

革新的な光ファイバ応用を照らし出す

セアド・ドリック

最先端の生体医学への応用を可能にする細径のファイバベースの照射システムには、新型の光源が必要である。

細径の光ファイバによって、光遺伝学、二光子顕微鏡、硝子体網膜手術など最先端の生体医学への応用が可能となっている。しかしながら、これらの細径ファイバに十分な光を誘導することには、新型の光源を必要とする。効果的な光学設計と合わせて、レーザーダイオードがこの役目を果たし得るものであり、生体医学や生命科学だけでなく、多くの他分野でも応用される。

従来の光ファイバ照射

一般的な光ファイバ照射システムは、一次光源と二次光源（「一次光源と二次光源」を参照）、光ファイバレセプタクル、それらにある光学系、そしてパッシブまたはアクティブな冷却と電子回路を有する機械的筐体から構成される。

光源の主な光学パラメータは、エミッタサイズ、角度強度分布、発光スペクトルプロファイルだ。他の重要なパラメータには、起動時間、直接変調が可能なこと、ウォールプラグ効率、寿命、目への安全性がある。

巨大なエミッタでは、良いコリメーションを実現するために巨大なレンズが必要であり、狭いエリアへの照射や細径の光ファイバにおいては非効率だ。光源の進歩は、エミッタ面積サイズの縮小と角度強度分布の減少に直接関連するといわれている。歴史的には、ろうそく、エジソン電球、ナトリウムランプ、2~3cmサイズのランプ(キセノンランプなど)、1mm四方サイズのLED、1×5μmサイズのレーザーダイオードと存在した。エミッタサイズは光源の重要なパラメータであるにもかかわらず、しばしば製造者は公表しないか明記しないである。

角度強度分布は、遠視野放射パターン、極性放射パターン、遠視野強度分布ともいわれている。ろうそくや電球のようなかつての光源は、無指向性の角度強度分布を示す。LEDやレーザーダイオードが登場するまで、限定された遠視野放射パターンを持つものはなかった。より狭い角度強度分布拡散により、コリメーションや集束においてより多くの光を光学的に捕獲しやすくな

った。一次光学シミュレーションでは、角度強度分布の半値全幅(FWHM)拡散を考慮するのに十分である。FWHMの角拡散は、レーザーダイオード製造者が広く用いている。これと比較して、より複雑な形状を持つ他の一次光源の角度強度分布では、十分に使いこなすことがさらに難しい。

白熱電球や他のランプは、スペクトルプロファイルやスペクトルパワー分布を大きく変え得る広帯域幅のスペクトルを持つ。LEDはピーク放射波長付近で約50nmの狭い帯域幅をもち、さらにレーザーダイオードはわずか数nmの非常に狭い放射帯域幅を持つ。

光学的に関連するレセプタクルのパラメータには、サイズ、受光角、反射性がある。レセプタクルの構成には、単心光ファイバ、光ファイババンドル、リキッドライトガイドがある。レセプタクルの直径は、シングルモード光ファイバが数ミクロン、マルチモードファイバが数百ミクロン、光ファイババンドルが数ミリメートル、リキッドライトガイドなら通常5mmだ。

シングルモードファイバを例外として、受光角は通常60°以上である。反射防止コーティングのないレセプタクル表面の反射性は入射角とともに増加する。ただし、光がすべて伝搬されたときにおけるブリュースター角でのp偏光は除く。

光ファイバ系におけるトレードオフ

ラグランジェ不変量では、エミッタサ

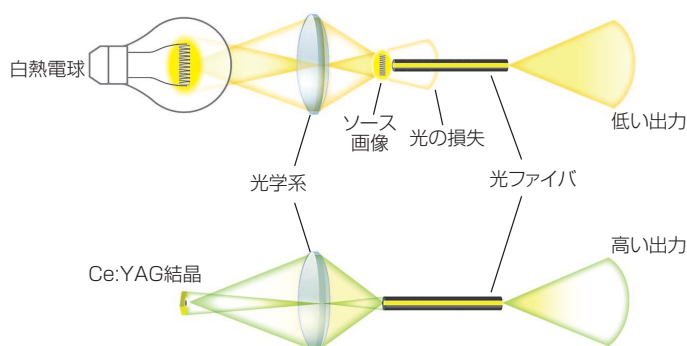


図1 光ファイバに光源を誘導する際、白熱電球では効率が悪く、Ce:YAG結晶の輝点であれば効率が良い。

イズとその角度強度拡散(エタンジェ)が光放射表面から光学系の画像表面まで一定であることを述べている。もし、光源が受容器より大きいエタンジェを有していれば、放射光の一部は必然的に損失となる。光学系の拡大によってエミッタサイズが縮小すれば角拡散が増加し、逆も然りである。残念ながら、従来の光源のエミッタサイズとエタンジェは、限られた開口数の細径光ファイバのものよりはるかに大きい(図1)。

従来のランプと組み合わせた光ファイバの照射システムは非効率的で巨大であり、複雑な光学やフィルタを有し、径が大きい光ファイバや液体ライトガイドにのみ適している。細径の光ファイバにより効率良く光を誘導するには、より小さなエタンジェ、少なくともより小さいエミッタサイズを持つ新しい一次光源と二次光源が必要となる。

径の大きい光ファイバの照射システムにおいて特定の色を持つLEDを使用することは、比較的小さいエミッタと調整のしやすさなどのおかげで従来の光源から向上が見られる。しかしながら、LEDはさほど明るくなく、細径の光ファイバへの誘導は効率が悪い。加えて、波長選択が限られている。

一次光源と二次光源

光源という言葉は通常、複雑な照明システムという意味と、ランプやLEDやレーザーダイオードのように純粋な光源という意味の両方で使われる。このあいまいさを避けるため、白熱電球、水銀ランプ、ハライドランプ、高輝度放電(HID)ランプ、蛍光ランプ、単色LED、レーザーダイオード、ガスレーザーなどの光源を意味する言葉として一次光源を使う。そして、結晶やファイバレーザーなど、一次光源からさまざまな方法で、特にほとんど

の波長域を持つ光に変換したものを二次光源と呼ぶ。

この考えは白色LEDでよく描かれる。この場合の一次光源は、蛍光体コーティングに照射する青色LEDだ。コーティングは、受け取る光の大部分を蛍光スペクトルに変換し、変換されなかった残りの青色と合わせて、いわゆる白色光を作る。その光は青色の光と蛍光体との相互作用を経て作成されるため、白色LEDは二次光源と見なされる。

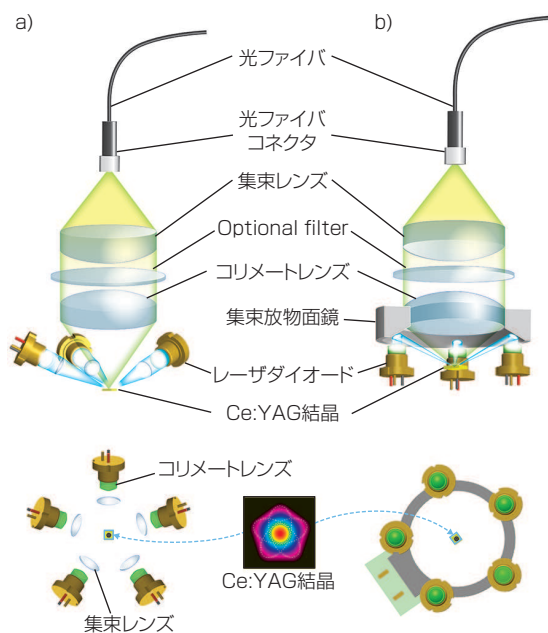


図2 プリユースター角における複数のレーザーダイオードのCe:YAG結晶による励起と、その蛍光を光ファイバがとらえることによって真に効率の良いシステムが実現した。この光源の最初のバージョンでは各レーザーダイオードとCe:YAG結晶に対して別々のヒートシンクが使われていたが(a)、次のバージョンでは共通のヒートシンクを使用する(b)。

蛍光の被覆層を持つ窒化ガリウムLEDは、スペクトル的により広い「白色」光の照射をもたらす。それにもかかわらず、単色LEDと同じ理由で細径ファイバへの誘導には適していない。

レーザーダイオードは比較的小さいエタンジェとエミッタ(厚さは1 μ m未満、長さは数ミクロンから数百ミクロン)をもち、波長板の「速軸」方向ではビーム広がりが最大70°、「遅軸」方向ではわずか12°である。青色LEDの100~

1000倍の光出力をサポートする。コヒーレント光の明るい光源をもたらす細径ファイバに、レーザーダイオード、レーザーダイオードバーやアレイを誘導するためのさまざまな実用的ソリューションがある。難点は、スペックル、狭いスペクトル帯域幅、限られた波長選択だ。

二次光源の効率

真に効率の良い光ファイバ照射システムでは、小さいエタンジェ(少なくともエリアが狭いエミッタ)、高い輝度、広い光学スペクトルを持つ二次光源が必要となる。この種の光源は、比較的小さいエタンジェと高い輝度を持つ青色レーザーダイオードで実現できる。レーザーダイオードをコリメートし、異なる入射角にて蛍光結晶の輝点に集束させると、光は広いスペクトル帯域幅の蛍光に変換される。この手法のよく知られた応用例は、BMW i8のヘッドライトデザインである。青色の光の一部を蛍光に変換し、残りの青色と混合させて白色光を合成するというものだ。

加ドリックレンズ社(Doric Lenses)

Ce:YAGの300 μm 径のスポット	出力光ファイバ												
	スペクトル幅 (nm)	100 μm , 開口数0.22			200 μm , 開口数0.53			400 μm , 開口数0.53			960 μm , 開口数0.63		
		光束(ルーメン)	出力 (mW)	放射照度 (mW/mm ²)	光束(ルーメン)	出力 (mW)	放射照度 (mW/mm ²)	光束(ルーメン)	出力 (mW)	放射照度 (mW/mm ²)	光束(ルーメン)	出力 (mW)	放射照度 (mW/mm ²)
480-680*	4.1	8.6	1095	45	94	2992	110	230	1830	168	350	484	
510-540	1	2.1	267	10	21	668	26	55	438	45	94	130	
542-576	1.3	2.7	344	14	29	923	35	72	53	452	108	149	
545-619	2.3	4.7	596	24	51	1633	60	125	996	87	181	250	
573-613	1.2	2.5	318	13	28	891	32	67	533	45	93	128	
577-647	1.4	3.0	382	16	33	1050	38	79	629	54	112	155	

*フルスペクトル

の手法では、セリウムをドーブしたイットリウム・アルミニウム・ガーネット (Ce:YAG) 結晶に、複数の青色レーザーダイオードからp偏光した光がブリュースター角で向けられ、反射損失はない (米国特許9,933,605 B2)。この手法では、結晶の非常に限定された小さいエリアでレーザービームが重なる。この光源の最初のバージョンでは5つのレーザーダイオードが用いられ、コリメーションと集束光がブリュースター角の方向に沿

って配置された (図2a)

小型化、簡便な組立、熱管理のため、この光源の次のバージョンでは複数のレーザーダイオードが同一面で放射状に配置されている。光はお互いに平行にコリメートされ、放物線を描いて蛍光結晶に300 μm 径のスポットを狙う (図2b)。この構造 (米国特許10,094,536 B1) では、蛍光結晶とレーザーダイオードで共通のヒートシンクを使用する。結晶の300 μm 径のスポットは、広い

スペクトルを持つ二次光源となる。200 μm 径のファイバに誘導するのに完璧であり、光遺伝学や小型の蛍光顕微鏡における光ファイバへの光伝搬でデファクトスタンダードとなっている。結晶の上面をよく研磨すれば蛍光 (480~650nm) のみを放射し、やや研削すれば蛍光と散乱青色光が混合されて白色光となる (図3)。もし十分な冷却があれば、他の結晶や輝点が使われ得る。この光源における出力、放射照度、光

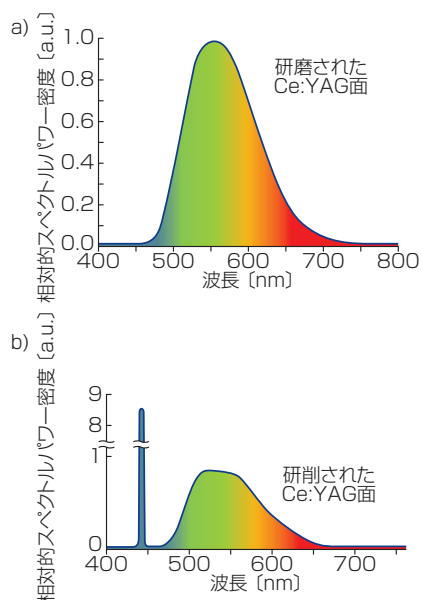


図3 青色レーザーダイオードで照射されたCe:YAG結晶の放射スペクトルは、上面を研磨するか(a)、研削するか(b)によって異なる。

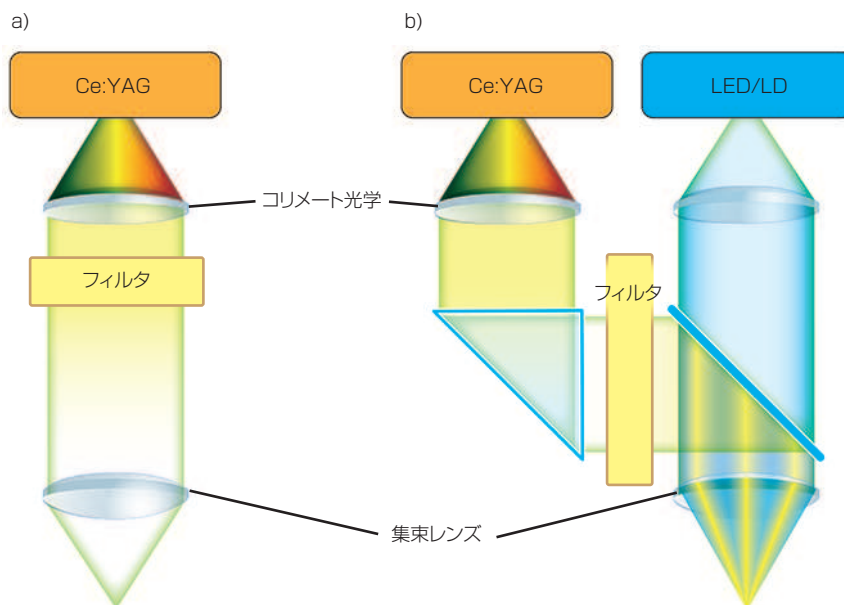


図4 スペクトルフィルタを使用するコネクタ化光源の概要を示す。蛍光のみ(a)、青色LEDまたはレーザーダイオードと組み合わせた蛍光(b)。

束の使用を表に示す。

Ce:YAG光源は、ファイバ結合モジュール、コリメートモジュール、コネクタ化Ce:YAG光源、青色LEDまたはレーザダイオードと組み合わせたコネクタ化Ce:YAG光源として供給されている。後者の2つの光源には、互換性のあるフィルタセットとドライバがある(図4)

応用

Ce:YAG光源は最初、活性制御に注目した光遺伝学において、ハロロドプシン標識された神経細胞に200 μm光ファイバを通じて黄色の光を送るために開発された。また、オプシン活性や蛍光励起に必要な480~650nmのスペクトルから任意の一部も伝搬でき

る。それぞれ小型の光遺伝学的システムと二光子蛍光顕微鏡システムで使われる(ドリックレンズ社提供)。個体レーザと異なり、Ce:YAG光源は電氣的に変調できる。

硝子体網膜手術における内部照射においてCe:YAG光源は、網膜に有害とされる青の波長を除いた広帯域の可視光をもたらすことができる。目の内部でコントラストや視認性を向上させるために青色の光が必要であれば、独立して制御可能なLEDまたはLDチャンネルを追加できる。

もう1つの利点は、200 μm径の光ファイバに合う27Gaより小さいカニキュラを、目を損傷させることなく挿入、排出できることだ。従来の電球を

200 μmファイバに誘導することはかなりの困難だったが、Ce:YAG光源なら容易である。

白色光の照射は、歯科のヘッドランプ、手術室の照明、他の医療・非医療など、発散が小さい光ビームを必要とする応用においても同様に、システム設計者やユーザーにとって魅力である。最近の顕微鏡法では、細径の光ファイバで伝搬する照明は、径が大きいファイバよりも明るい像をもたらし、かつ他の手術機器を置けるスペースが広くなるとして人気となっている。

著者紹介

セアド・ドリックはドリックレンズ社のCEO。
mail: sead@doriclenses.com http://doriclenses.com

LFWJ

光産業技術マンスリーセミナー

OITDA

Optoelectronics Industry and Technology Development Association

プログラム (10~11月)

No. / 開催日	講演テーマ / 講師
第437回 10月15日(火) 15:30-17:30	「中赤外フェムト秒パルスによる振動分光と分子反応制御」 講師： 芦原 聡氏 (東京大学)
第438回 11月26日(火) 15:30-17:30	「ライダーの仕組みとコヒーレントドップラーライダーによる風計測技術」 講師： 柳澤 隆行氏 (三菱電機)

- 場所 一般財団法人光産業技術振興協会
- 定員 各60名
- 参加費 光協会賛助会員：1,500円(税込み) / 一般参加：3,000円(税込み)
大学・公的機関：無料(学生・院生含む)
※支払いは、当日受付にて現金でお願いします。
- 申込方法 オンライン申込フォーム >>> http://www.oitda.or.jp/main/monthly/monthly_postmail.html
- 申込締切 定員になり次第締め切ります。なお、締め切った場合にはWeb上にその旨を掲載します。

問い合わせ先

一般財団法人光産業技術振興協会マンスリーセミナー担当 村谷・間瀬
〒112-0014 東京都文京区関口1-20-10 住友江戸川橋駅前ビル7F TEL:03-5225-6431 FAX: 03-5225-6435
E-mail: mly@oitda.or.jp URL: <http://www.oitda.or.jp/>