

① 完全なカプリング

シングルモードファイバーカプリングをスムーズで永続的なものに。

Christian Knothe, Anja Knigge および Ulrich Oechsner による

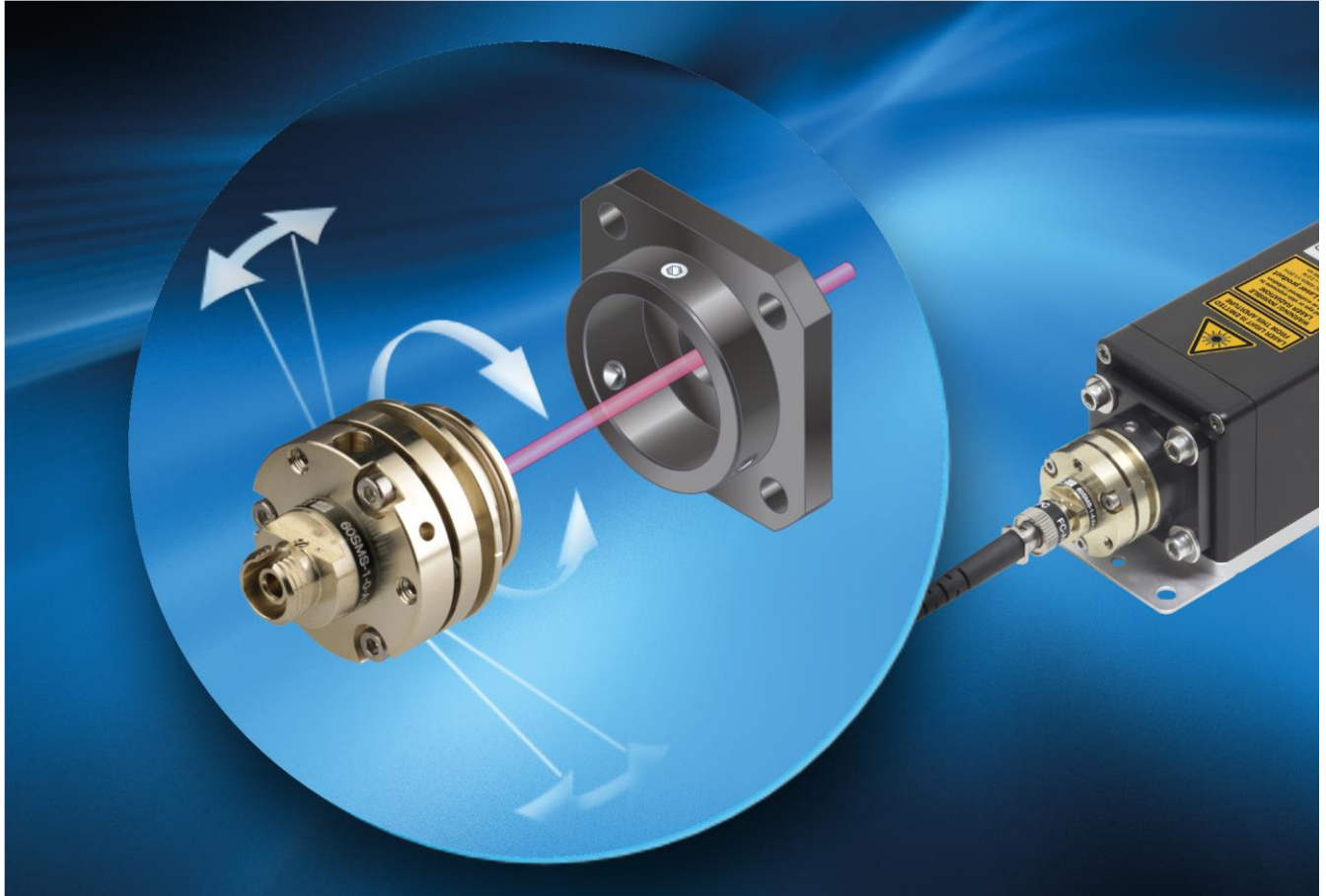


図 1 :

調整可能なレーザービームカプラータイプ 60SMS は、レーザーとのカプリングを永久に保証すべきものです。（上図中の白色の）矢は、必要とされるアラインメントの方向性を示します（焦点合わせや光軸アラインメントは示されていません）。ビームへの横方向アラインメントは、上図にある 60A19.5-F などのアダプターと共に行います。

長期に亘って安定したファイバーカプリングには、サブミクロン精度と（高い）ビーム位置安定度が必要となります。この点がとりわけ当てはまるのは、筐体出射のビームレーザーを偏波面保存シングルモードファイバーに永続的に導入する場合です。人気の高いシングルモードカプラーのテストから、微妙な調整手順が必要ではあるものの、広い温度範囲に亘って驚異的な長期安定性を達成することが可能であることが分かりました。

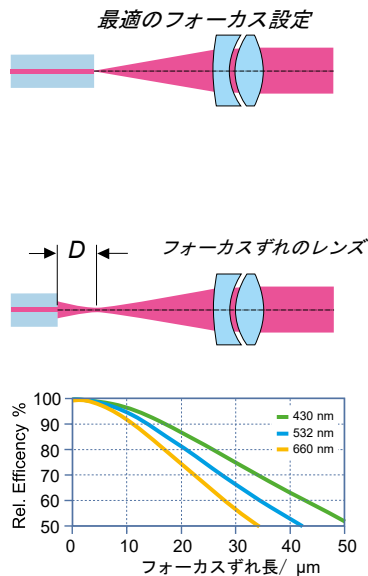


図 2 :

光軸ズレあるいはフォーカスずれ：フォーカスずれのレンズでのカプリング効率、可視領域でのいくつかの波長でファイバー開口数 0.1 にて。

シングルモードファイバーは専門化したファイバーであり、横基本モード LP01 のみで光を伝播します。ファイバーから出射する光のフィールド分布（モードフィールド）は近ガウシアンとなります。

入射してくるガウシアンレーザービームをファイバーにカプリングすることが最適となるのは、ファイバー入射口でのビームのフィールド分布がファイバーのモードフィールドに可能な限り最良の適合をする場合です。このマッチングを行なうことがレーザービームカプラー、あるいはファイバーカプラー（図 1）と呼ばれる光学機構装置の仕事です。

カプラーをレーザーに永久に取り付けておく場合には、さまざまな環境からの影響を受けても長期安定性を得ることが特に重要です。

シングルモードファイバーの特性

シングルモードファイバーを主に特徴づけるのは、それらの開口数 (NA)、モードフィールド径 MFD およびカットオフ波長 λ_0 です。

NA とは、ファイバーから出射するビームの角度延長を意味します。大きいコア径のマルチモードファイバーの場合、NA はコアとクラッドの屈折率から計算され、その数値が全反射の臨界角を決定します。

シングルモードファイバーの場合には、コア径が少数の波長しか許容せず、問題はあっという間に複雑となります。Schäfter+Kirchhoff 社は、ガウシアン角分布の $1/e^2$ レベルで採取された、ファイバー出射の出力分布のビーム拡がり角に対応する有効ファイバー NAe^2 を定義し、それぞれのファイバーバッチと多くの波長の数値を測定します。この数値は、1~5%レベルでファイバーメーカーが指定された名目 NA よりもずっと正確です。

MFD はガウシアン強度プロファイルの直径であり、これも $1/e^2$ レベルで計測されます。この MFD は波長依存し、ファイバー開口数に反比例します。これらの 3 つの数値の関係は単純に $MFD = 2\lambda / (\pi NAe^2)$ となります。

1550nm 前後の赤外線領域で遠隔通信用に使用されるファイバーは、約 $10\mu m$ のかなり大きいモードフィールド径を持つ一方で、UV 領域での MFD（モードフィールド径）は 405nm で NAe^2 が 0.1 のファイバーを使用します。最終的に、カットオフ λ_0 よりも長い波長のみで導入光がシングルでほぼガウシアンモードとなります。カットオフ波長よりも短い波長範囲にはマルチモードが存在し、ビームと強度分布が安定しておらず、近ガウシアンでもありません。

偏波面保存シングルモードファイバー

標準的なシングルモードファイバーは、導入されたレーザー光の偏光状態を維持しません。偏波面保存シングルモードファイバー (PM ファイバー) は、ビームの偏光方向がファイバーの 2 つの主要な軸の片方に光軸調整されていれば、直線偏光を維持します。

PM ファイバーは組み込まれた応力要素によって回転に対して非対称となっており、例えば、偏光の 2 つの主要な状態 (SOP) (縦偏光と横偏光) の劣化を防ぎます。

光はいわゆる「速い」軸か「遅い」軸のどちらかに導入され、光が直線偏光であればその状態が維持されます。光の一部が他方の軸に導入されると、光源のコヒーレンスが結果としての偏光 (状態) を決定します。

コヒーレンス長がファイバーの 2 つの主要な偏光状態間の光路差より大きい光源の場合、結果としての偏光は楕円偏光となります。ただし (ファイバーへの) ストレスと温度変化がこの任意の楕円状態を変化させます。

最大カプリング効率を示す安定したファイバーカプリング – 短波長でも

レーザービームカプラーは、最大のカプリング効率を達成するためにファイバーのモードフィールドと一致する回折限界スポットを生み出す必要があります。

モードフィールドのサイズに適合させることが選択の主要目的です。レーザービーム径 $\emptyset$ の理想的なレンズは、 $f=\emptyset/(2 \text{NAe}^2)$ の焦点距離を持ち、この理想的な数値に可能な限り近い焦点距離を持つ回折限界のレンズを選択することが重要です。その実現のために、カプラーには多岐に亘って選択可能なレンズが必要となります。

モードフィールドの軸の位置については、カプラーはフォーカシングできる必要があります、光学部品とファイバー入射端の間の距離を調節することで、焦点距離の差（図 2）を補償できます。

モードフィールドの横方向の位置に適合させるため、角度調整が必要とされます（図 3）。図 1 のカプラーはこの目的達成のために 3 点傾斜調整機構を備えています。ファイバー入射端と光学部品に傾斜を与えてそれらの光軸をビームに一致させる必要があります。

モードフィールドの角度設定に適合させるため、光学部品の光軸をビームに集中させる必要があります（図 4）。

そして最終的に、偏波面保存ファイバーを使用するには、カプラーを回転させる必要があります。（図 5）

これらの条件がすべて満たされたときにのみ、90%近い高いカプリング効率を得られます。図 2~5 内のプロット線の若干の例が、精密さの必要性を視覚化しています。

図 2 は、 NAe^2 が 0.1 のファイバーと可視領域の数種の波長でのカプリング効率への軸の位置で変化の影響を示しています。これらの例では、10 μm の軸ズレあるいはフォーカスズレが 5~10%の損失につながっています。

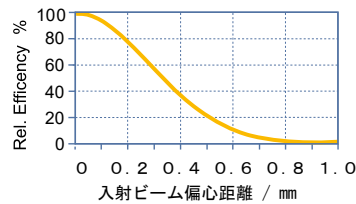
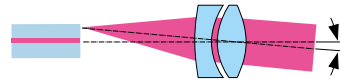


図 3 :

モードフィールドとレーザースポットの横方向調整：傾いているビーム伝播でのカプリング効率。ファイバー入射端の横方向の位置ズレはビームの光軸角度ズレに起因。プロット線が示すのは、波長 405nm、ファイバー $\text{NAe}^2 = 0.1$ 、焦点距離 5mm の例。

図 3 では、405nm のビームを焦点距離 5mm の光学部品で $\text{NAe}^2=0.1$ のファイバーに導入します。ビームに 1mrad の傾きがあると 5 μm の横方向オフセットとなり、このファイバーの 405nm でのおよその MFD である 4 μm より大きくなってしまいます。0.1mrad (0.04 度) の光軸調整ズレさえ、0.5 μm の位置ズレ（約 1 波長分）をもたらす、透過効率を約 7%減じます。

一般的に言えることとして、ファイバー入射端で約 1 波長分の位置ズレがあると、ほとんどのファイバーで 5~10%の透過損失につながるということです。

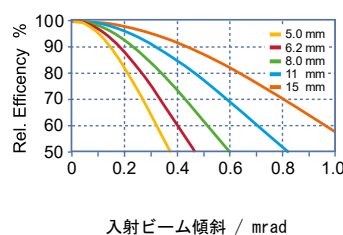
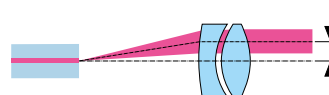


図 4 :

伝搬軸を持つレーザービームカプラーの中心合わせ：（レンズの）中心を通らない並行ビームでの f' （焦点距離）=5-15mm のカプリング効率差異。波長 405nm でファイバー $\text{NAe}^2=0.1$ の例。

図 3 での僅かな許容範囲と比較して、図 4 では比較的大きな許容数値を得ています。焦点距離によっては、図 2 が示すように 0.1~0.4mm のビーム位置ズレに抑えることが必要となります。おおよそで見積もってみると、これは約 3 桁の規模となります。

図 5 で示されている偏波面保存ファイバーの場合、回転精度は約 1 度が必要です。これ（偏波面回転のズレ）は、(仮想的に) 偏光消光比 (PER) を

40dB (1:10000) から 32dB (1:3200) まで低減してしましますが、それでもとても良い値です。

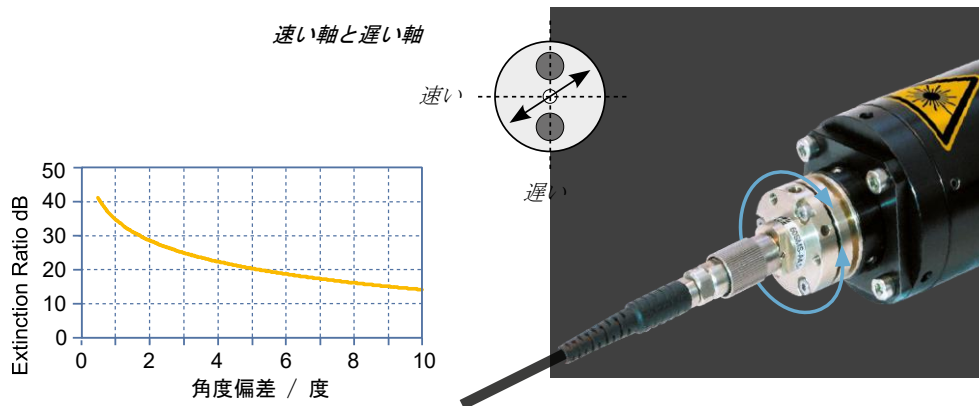


図 5 :

偏光軸のアラインメント：光源の偏光軸がファイバーの偏光軸に合致していない時の偏光消光比 (PER)。

ここまで述べてきた基準と要求項目は、図 1 に表示されている 60SMS レーザービームカプラーの設計に大きな影響を与えました。カプラーには内部フォーカスと高精度傾斜機構が装備され、それらのどちらについても必要とされる精度は高く、傾斜アラインメントに関しては非常に高くなっております。それほど(高い正確性を)要求されないビームの中心化は、図 1 の 60A19.5-F などのアダプターの助けを借りて、主に手作業で行います。回転による偏光アラインメントについても手作業で十分です。

長期安定性という到達点を意識するなら、機構設計はできるだけ単純に保つことと、絶対的に必要とは言えないしやれた調整機構には手を出さないことが重要です。

素材とコンポーネントを慎重に選択することが、安定した設計につながります。結果として、60SMS カプラーは科学および産業分野で多くのユーザーの支持を得ております。カプラーはブレーメンでの落下塔実験やゼロ G 飛行実験などの厳しい環境で自ら (の優位性) を証明しました。

不断の改良と検証

けれども広く受け入れられている高品質の製品にても不断的の改良が必要とされます。例えば、現在、カプラーは傾斜機構の更なる改良に焦点を合わせた調査が進行中です。いくつかの設計選択肢を識別して、現在の設計との (優位性) 比較が多数実行されています。これらの試験には、衝撃と振動テストに加えて温

度サイクルテスト (図 6 参照) も含まれています。温度サイクルテストから 2 つの質問への答えが得られます：

- ・カプリング効率は温度でどのように変化するのか？
- ・テストを数回繰り返した場合、透過効率の変化は発生するのか。

レーザー光源で発生しうるビーム位置エラーを排除するために、これらのテストでは同じ設計のカプラー 2 個を背中合わせにして使用します (図 6a を参照)。

組込済ファラデーアイソレーター付きの温度安定化レーザー光源の放出光を、偏波面保存ファイバー経由でテスト装置に導入し、1 つ目のレーザービームカプラーでコリメート (平行光化) してから、2 つ目のレーザービームカプラーで次の偏波面保存ファイバーにもう一度導入し直します。再導入された出力をフォトディテクターでモニターします。

このカプリング装置を温度制御板の上に置いて、15°C と 35°C の間で温度を連続的に変化させます。カプリング装置の温度を 2 つのレーザービームカプラーの片方に置かれた温度センサーでモニターします。計測装置へのいかなる温度の影響も最小化するため、レーザー光源とフォトディテクターおよびデータロガーはすべて一定温度の温度制御板の上に設置します。

典型的な最新設計の結果は、図 6b に示されています。明らかに、温度によるわずかな出力変動が見られます。温度サイクルによって起こる相対出力の繰り返しパターンを最も明確に示しているのは図 6c で、ここでは相対出力（最大限に正常化されている）がレーザービームカプラーの温度に対してプロットされています。この場合、最大カプリング効率に達するのは 25°C の少し上で、そこを境に、温度の高いエリアよりも温度の低いエリアで温度がより早く低下していき、要求された動作温度点の 25°C で勾配が最も緩くなっています。それぞれの計測サイクル毎の出力カーブはほぼ同期しており、同一温度での出力変動は <1 % を示し、温度サイクル中のビーム位置安定度の再現性とファイバーカプリングの長期安定性を実証しております。ここでの最大出力に関する最大偏差は 3% です。

最新の設計の顕著な温度サイクル結果を改善するのは挑戦的な目標です。けれども、安定性以外の側面、例えばカプリング作業のスムーズさ、達成可能な最大カプリング効率および学習曲線の急改善などが、新人がファイバーカプリングでしばしば遭遇する扱いにくい状況に立ち向かう場合に想定されます。この場合、どんな改善も歓迎されるでしょう。ただし、安定性は不可欠です。

偏光の安定性

長期に亘って安定したカプリング効率（を達成すること）は、PM（偏波面保存）ファイバーに導入するときには、その成功のほんの一部に過ぎません。偏光軸の 1 つに完全には導入できていない直線偏光は維持されず、温度とファイバーへのストレスの変動によって偏光（状態）は変化します。SK010PA 偏光アナライザ（図 7）はファイバーアラインメント作業を実行し、かつ偏光状態を迅速に効率的に決定できるよう、特別に設計されています。計測原理はフォトダイオードの前に設置された回転する $\lambda/4$ 板と動かない偏光子に基づいています。フォトダイオード信号の詳細な分析と $\lambda/4$ 板の時間/位置情報が偏光の状態を明らかにし、それがポアンカレ球上にドットとして描写されます。直線偏光状態は赤道上に現れ、円偏光は極に位置します。

偏光状態の維持の指標は、2つの軸（速い軸と遅い軸）に導入された出力の比率です：偏光消光比（dB 表

示の PER）。高い PER（偏光消光比）が偏光状態の維持の成功を示します。

PM（偏波面保存）ファイバーが穏やかに曲げられたり、あるいは温度が変化すると、出射（の）偏光（状態）も変化し、観測されたすべての偏光状態がポアンカレ球の表面上の共通の円として表現されることが明白となります。この円は、現行の偏光アラインメントでの偏光のすべての可能な状態を表しており、（その円の）中心が平均偏光消光比となります。理想的な偏波面保存ファイバーの場合、平均 PER（偏光消光比）は赤道に位置するはずで、赤道から最も遠い円の中心点は、現在の偏光アラインメントで想定しうる最悪の偏光消光比を示します。

ファイバーのカプリングを調整するときに、ポアンカレ球上の円の半径はアラインメントの品質を示し、それがファイバー偏光軸と光源の偏光軸の間の角度差を示すからです。円の半径は不完全に光軸調整されたファイバーでは大きくなり（周囲の条件で偏光は顕著に変化します）、正確に調整されたファイバーでは小さくなります。最適に光軸調整された理想的なファイバーでは、ポアンカレ球上の円は赤道上の一点に集束します。

ファイバーカプリングを調整する際、一連の計測ポイントを獲得しながら温度を変えたり、あるいはファイバーを慎重に曲げて測定点の円形の雲（多数の観測ドット）を生み出す必要があります。円は自動的にデータ点と照合され、平均と最小の PER が示されます（図 7a）。ここでファイバー軸を円の半径が最小限になるまで光源の偏光軸に対して回転させます（図 7b）。

PER（偏光消光比）よりも偏光状態の安定性の方が重要である場合、単にファイバーの入射側と出射側を入れ替えてもう一度 PER 計測を行うと、最も安定したファイバー設定が明確となるでしょう（ファイバーコネクター内でのみ外乱が起こっていると想定されず）。最も安定した設定はより小さいデータ円を持つものです。ファイバーの入射側と出射側を入れ替えると、赤道と円の中心の距離（平均偏光比）は円の新しい半径となり、前の円の半径（角度差）は赤道から円の中心までの新しい距離となります。

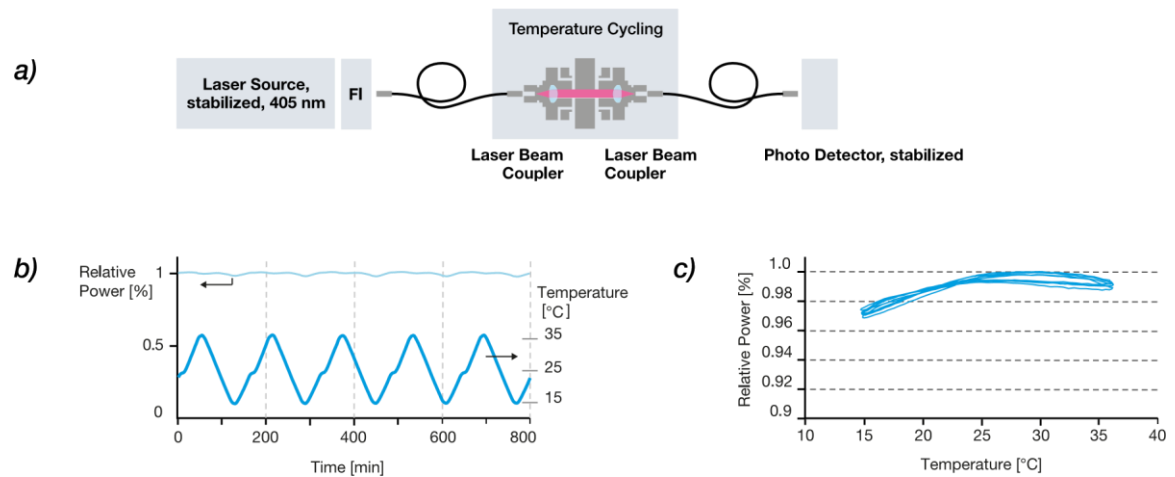


図 6 :

- a) 15° C と 35 ° C 間の連続温度サイクルを受ける 2 つのレーザービームカプラー (f=4.5mm, $\lambda=405\text{nm}$) の安定性を測るためのテスト装置。
- b) 相対出力 (平均出力で正常化) は、温度 (変化) (グラフ下部) に従って繰り返しパターンを見せ、 $\pm 1.5\%$ の最大偏差を示します。
- c) 相対出力曲線 (最大出力で正常化) は (温度変化に) ほぼ同期しており、温度サイクル中のビーム位置安定度の高い再現性を実証しています。最大偏差はたったの 3% です。

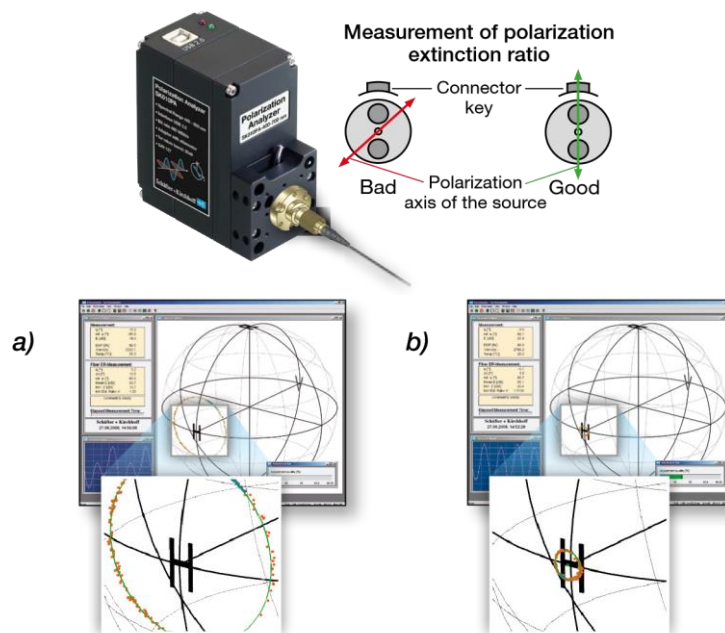


図 7 :

偏波面保存ファイバーと自由空間アプリケーションの調整用の SK010PA 偏光アナライザ。PM ファイバーの調整：目的はデータ円半径を最小にすること。

- a) ファイバーアラインメントが不調な場合、例えばファイバーを曲げると偏光状態が顕著に変化します。
- b) ファイバーの角度アラインメントが良好だと、偏光の変化とデータ円の半径はより小さくなります。