高NA石英ファイバによる高密度レーザー伝送

内海 厚、 渡部 民重

三菱電線工業株式会社 医療機器開発室

High Density Laser Power Transmission with High NA Silica Fiber

Atsushi Utsumi, Tamishige Watanabe

Department of Medical Instrument, Mitsubishi Cable Industries Ltd., Itami

A high NA silica fiber has been developed by Mitsubishi Cable Industries Ltd. for the exclusive application to ultrathin fiber scopes and small diameter catheter which are used for various micro diagnosis and therapy in the body. This report describes the detailed study of high density laser power transmission on this high NA silica fiber. Following fibers were utilised for this study

- Ge doped silica glass core-B · F. dope silica glass clad fiber (HiNA / All silica) - 0.43NA
- Ge doped silica glass core - polymer clad fiber (HiNA / PCF) - 0.53NA
- Pure silica core-B · F dope silica glass fiber (Pure silica core / All silica) - 0.20NA
- Pure silica core-polymer clad fiber (Pure silica core / PCF) - 0.40NA
- Tapered fiber of both types
- Core diameter covers 50~500 μ m

And the laser utilised are,

- 50W CW Nd-YAG ($\lambda = 1.06 \mu$ m)
- 15W pulse KTP Nd -YAG ($\lambda = 1.06, 0.53 \mu$ m)
- 25W Diode laser ($\lambda = 0.806 \mu$ m)

As results

- 70% power transmission, 34W out put power and 17.3 KW out put power were achieved for CW Nd-YAG laser and HiNA / All silica fiber having 56 μ m core diameter.
- Break down thresh old power of HiNA fiber to puls Nd-YAG laser was 1/2~1/10 of that of pure silica fiber.
- On diode laser transmission with a taperd fiber having 400 μ m core diameter of laser input portion 160 μ m core diameter of out put portion and 0.53NA, 70% power transmission and 17.5W out put power were achieved.

Key word : high density laser power transmission, high NA silica fiber, thin laser fiber for medical use, fiber dilivery of laser energy, taperd fiber

1. 緒言

低侵襲的医療技術の大きな流れの1つは内視鏡下手術やカテーテル手術である。これにレーザー治療が加わった医療技術は既に定着したものもあり、且つまた現在急速に進展中である。このレーザー治療にはファイバ伝送が殆んど不

可欠である。ファイバには一般に、高い機械的強度、可撓性、化学的安定性と共に、低損失で高密度のレーザーエネルギーを患部まで輸送する高品質の光伝送特性が要求される。石英系ファイバはこの条件を満たす最良のものとして現在紫外域のエキシマレーザーから赤外域の

表2 実験に用いたレーザー

種 類	Nd-YAG	KTP Nd-YAG	Diode Laser
メーカ	NEC	Spectra Physics	Diomed
型 式	SL-114	GCR-4	—
波長 (nm)	1060	1060, 530	805
モード	マルチモード 連続波	シングルモード パルス	マルチモード 連続又はパルス
パルス巾	—	7~9nsec 300~350nsec	0.1~9.9sec
最大出力 (W)	50	15	25
拡がり角 (mmR)	6~10	0.5	—

Ho-YAGレーザーまで広く使用されている。しかしながら通常の石英系ファイバはコアとクラッドの屈折率差で決まるNA (Numerical Aperture, 開口数) がそれ程大きくないためビーム径や拡がり角の大きなレーザー種では細径ファイバへの入射効率が悪くなりファイバの細径化を阻んでいる。一方で適用部位の拡大により内視鏡やカテーテルは確実に細径化が進んでおり、近い将来マイクロマシンの内視鏡やカテーテルが登場すると予想されている¹⁾。このような流れの中でこれらに搭載してマイクロレーザー手術を可能にする極細径レーザーファイバを用いた高密度レーザー伝送技術の要求が高まっておりこの技術の開発を行っている。本報では、高NA化によるファイバの細径化の検討結果を報告する。

2. レーザー伝送実験

- 1) 測定装置構成: 定法²⁾³⁾ によった。レーザーの種類によっては集光レンズの焦点距離 (f) をパラメータとした。
- 2) ファイバ: 供試したファイバの諸元を表1に示す。
- 3) レーザー: 実験に用いたレーザーの諸元を表2に示す。

表1 供試ファイバの諸元

種 類	材 質			NA	ファイバサイズ
	コア	クラッド	ブリコート		コア径 (μm)/クラッド径 (mm)
高NA/全石英	GeO ₂ ドープ SiO ₂	B・Fドープ SiO ₂	エポキシ アクリレート	0.43	56/70, 80/100, 125/150 240/300, 400/500
高NA/ポリマクラッド	GeO ₂ ドープ SiO ₂	シリコン	—	0.53	100/150, 200/250, 300/350
純石英/全石英	SiO ₂	B・Fドープ SiO ₂	エポキシ アクリレート	0.19	50/125, 100/150, 200/250
純石英/ポリマクラッド	SiO ₂	含フッ素系 ポリマー	—	0.37	200/230

3. 結果と考察

1) 損失波長特性

供試したファイバの損失波長特性を図1に示す。高NAファイバは波長450nm以下の短波長域では伝送特性が過大となり実用的でないが可視域では標準の純石英コアファイバと同等であり、赤外域ではむしろ低損失である。

図1 供試ファイバの損失波長特性

2) CW Nd-YAGレーザー伝送特性

結果を表3及び図2に示す。高NA/全石英ファイバでは出射パワーはレンズ焦点距離 f に依存する。これは $D=2f\theta$ (θ は拡がり角) によって定まる集光ビーム D が f に比例するからである。発振ビーム径と f とで定まる入射角がファイバの入射臨界角 $\theta_c = \sin^{-1}(NA)$ より小さい範囲においては f が小さい程、より細いファイバと高効率で結合する。純石英/全石英ファイバで $f=5$ の場合にコア径 $120\mu m$ で急激に低下しているのは NA が小さいからである。

表3 CW Nd-YAGレーザーを用いた伝送実験結果
出射パワー、(W)

ファイバ	コア径 Pin	5mm		8.5mm		30mm	
		10W	50W	50W	10W	50W	
Ge ドープ / MRT	50	6.8	33.9	損傷	0.88		
	83	7.8	35.0	34.2	1.1		
	125	7.7	36.0	35.0	3.4		
	240		36.7	36.7	8.6	26.8	
Ge ドープ / PCF	100	8.1	35.2	34.5	2.2	損傷	
	200	8.2	36.5	35.2	7.3	損傷	
	300			35.5	9.0	32.5	
純石英 / MRT	50	4.6	損傷	損傷	損傷		
	100	5.6	損傷	損傷	損傷		
	200	7.0	29.5	損傷	7.0	25.8	
純石英 / PCF	200			損傷	5.1	損傷	

f : 集光レンズ焦点距離、Pin: 入射パワー

図2 CW Nd-YAGレーザー伝送特性
ファイバ出射パワーのコア径、 f 依存性

3) パルスKTP Nd-YAGレーザー伝送特性

結果を表4に示す。パルスレーザーにおいても破壊入射パワーは f に依存する部分が多いことは2)の結果と同様である。またコアの単位断面積当りのピークパワー W_{pa} はショートパルスではGeドープコアと純石英コアに大差はなさそうであるが、ロングパルスになると純石英の方が数倍高い。これは熱効果に基づくものでGeドープ石英の軟化温度が純石英に比べ低いことによるものと考えられる。

表4 パルスKTP・Nd-YAGレーザー伝送実験結果

入射条件 ファイバ	波長	nm	1064				532	
	パルス巾	nsec	400	8	400	400	8	300
	周波数	Hz	10	10	10	10	10	10
	レンズ f	mm	20	20	30	50	50	50
	集光ビーム径	μm	25	25	38	62	62	62
高NA/全石英 120/150	Wb	W	1.0	0.015	1.5	2.5	0.02	1.5
	Wp	W	3×10^5	2×10^5	4×10^5	6×10^5	2.5×10^5	5×10^5
	Wpa	W/mm ²	6×10^8	4×10^8	4×10^8	2×10^8	8×10^7	2×10^8
高NA/全石英 200/250	Wb	W	1.0	0.02	1.5	3.0	0.04	2.0
	Wp	W	3×10^5	2.5×10^5	4×10^5	8×10^5	5×10^5	7×10^5
	Wpa	W/mm ²	7×10^8	5×10^8	4×10^8	3×10^8	2×10^8	2×10^8
高NA/全石英 320/400	Wb	W	1.5	0.03	3.5	8.0	0.04	6.0
	Wp	W	4×10^5	4×10^5	9×10^5	2×10^6	5×10^5	2×10^6
	Wpa	W/mm ²	8×10^8	8×10^8	8×10^8	4×10^9	2×10^8	4×10^9
純石英/全石英 200/250	Wb	W	6.0	0.03	8.0	12	0.08	10
	Wp	W	1.5×10^6	4×10^5	2×10^6	3×10^6	1×10^6	3×10^6
	Wpa	W/mm ²	3×10^9	8×10^8	2×10^9	1×10^9	3×10^8	1×10^9

Wb: 破壊入射パワー、Wp: 破壊時のピークパワー、Wpa: W_p /集光ビーム断面積

4) ダイオードレーザー伝送特性

Diomedレーザーはレーザーの性質上、集光ビーム径は比較的大きいようであり、専用に装備された標準ファイバはNA 0.4、コア径400 μ m、600 μ m及び1000 μ mのポリマクラッド型である。レーザーの光学系は固定であるのでfを変更できず高NA/全石英ファイバを用いても伝送率70%の使用可能コア径下限は280 μ mであった。

5) テーパーファイバ伝送特性

テーパーファイバ伝送が成立する条件は $R=d_0/d_i \leq \text{ファイバ NA} / \text{入射 NA}$ (d_0 入射側コア径、 d_i 出射側コア径)である。この条件を満たすテーパーファイバを作成し、集光ビーム径の大きいダイオードレーザーを用いて伝送特性を測定した。図3にその結果を示す。NA 0.53、入射端コア径400 μ m、出射端コア径160 μ m $R=2.5$ の高NA/ポリマクラッドファイバで伝送率70%、出射パワー17.5Wを得た。このことから入射のNAは0.2~0.25と推定される。テーパーファイバ伝送の利点は入射パワー密度小、出射パワー密度大、入射容易、先端フレキシブル等であり、高密度レーザー伝送の有効である。

4. まとめ

細径の内視鏡やカテーテルに搭載して体内微細部の治療に適用することを目的として高NAファイバを開発し、これを用いて高密度レーザー伝送の検討を行った。CW-Nd:YAGレーザーではコア径50 μ mで伝送率70%以上、出射パワー35W、出射パワー密度17.5KW/mm²の伝送が可能であった。高NAファイバのパルスレーザー破壊のしきい値は純石英コアファイバの1/2~1/10であった。ダイオードレーザーでは、入射部コア径400 μ m、出射部コア径160 μ m NA 0.53のテーパーファイバで伝送率70%、出射パワー17.5Wの伝送が可能であった。

5. 文献

- 1) 藤正、中島、鎮西、井街、マイクロマシニング・ノートブック、秀潤社、1991
- 2) 光学技術ハンドブック、朝倉書店、1988
- 3) 栗原、黒野、OQE 87-66

図3 テーパーファイバによるダイオードレーザー伝送