

側面研磨フッ化物ファイバカプラの開発

1833012 石井知広

主任指導教員：武者満 指導教員：白川晃

1. はじめに

次世代の周波数基準として期待されているストロンチウム(Sr)光格子時計は光格子作成用の光源にTi:sapphire レーザーを使用しており、衛星搭載等の可搬型光格子時計開発においてその大きさや長期連続動作の信頼性が問題となっている。トラップ用レーザーの要求値は中心波長が813.42nm、周波数線幅が1MHz以下、出力が1W以上であり、我々はトリウム添加フッ化物(Tm³⁺:ZBLAN)ファイバ増幅器を用いて小型・堅牢なファイバ MOPA (Master Oscillator Power Amplifier)システムを開発してきた(図1)。開発した光源は波長、線幅、出力は要求値を満たしたが、ZBLANファイバ端面の熱負荷から長期安定動作が困難であった。やはりシリカ-ZBLANの融着が技術的に難しいことから Tm³⁺:ZBLAN ファイバ増幅器が空間光学系を持つことを含め、ZBLAN ファイバに対して熱を加える加工が困難であることが問題の根幹にあり ZBLANファイバの普及を妨げている。そこで本論文では熱を用いないことで以上の問題を克服するオプティカルコンポーネントとして側面研磨シリカ-ZBLAN ファイバカプラの開発について報告する。

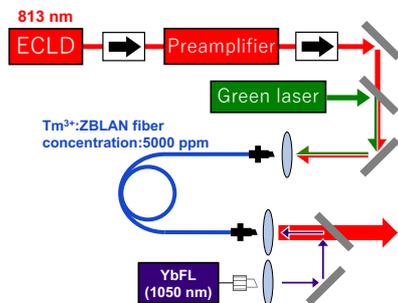


図1 本研究室で開発中の Tm³⁺:ZBLAN ファイバを用いた 813 nm 光源

2. 背景

2.1 ZBLAN ファイバ

一般的に普及している光ファイバは母材が石英ガラス(SiO₂)のシリカガラスファイバである。一方でフッ化物を母材とする ZBLAN ファイバは主に二つの点で光学的特性に優れている。1 つは広帯域で伝送損失が低いことである。シリカファイバと比較した場合、400 nm から 4 μm 程度までの特に中赤外の帯域において非常に低損失である。2 つ目はレーザー増幅に用いる上準位の寿命を長くとれることである[1]。寿命は格子振動を複数用いた非輻射過程である多フォノン緩和に強く関係し、格子振動エネルギーが小さい ZBLAN

ファイバにおいてはシリカファイバと比べて多くのフォノン振動させる必要がある。そのため多フォノン緩和がおきづらく長い寿命を持つことができる。特に我々が開発している Tm³⁺:ZBLAN ファイバでは後者の特性を利用している。だが格子振動エネルギーが低いことで得られるこの特性は、機械的強度の低く折れやすいことや融点が低くシリカファイバとの融着が困難であることトレードオフの関係にある。この欠点がシリカファイバとの融着が難しい、研磨において傷が残り易いなど ZBLAN ファイバの普及を阻害する要因となっている。

2.2 ファイバカプラ

二つの光導波路を互いに近づけた場合にはエベネッセント波を介して各導波路のモードは相互に結合する。これを利用して2本のファイバのコア同士を接近させて光を合流・分岐・分波・合波するのがファイバカプラである。結合前と結合後で電界分布が著しく異なる場合は、結合導波路の伝達特性は摂動法を用いて解析することができる。2本のファイバの伝搬定数が等しく損失のないファイバカプラの場合、各ポートの出力を図2の様に定義すると P_{couple} 、 P_{pass} はそれぞれ

$$P_{pass} = P_{in} - P_{in} \sin^2(qz)$$

$$P_{couple} = P_{in} \sin^2(qz)$$

と表すことができ、ファイバ長手方向に周期的に分岐率が変化することがわかる。ここで q はモード結合定数、 z はファイバ長手方向の一般的に使用されているファイバカプラは2本のファイバを加熱して引き延ばす熔融延伸と呼ばれる方法によって製造されている。一方、側面研磨でコアの近くまでクラッドを除去した2本のファイバの研磨面同士を接近させることでカプラを作製することもできる(図2)。

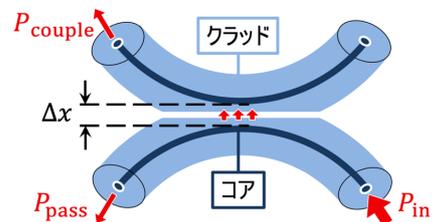


図2 側面研磨ファイバカプラ

2.3 側面研磨ファイバ

コア中の伝搬モードからエベネッセント波を得るにはフッ化水素酸によるエッチングや加熱によるテーパ、研磨などファイバの構造を変える必要がある。これらの手法のうちエッチングやテーパによるファイ

バの加工は近接場に利用する領域以外もクラッドが薄くなってしまふことから、研磨による加工よりも折れやすくなってしまふ。一方で図3に示すような側面研磨はファイバの径が極端に細くならずファイバが折れにくいいため、研磨面上に何らかの物質を接近させることでファイバ外の物質と近接場を相互作用させる応用研究において利用されてきた。これを応用した光学素子は相互作用長を長く確保できる、クラッド層厚さの調整により相互作用の強さを微調整できるなどの利点がある。光学素子の例としては分岐比が可変なファイバカプラ、波長フィルター、フォトニッククリスタルファイバカプラ、偏光子、温度センサー、磁気センサー、可飽和吸収体など多岐にわたる[2]。以上の研究はシリカファイバで行われてきたものであり、機械的耐性に劣る ZBLAN ファイバで試みられたことはなかった。しかし一方で、ZBLAN ファイバは加熱による加工が難しく熔融延伸でファイバカプラを作製した報告はほとんどなく、側面研磨は加熱に代わる加工方法として期待できる。そこで本研究では側面研磨によって ZBLAN-ZBLAN ファイバカプラ、最終的にはシリカ-ZBLAN ファイバカプラを作製していく。

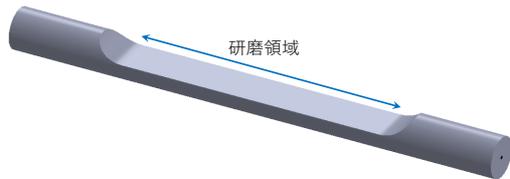


図3 側面研磨ファイバの外観

3. 側面研磨ファイバの作製

3.1 研磨方法の検討

側面研磨には大別して2つの手法が存在する。一つが研磨剤の塗布された回転するホイールの側面にファイバを押し当てる手法である(図4)。この手法においては治具などの部品を用意する必要が無く、短時間かつ安価に研磨することができる。また成功率や再現性も高いため製品化においては非常に有用な手法である。しかし一方で、研磨されて折れやすくなったファイバの扱いが難しく側面研磨ファイバの取り回しが多い場合や研究段階のデバイスには扱いが難しい。

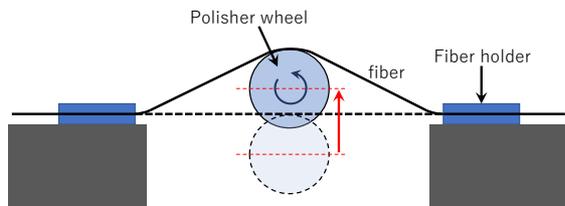


図4 ホイールを用いたファイバの研磨

もう一つがファイバの研磨される部分を治具と接着剤で固め共削りする手法である。共削りによって研磨面が荒くなる可能性はあるが、ファイバが折れにくく

取り扱いが容易である。そのため本研究ではこの手法を採用した。

3.2 研磨治具の検討

治具にはガラス、プラスチック、アルミの三つの素材を検討した。最初に試みたのがファイバと同じ素材で同じ硬度を持つガラスとの共削りであるそして得られた研磨面は十分細かい粒径の研磨フィルムで研磨したときも非常に大きな傷が残ってしまった(図5)。これは図5の丸で囲った領域から研磨面が放射状に傷ついていることから、研磨中にアルカリガラス板から研磨フィルムの粒径よりも大きな破片がガラス-接着剤の境界面などから生成されることで発生した傷であると考えられる。このことからガラスは治具としては不適切であると判断した。

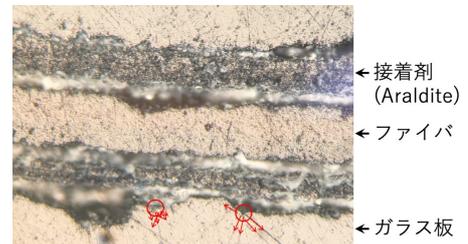


図5 ガラスを治具とした時の研磨面

プラスチック製治具は接着剤を加熱して硬化させる過程で治具自体が変形してしまふ。そのため研磨すること自体がかなわなかった。

アルミ製治具はファイバが曲率半径 250 mm の弧を描き、溝ではなく図6に示す様な階段状の段差にファイバを固定する設計にした。そうしたところシリカファイバ、ZBLAN ファイバ共に高品質な研磨面を得ることができた(図7)。そのため側面研磨ファイバの作製にはアルミ製治具を用いることにした。ファイバが弧を描く設計にしているのは研磨面精度を高めるためである。

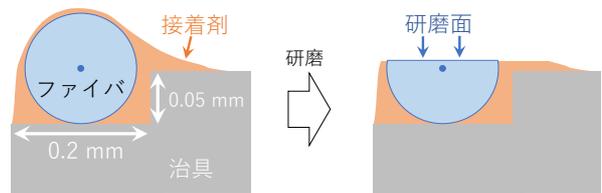


図6 アルミ治具の形状



図7 ZBLAN ファイバの仕上げ後の側面研磨面

4. 側面研磨ファイバのクラッド層厚さの評価

カップリング率やカップリング効率を向上させるには極力二本のコア間の距離を小さくする必要がある。そのため残ったクラッド層の厚さをモニタリングしながら研磨を進め、クラッド層を可能な限り薄くしたい。また作製された二本の側面研磨ファイバで達成可能な最大カップル率を予測するためにも、両者のコアを最大で接近させられ距離をカップリングのアライメントの前に把握しなければならない。以上のような理由から残ったクラッド層の厚さを測定する必要がある。具体的な測定方法としては以下に記述する3つを検討した。

4.1. 評価方法の検討

評価方法としてファイバの側面を研磨した時に得られるクラッドの研磨領域から幾何学的に計算する方法がまず考えられた (図 8)。しかしこの方法だと研磨面がコアに近づくほど y の変化量に対する d の変化量が大きくなり精度が足りていないことから、この手法でクラッド層の厚さを測定することはできない。

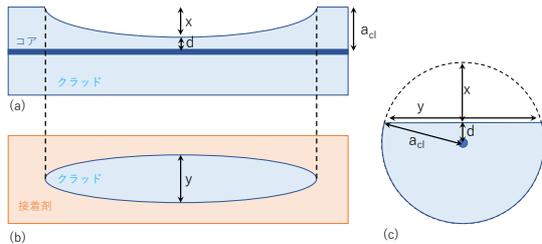


図 8 クラッド研磨領域を利用した測定方法

次にクラッド層厚さを大まかに測定する手法としてコアと研磨面の位置を顕微鏡を用いて光学的に測定する方法がある。この手法では顕微鏡で研磨面に焦点を合わせた後、ファイバに入射した可視光に焦点を合わせた時の対物レンズの移動距離から測定する (図 9)。



図 9 光学的な測定方法

高精度にクラッド層厚さを測定する手法としては研磨面上の外部物質とのエバネッセントカップリングを利用する方法がある。この手法ではまずに研磨面にクラッドよりも屈折率の高い液体を滴下する (図 9)。滴下した液体はクラッドよりも屈折率が高い場合、ファイバのコアとモードマッチングするためコア内を伝搬する光が液体の方へ抜けて透過損失が生じる。この透過損失はクラッド層の厚さや液体の屈折率に依存しているため、損失の理論式を測定値に対してフィッティ

ングすることでクラッド層の厚さを測定することができる。またクラッド層が残っておらず研磨面にコアが露出している状態では $n_{liq} > n_{cl}$ を満たしていれば n_{liq} の値に関わらず伝搬光の内ほとんどが損失となるため、この手法はコアの露出の確認にも利用できる。以上より検討の結果としては信頼性と精度の高さから 3 番目の方法を採用した。

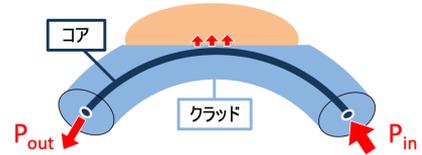


図 9 外部物質とのエバネッセントカップリングを利用した測定方法

4.2. 測定とフィッティング

外部物質とのエバネッセントカップリングにより受ける損失の計算モデルは複数存在する [3]。本研究では図 10 に示す様な屈折率 n_{cl} で満たされた空間における n_{co} のシングルモード導波路と曲率半径 ρ が無限大のマルチモード導波路間のモードカップリングを計算モデルとして導出された式を用いてフィッティングを行なった (図 10) [4]。コアの伝搬光が研磨面上の物質とエバネッセントカップリングした時の側面研磨ファイバの透過率 (P_{out}/P_{in}) は以下の式で表される [4]。

$$\ln\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right) = \frac{4\sqrt{2\Delta}1-b}{a} \frac{1}{V} \sqrt{1+2\Delta b} \frac{V_{liq}-bV^2}{V_{liq}^2 K_1^2(V\sqrt{b})} \sqrt{\frac{\pi a R}{V}} \times \int_0^1 \frac{\sqrt{1-x^2}}{4 \sqrt{\left(\frac{V_{liq}^2}{V^2}-b\right)x^2+b}} \exp\left\{-\frac{2Vd}{a} \sqrt{\left(\frac{V_{liq}^2}{V^2}-b\right)x^2+b}\right\} dx$$

a : コアの半径、 $V \cdot V_{liq}$: それぞれファイバと液体の V パラメータ、 $b = \left(\frac{w}{V}\right)^2$ 、 w : ファイバ動径方向波数と a の積、 R : ファイバの曲率半径、 K_n : n 次の第二種変形ベッセル関数、 x : モード指数、 d : コア中心-研磨面間の距離

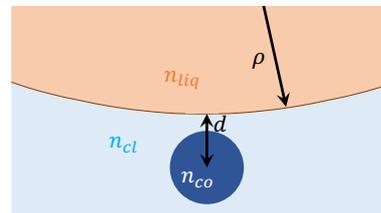


図 10 エバネッセントカップリングの計算モデル

以上の式にシングルモードシリカファイバとシングルモード ZBLAN ファイバを曲率半径 250 mm に曲げた状態の条件を代入し、エバネッセントカップリングにより受ける損失を計算した結果が図 11 となる。ここでは横軸を液体の屈折率、 a をコア半径としている。各種ファイバごとに透過損失の立ち上がる屈折率が異なっているのはクラッドの屈折率が異なるからである。

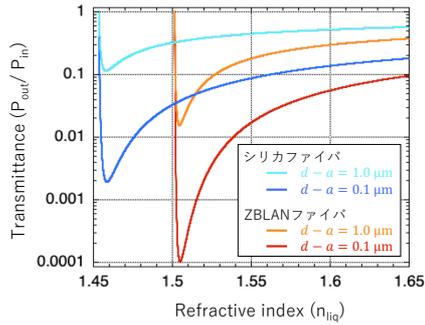


図 11 エバネッセントカップリングで各種ファイバが受ける損失の計算結果

d をフィッティングパラメータとして透過率の測定点に対して上式をフィッティングした結果を図 12 に示す。ただし丸が測定点、実線がフィッティング曲線である。この実験からシリカファイバ、ZBLAN ファイバ共にクラッド層厚さを $0.1 \mu\text{m}$ 精度で評価することができた。

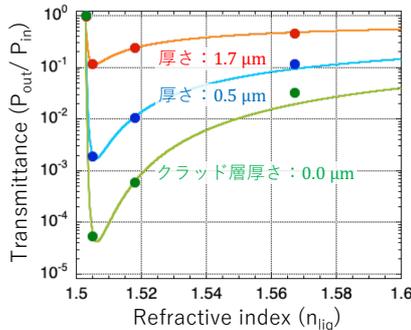


図 12 研磨面上の液体（屈折率： n_{liq} ）による側面研磨 ZBLAN ファイバの透過損失

5. ファイバカプラの作製

作製した側面研磨ファイバを2つ用意し、研磨面同士を接近させることでファイバカプラを作製した。

5.1. アライメント方法

側面研磨ファイバカプラのアライメントでは、研磨面とコアが最接近している研磨面上の点の位置座標 x 、 y 、 z と研磨面の法線で定義される方向ベクトル θ_x 、 θ_y 、 θ_z の合計6軸を、一方のファイバに対してもう一方のファイバが合わせなければならない。また過度に動かすと他方の側面研磨ファイバに干渉してしまいアライメントがずれる・研磨面が傷つく恐れがあるなど、従来のファイバのアライメントとは大きく異なる。特に問題であるのが研磨面やエバネッセント波を確認しながらアライメントすることができない点である。コア中の伝搬光がカップリングする前の多軸のアライメントを指標もなく外観だけで行うことは困難であると判断した。そこで本論文では側面研磨ファイバの伝搬光の散乱光で光るコアの位置を顕微鏡で確認しながら、顕微鏡の対物レンズの位置を中心にアライメントを行った（図 13）。

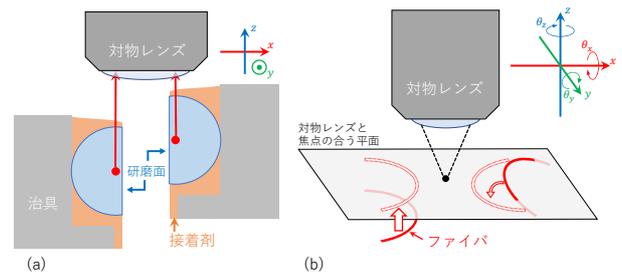


図 13 ファイバカプラのアライメント方法

5.2. シリカ-シリカファイバカプラ

2つの側面研磨シリカファイバをカップリングさせた。カプラの各ポートからの出力とコア間の距離を図 1 のように定義する。用意した側面研磨ファイバの一方は 4.2 の手法でクラッド層厚さを測定しようとしたところ、3種全ての液体で出力がほぼ観測されなかったことからクラッド層が残っておらずコアが露出していると思われるファイバである。もう一方はクラッド層厚さが $2.1 \mu\text{m}$ と計算された。その他の条件が $R = 250 \text{ mm}$ 、 $\lambda = 1064 \text{ nm}$ 、 $n_{\text{co}} = 1.4566$ 、 $n_{\text{cl}} = 1.45081$ 、 $a = 2.9 \mu\text{m}$ であり、実測値と同条件下で分岐比計算値を、縦軸を P_{couple} への分岐率、横軸をコア間の距離としたグラフを図 14 に示す。

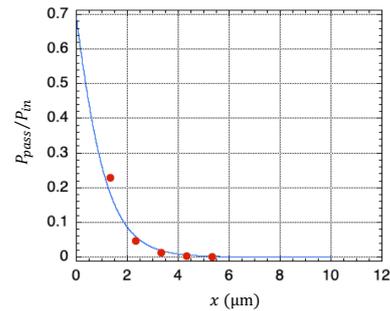


図 14 シリカ-シリカファイバカプラにおける分岐率の x 軸方向依存性（実線：計算値、赤丸：実測値）

ただし実際のコア間の距離は不明であるため、各プロットの横軸の間隔は移動ステージのマイクロメータの読み値を基にしており、測定点は計算値に対してフィッティングした。 P_{couple} への分岐率は最大で24%であった。横軸に関して、一方の側面研磨ファイバのクラッド層厚さが $2.1 \mu\text{m}$ と測定されたのでコア間の距離 x はこれ以下の値を取らないはずである。それにも関わらずフィッティングの結果 $x = 1.3 \mu\text{m}$ という値を取り得たのは一方のファイバのコアが一部露出しており、そのファイバの伝搬モードの中心に対してもう一方のファイバの伝搬モードがクラッドが残っている状態と比較してより接近できたためだと考えられる。

5.3. ZBLAN-ZBLAN ファイバカプラ

側面研磨シリカファイバのカップリングと同様に、2つの側面研磨 ZBLAN ファイバをカップリングさせた。

用意した側面研磨ファイバはそれぞれが $0.08 \mu\text{m}$ 、 $0.00 \mu\text{m}$ と計算された。クラッド層厚さが $0.00 \mu\text{m}$ のファイバは研磨面上の液体の屈折率変化で透過損失が変化するためクラッドがまだ残っているものと考えられる。その他の条件が $R = 250 \text{ mm}$ 、 $\lambda = 1064 \text{ nm}$ 、 $n_{\text{co}} = 1.5054$ 、 $n_{\text{cl}} = 1.5004$ 、 $a = 2.25 \mu\text{m}$ であり、実測値と同条件下で分岐比計算値を、縦軸を P_{couple} への分岐率、横軸をコア間の距離としたグラフを図 14 に示す。

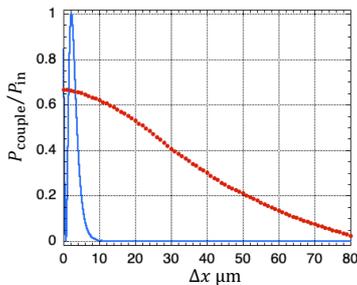


図 14 ZBLAN-ZBLAN ファイバカップラにおける分岐率の x 軸方向依存性 (実線：計算値、赤丸：実測値)

ただし実測値は x を徐々に小さくしながら測定していき、 x 軸のマイクロメータを回しても分岐比が変化しなくなった時点での位置 x を 0 とした。 P_{couple} への最大分岐率は 67% であり、カップラにおける全損失は 5% 未満であった。グラフを見ると実測値と計算値が大きく離れている。測定値によればコア間の距離が $80 \mu\text{m}$ でも約 3% の出力がカップリングしていることになる。しかし計算値にもあるとおりのエバネッセント波の染み出しは波長オーダー程度であるから、これは明らかに測定値に何らかの間違いがある。これが計算値で考慮されていない研磨面の角度に起因するものか他の測定で調べたが、研磨面の角度がずれるだけで原理的に分岐率の x 軸方向依存性がここまで大きく変化することはないと結論づけられた。

残された可能性は技術的な面で問題があり、研磨面間距離の評価の不正確であったことが考えられる。私はフォークによる治具の固定が十分ではなかったことに起因していると考え。図 15 のようにまずは研磨面同士が角度が一致していない状態で研磨面が接触する。ステージは更に内側へ移動するため研磨面に圧がかかる。面の角度が合いながらフォークによる固定が不十分のため治具は両端に移動していき、全面が接触した時に分岐比の変化が止まる。このようにしてステージが $80 \mu\text{m}$ 接近するうちに P_{couple} への分岐比が徐々に大きくなっていったものとする。

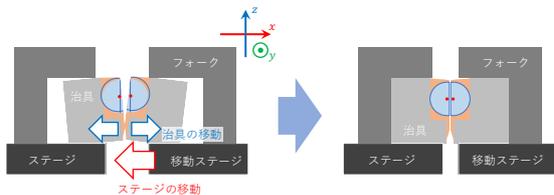


図 15 研磨面接触後の治具の移動

5.4. シリカ-ZBLAN ファイバカップラ

側面研磨したシリカファイバと ZBLAN ファイバのモードカップリングを試みた。ここでは側面研磨シリカファイバに 1064 nm 光を入射し、各ポートの出力とコア間の距離を図 16 のように定義する。用意した側面研磨シリカファイバのクラッド層厚さは $0.1 \mu\text{m}$ 、側面研磨 ZBLAN ファイバは $0.0 \mu\text{m}$ と算出されている。縦軸を各ポートへの分岐率、横軸をコア間の距離として実測値をプロットしたグラフを図 17 に示す。

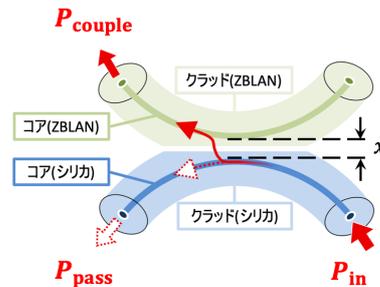


図 16 シリカ-ZBLAN ファイバのカップリングの実験

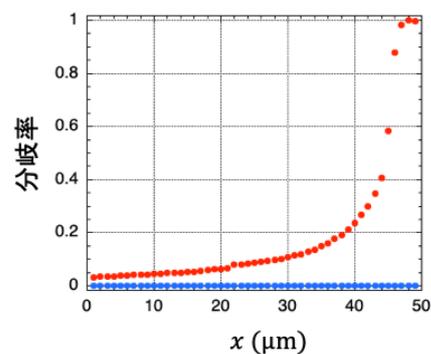


図 17 シリカ-ZBLAN ファイバのカップリングにおける各ポートへの分岐率 (赤: $P_{\text{pass}}/P_{\text{in}}$ 、青: $P_{\text{couple}}/P_{\text{in}}$)

P_{couple} への最大分岐率は 0.00015%、 P_{pass} への最小分岐率は 3.3% であった。また研磨面同士が近づいて P_{pass} への分岐率が減少しても P_{couple} への分岐率はほとんど増加していない。これはシリカファイバのコアから ZBLAN ファイバのクラッドへカップリングした内のほとんどの光が損失となっていると考えられる。4.2、4.4 で行なった実験の様に、シリカファイバの基本モードはシリカファイバのクラッドよりも屈折率が大きく導波路構造を成していない (ZBLAN ファイバのクラッドよりもファイバを固めている周りの接着剤の屈折率の方が高い) ZBLAN ファイバのクラッドに対してはエバネッセントカップリングが可能である。一方でコア同士は同じシングルモード同士でも母材の屈折率の違いから伝搬定数が大きく異なるため、両ファイバ間で位相整合がとれず結合効率が非常に小さい。ZBLAN ファイバへわずかに分岐したのはコア間の直接的なカップリングと ZBLAN ファイバのクラッドへカップリングした後にそのクラッドモードから

ZBLAN ファイバのコアへのリカップリングによるものだと考えられる。以上の理由からシリカファイバへ入射した光の多くは ZBLAN ファイバのクラッドにエバネッセントカップリングして損失となったと推測される。

分岐率向上には両ファイバ間の伝搬定数差を小さくする必要がある。同じ母材で伝搬定数を操作するにはテーパーすることで伝搬定数を小さくする、シリカファイバのシングルモードと伝搬定数の近い ZBLAN ファイバの高次モードを選択してするなどの方法が考えられる。

6. まとめ

シリカ-ZBLAN ファイバカプラの開発を目的に研究を進めた。各ファイバの組み合わせでの側面研磨ファイバカプラにおいて最大分岐率はシリカ-シリカファイバカプラで 24%、ZBLANZBLAN ファイバカプラで 67%、シリカ-ZBLAN ファイバカプラで 0.00015%となった。側面研磨による ZBLANZBLAN ファイバカプラの報告は本研究が初めてである。

今後の展望としてはシリカ-ZBLAN ファイバカプラの P_{couple} 側への分岐率向上を目指す。そのためには両ファイバ間の結合効率を向上させるべく、ファイバ角度をつけて並べることで角度位相整合を行う、テーパーや研磨でファイバの伝搬定数を操作するなどして両者間の伝搬定数差を小さくする必要がある。

参考文献

- [1] G. Androz, et.al., Opt. Soc. B, **24**(2007)2907.
- [2] J. R. Godin, University of Waterloo, 2015, Ph. D. thesis
- [3] C. Chen, S. Tseng, Appl. Opt. **31**(1992)3439
- [4] O. Leminger and R. Zengerle, Opt. Lett. **12**(1987)211