文献

- 1) 橋新、久保：日本レーザー医学会誌、Vol. 6, No. 3, p. 359-362 (1985).
- 2) U. Kubo, Y. Hashishin : Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Engin., Vol. 713, p. 17-21 (1986).

表2 最大入射・放射パワーと集光特性

	Incidence → Delivery (Tube length : 1m)	Focused beam intensity (0.6mm diam.)
Peak power	1.70 MW/pulse → 1.53 MW/pulse	540 MW/pulse·cm ²
Pulse energy	136 mJ/pulse → 122 mJ/pulse	43 J/pulse·cm ²
Average power (10pps)	1.36 w → 1.22 w	430 w/cm ²
Pulse duration	80 ns → 80 ns	