レーザーメス用KRS-5ファイバ

KRS-5 Optical Fiber for Laser Scalpel

池戸 才 石渡裕政 立石文和 渡 正文

Masaru Ikedo, Hiromasa Ishiwatari,
Fumikazu Tateishi and Masafumi Watari

松下電器産業(株) 中央研究所

Central Research Laboratory
Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.

Abstract

KRS-5 (TlBr-TlI) fiber for high power transmission has been developed. The most preferable composition for the fiber has been investigated to be 43 weight % TlBr, and under this composition the fiber with 0.5 mm diameter and 1.5 m length has excellent characteristics as follows. (1) High output power of 70 watts, (2) high transmissibility of more than 90%, (3) minimum bend radius of 10 cm.

This fiber has been put into practical use for CO₂ laser scalpel. The scalpel has almost same incision capability and excellent flexibility in comparison with mirror joint CO₂ laser scalpel.

1. はじめに

CO₂ レーザメス用導光路として、現在ミラー多関節型のものが用いられているが、操作性の向上とレーザ内視鏡とを目的として、赤外ファイバの開発が活発に行なわれている。

現在、パワー伝送用光ファイバとして研究開発されている材料は、カルコゲンガラスと金属ハロゲン化物である。金属ハロゲン化物であるタリウムハライドは、赤外光学結晶として良く知られており、KRS-5結晶(TlBr-TlI固溶体)

は、1940年代にドイツで開発され、赤外分光器の窓材として使われる安定な材料である。

1978年、D.A. Pinnow⁽¹⁾らにより、加熱押出しでファイバ化が可能であることが報告され、それ以来活発に開発⁽²⁾が行なわれている。我々は、TlBr-TlI結晶の赤外透過性と、加工性に着目し、組成比を検討して、光学のおよび機械的な面からファイバとしての最適条件を見出し、良好な結果を得たので報告するとともに、レーザーメスへの応用展開を試み、屈曲性や切開能などの

実用的な知見を得たので合わせて報告する。

2. KRS-5 (TlBr-TlI) ファイバの製造法

第1図にKRS-5 ファイバの製造法を示す。KRS-5 結晶は、ブリッジマン法などにより数mm/時間の結晶成長速度で製作する。ファイバ化は加熱押し出し装置を用い、押し出し温度は200～270℃、7～10 ton/cm² の圧力を加え

図1 KRS-5 ファイバ製造フローチャート (TlBr-TlI)

数cm/分の速度でファイバを押し出す。このようにして押し出されたファイバは粒径が約10～50μmの多結晶になっている。高パワーのレーザ光を入射させるには端面が滑らかで研磨の際に低粒が混入しないことが大切であり、0.05μm以下の粗さに仕上げる。

また端面には3層構造 (As₂Se₃/KCl or PbF₂/As₂Se₃) からなる反射防止膜を蒸着し、端面でのレーザ光の反射損失を無視できる程度に

する。

3. KRS-5 ファイバの光学特性

伝送効率

第2図に組成比別CO₂レーザの伝送効率を示す。

TlBr-TlIの組成比を変化させると、CO₂レーザの伝送効率が変わり、TlI単体では、透過しないが、TlBr 30wt% 付近から透過し始め、

図2 TlBr-TlI 組成比変化と伝送効率

TlBr 40～95wt%では、64～69%の伝送効率を示す。TlBr単体は非常に軟かい材料であり、研磨が難しく、極度に曲げるとすぐ塑性変化を生ずる。ファイバとして耐屈曲性などに影響ある弾性変形する領域で、曲げ半径が最も小さくなる組成はTlBr 43wt%近辺である。

パワー伝送用光ファイバとしてはTlBr 43wt%の近辺が最も優れている。

この組成で直径0.5mm、長さ1.5mのファイバを作り、反射防止膜を付けずに、105WのCO₂レーザ光を入射した所、70Wの出力を得、数時間まったく問題なく伝送することができた。

反射防止膜

KRS-5ファイバは屈折率が大きく (n=2.37)、CO₂レーザ光の反射損失が入出射端合計で約28%生ずる。

反射防止膜を付けることにより、反射損失を2%以下に減少させることができるので重要な技術である。

第3図に三層構造を有する反射防止膜についての概念図を示す。第一層目のカルコゲンガラスは、KRS-5と結晶性材料であるKClやPbF₂と

図3 三層構造の反射防止膜

の密着性を向上させ、第三層のカルコゲンガラスは耐湿性向上の意味での保護コートの役割をする。 $\text{As}_2\text{Se}_3 / \text{KCl} / \text{As}_2\text{Se}_3$ や、 $\text{As}_2\text{Se}_3 / \text{PbF}_2 / \text{As}_2\text{Se}_3$ の膜の耐パワー性は優れており、 CO_2 レーザ光（連続）9.5Wを $0.35\phi\text{mm}$ に絞り入射した時、8.7Wの出力を得、反射損を含む伝送効率9.2%を示し、9.5W入力にも耐える事を確認した。

第4図は CO_2 レーザ光（ $10.6\mu\text{m}$ ）に対して最も透過率が良くなるように作った膜の分光透過特性を示す。すなわち、 $10.6\mu\text{m}$ に対して、而

図4 反射防止膜の分光透過率

面共9.9%であるが、波長が $10.6\mu\text{m}$ からずれると透過率は大幅に変化する。すなわち、 $10.6\mu\text{m}$ に対して最適となるような膜厚を選んでいる。

曲げ特性
第5図に、ファイバを曲げた場合に生じる伝送効率の変化を示す。

曲率半径10cmで90°の曲げに対して4～5

図5 曲率半径と伝送効率変化

%の減衰を示し、5cmまで曲げても7～8%の減衰である。180°曲げた場合は90°の場合のほぼ2倍であり、限界曲げ半径は3～4cmである。

4. レーザメスへの応用

1) 穿孔および切開能⁽³⁾

第6図はレーザメス用光ケーブルの外観を示す。

図6 レーザメス用光ケーブル

レーザ入射部、ケーブル、ハンドピースからなり、最小曲げ半径は安全性を重視して、1.5cm以下にならないような構造を採用している。

第7図にアクリル樹脂に穿孔した実験結果を示す。第6図に示した光ケーブルを用いて、 CO_2 レーザ出力30W、3秒間の照射において、絞り角 θ を変化させ穿孔深さを測定した。 θ が27°から8°と小さくなる（ビームスポット径は大きくなる）につれて深くなり、 $\theta=8^\circ$ で最大30mmに達する。比較のためレーザ光を直接レンズで集光した結果も示す。（ $\theta=6^\circ$ は $f=63.5\text{mm}$ 、 $\theta=14^\circ$ は $f=25.4\text{mm}$ のレンズ）。

穴径はファイバの方が大きい、穿孔深さはほぼ同程度である。

図7 アクリル穿孔深さ試験

第8図にカマボコを一定速度で切開した時の切開面の断面を示す。出力30W、切開速度0.5mm/secでは切開の深さ17mm程度であり、十分な切開能が認められた。

図8 切開実験 (30W出力、カマボコ)

2) 信頼性

ハンドピースの構造を第9図に示す。

KRS-5ファイバはSUSチューブに入れ、

図9 ハンドピースの構造

入射部、出射部は固定されている。ファイバからの出射光はZnSeのレンズを通して、スポット径0.35φmmに絞られる。ガイド光はHe-Neレーザを2本のプラスチックファイバで導びき、CO₂レーザ光の照射野が明確になるように工夫されている。また、安全面から、ケーブルは密閉構造になっており、万一ファイバに異常が生じた場合には、熱電対を応用した異常検出センサーが作動し、レーザ光の発振を止める機構になっており二重の安全機能を有している。

KRS-5ファイバを光ケーブルに組み込み、30W出力の連続試験を行なった結果を第10図に示す。35W入力で、出力30W(85%の伝送効率)となり、500時間経過後5%、1000時間で11%の減衰を示し、連続耐パワー性も非常に優れている。

図10 連続出力試験 (30W, 静止)

第11図に連続動作試験結果を示す。実際に使用される場合を想定し、光ケーブルをほぼ90°

曲げた状態で横方向30cm、縦方向20cm、移動スピード10cm/secで連続動作実験を行なった。連続200時間(移動回数18万回)で5~6%、500時間(45万回)で10%程度の減衰を示し、実用的な観点からも充分信頼性があるものと考えられる。

図 11 連続出力実動作試験 (30 W)

3) ファイバ式CO₂ レーザメス

第12図にファイバ式CO₂ レーザメスの外観を示す。レーザ発振管は封じ切りレーザ管を用いており、触媒機能を有するペロブスカイト酸化物であるセラミック電極を使っていることから、混合ガス(CO₂、N₂、Heの混合)ボンベと真空ポンプが不用となり小型になっている。また電

図 12 ファイバ式CO₂ レーザメス

源は交流100V、12Aなので一般コンセントが使用できる。

レーザメスの主な仕様を表1に示す。

表1 ファイバ式CO₂ レーザメスの仕様

赤外ファイバ	材 質: KRS-5 (TlBr-TlI 結晶) 伝送効率: 90%以上 径、長さ: 0.5φmm、1.5m
レ ー ザ 管	封じ切りCO ₂ レーザ (波長10.6μm)
出 力	0 ~ 30 W (可変)
導 光 路	方 式: 赤外光ファイバー方式 長 さ: 1.5 m 太 さ: 直径 8 mm 制限曲率半径: 15 cm 伝 送 効 率: 82 %
ガ イ ド 光	He-Ne レーザ光 2 軸交差
電 源	100 V 12 A
外 形	幅 320、奥行 700、高さ 900 (レーザ部 1600) (mm)

4) 臨床実験例

本仕様の装置を用いて脳神経外科2ヶ所、形成外科2ヶ所の計4ヶ所の病院で臨床実験が行なわれた。

脳神経外科では、大半が脳腫瘍の摘出手術に用いられ、使用法は蒸散が多く、次いで止血、切開、凝固の順であった。パワーは出力15Wが最も多く使われた。

形成外科の使用例では、色素性母斑が最も多く、ホクロ、イボの順で使われ、3W出力での使用が多く、次いで10Wであった。

これらの臨床結果から、ファイバ式のレーザメスは操作性が優れており、切開能力も十分あることが認められた。また顕微鏡手術では側壁の有効照射が可能であり、ファイバ化の有用性が判明した。さらにガスボンベが不要になったので、小型化とパネルの単純化が可能となり、メンテナンス

が容易であることが認められた。

5. まとめ

細くて、高パワーを伝送できるKRS-5ファイバを用いることにより、出射レーザ光のスポット径が絞れるので切開能に優れ、操作性の良いレーザメスが開発でき、臨床実験等でもこれらの点を確認された。

最後に、臨床実験に当り御援助頂いた各先生方に感謝致します。本開発に当り御指導頂いた中央研究所 広田副所長、南出GMに感謝致します。また封じ切りレーザ発振管および反射防止膜に関し御協力頂いた、松下技研（株）軽部、宮田両主任研究員をはじめ、関係各位および中央研究所の各位に感謝致します。

参考文献

- (1) D. A. Pinnow, et al. : Appl. Phys. Lett. 33, 28 (1978).
- (2) J. A. Harrington : SPIE Proceedings, 227, 133 (1980).
- (3) 立石ら; 医用電子と生体工学, 22, 818 (1984).