

分析用488 nm 青色レーザの開発

Development of a 488-nm Blue Laser for Biomedical Analyzers

高木 武史*
Takeshi Takagi

松浦 寛*
Hiroshi Mastuura

藤崎 晃*
Akira Fujisaki

加藤 智也*
Tomoya Kato

概要 光通信分野で培った976 nm半導体レーザと波長変換素子(PPLN)を組み合わせた488 nm青色レーザを開発した。20年という長期信頼性が要求される光通信用の半導体レーザと波長変換素子を直接結合するというシンプルな構成のため、長寿命、小型、低価格、低消費電力である。

また、基本波のスペクトルを最適化することと、出射光の一部をモニタして制御するフィードバック構造を持つことで、従来のアルゴンレーザ、DPSSレーザでは困難であった出力安定性、低ノイズ性を実現した。得られた特性は、出力20 mW以上、パワー安定性2%以下、ノイズp-p $\leq$ 1%, rms $\leq$ 0.25%であり、分析用光源として必要な特性を確認した。今後、バイオ、分析用光源としての需要が期待される。

1. はじめに

近年、社会の高齢化や遺伝子解析等の医療技術の発展を背景にバイオ分析機器分野は拡大の一途をたどっているが、細胞を分析する装置の一つにフローサイトメータ(FCM: flow cytometer)がある。

細胞にレーザ光を照射してその散乱光と蛍光から細胞の解析、分離を行う装置であるが、その蛍光励起用の光源に488 nmの青色レーザが用いられている。488 nmのレーザ光源は古くからアルゴンレーザ(argon laser)が主流であるが、ガスレーザ固有の問題(短寿命、装置の大型化、ノイズ、振動、高消費電力、発熱、定期的なメンテナンスを要する、等)があり固体ベースでのバイオ、分析用青色レーザの開発が渴望されていた。

近年になって固体ベースのDPSSレーザ(diode pumped solid state laser)が開発、販売され始めたが、まだ発熱の問題は解決されておらず、また構造上、低価格化は困難である。

当社はこれまでに光通信分野において、980 nm帯の光通信用ポンプ光源や光モジュール部品の製造に実績があるが、その技術を用いて、ガスレーザの代わりとなる488 nm青色レーザを開発した。976 nmの半導体レーザ(図1)を基本波とし、周期極反転構造を持つニオブ酸リチウム結晶(PPLN: periodically poled lithium niobate)で2次高調波(SHG: second harmonic generation)を発生させることにより、アルゴンレーザ及びDPSSレーザの性能をしのぐ青色レーザ光源を開発したのでここに報告する。

2. 488 nm青色レーザの構成

開発した青色レーザの構成を図2に示す。基本波として976 nm半導体レーザ(図1)を用い、FBG(fiber bragg grating)で波長を安定化させて導波路型の波長変換素子に直接結合している。

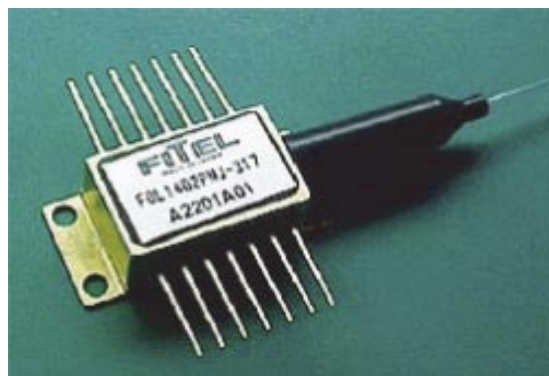


図1 976 nm半導体レーザ
976-nm semiconductor laser.

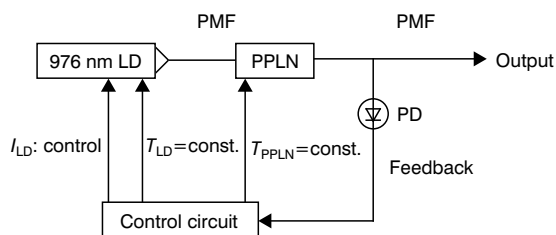


図2 488 nm 青色レーザの構成
Configuration of 488-nm blue laser.

* 研究開発本部 ファイテルフォトンクス研究所

この 976 nm 半導体レーザは、縦モードを単一にすると駆動電流の違いによりモードホップを起こしやすいため、モードホップを起こしにくいマルチ縦モード構造にしたうえに、波長を安定化させるための FBG の反射特性を最適化している。これにより波長変化に敏感な PPLN を使いながら、効率よく安定した 2 次高調波発生 (SHG) を行っている。PPLN は温度変化にも変換効率の変化が敏感なため、ペルチェクーラにより常に温度変化が 0.5℃ 以内になるように制御している。

各デバイスは専用の偏波保存型光ファイバ (PMF : polarization maintaining fiber) で光を結合している。特に PPLN の導波路から出た出射光は非対称なビーム形状をしているため PMF を通すことで理想的な対称ビーム形状に整形している。

また、光出力の安定化のために、PPLN 導波路の青色光をフォトダイオードで検出してパワー変動を抑えるよう制御している。

3. 開発目標

開発目標となるスペックを表 1 に示す。既存のバイオ用に使用されているアルゴンレーザ、DPSS レーザの特性を参考とし、分析用光源としての要求を満たすスペックを目標とした。

4. シミュレーションと基礎実験

非線形光学現象を利用して SHG を発生させる場合、

(1) 変換効率、(2) パワー安定性

の 2 点が問題になる。

原理上、基本波の線幅を狭めてピークパワーを高くすれば高効率の変換率が得られるが、基本波スペクトル変号によるパワーの不安定化が問題になる。

特に、波長変換素子の変換許容幅が狭いため、基本波スペクトルの変動は SHG のパワーに与える影響は大きく、しかも 976 nm 半導体レーザの場合、モードホップの都合上、スペクトルを完全に安定化させることは技術的に困難である。そこで我々は、(1) 20 mW 以上の変換効率を得られ、(2) なおかつ

表 1 開発目標スペック
Target specifications.

Parameter	Unit	HPU50204 spec.
Power	mW	≥ 20
Wavelength	nm	488 ± 2
Spatial mode	M ²	≤ 1.2
Beam asymmetry	—	≤ 1.15
Beam diameter (1/e ²)	mm	0.7 ± 0.15
Beam divergence	mrاد	≤ 1.25
Pointing stability	μrad	≤ 10
Noise (20 Hz ~ 2 MHz, rms)	%	≤ 0.25
Noise (20 Hz ~ 20 kHz, p-p)	%	≤ 1
Long term power stability (2 h, ± 3℃)	%	≤ 2
Warm up time	min	≤ 5
Polarization ratio	dB	≥ 16
Operating temperature	℃	10 ~ 40

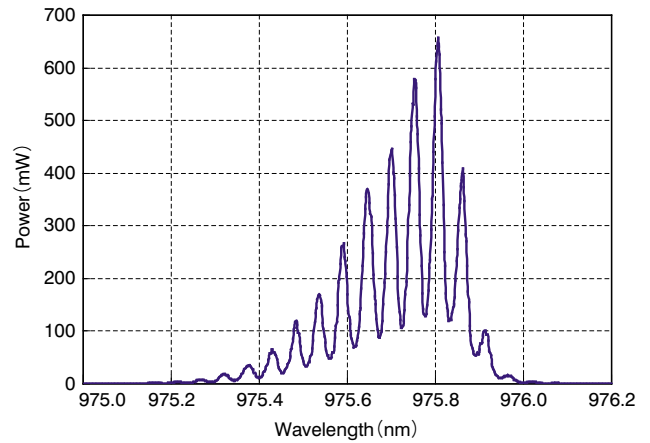


図 3 基本波スペクトル
Typical of spectrum 976-nm fundamental harmonic.

976 nm 半導体レーザのモードホップの影響が SHG のパワーに与える影響が小さくなるように、976 nm 半導体レーザのスペクトルをある程度広げ最適化した。図 3 に基本波スペクトルの代表的な例を示す。

図 3 に示すように基本波に線幅のある光源を用いる場合、得られる 2 次波は SHG 理論ではなく、SFG (sum frequency generation) 理論を用いて計算すると実験値と一致する。

入射光を波長ごと N 個に分割して、SFG の原理によって任意な波長 λ_{ij} が全ての波長 λ_j と独立に結合して、波長 λ_{ij} が

$$\frac{1}{\lambda_{ij}} = \frac{1}{\lambda_i} + \frac{1}{\lambda_j} \quad (1)$$

である光を生じるとする。位相不整合条件を、

$$\Delta k = k_{ij} - k_i - k_j - k_G \quad (2)$$

として (k_G は PPLN 分極反転周期に関する定数)

電界方程式を解いて発生する SFG の強度を求めると

$$I_s(\zeta)^2 = \frac{1}{N} \sum_{i,j=1}^N \frac{8\pi\omega_{ij}^2 W}{c^2 k_{ij}} u_{ija}^2 \sin^2(|u_{ijb}| \zeta, \gamma) \quad (3)$$

を得る。ここで、

$$u_i = \left(\frac{c^2 k_i}{8\pi\omega_i^2 W 10^9} \right)^{1/2} E(\lambda_i)$$

$$u_j = \left(\frac{c^2 k_j}{8\pi\omega_j^2 W 10^9} \right)^{1/2} E(\lambda_j)$$

$$u_{ij} = \left(\frac{c^2 k_{ij}}{8\pi\omega_{ij}^2 W 10^9} \right)^{1/2} E(\lambda_{ij}) \quad (4)$$

$$\zeta = K \left(\frac{8\pi W}{c^2} \right)^{1/2} \left[\frac{\omega_i^2 \omega_j^2 \omega_{ij}^2}{k_i k_j k_{ij}} \right]^{1/2} z$$

$$W = \frac{c^2}{8\pi \cdot 10^9} \left[\frac{k_i}{\omega_i} E(\lambda_i)^2 + \frac{k_j}{\omega_j} E(\lambda_j)^2 + \frac{k_{ij}}{\omega_{ij}} E(\lambda_{ij})^2 \right] \quad (5)$$

W は導波路内の光の伝搬を表す式である。

しかし、実際には全ての基本波は相互作用するので、SFGの導出過程において相互作用を考慮しなければならない。そこで、2つの変数を導入して、

$$W' = f(N) \cdot W$$

$$= f(N) \frac{c^2}{8\pi \cdot 10^9} \left[\frac{k_i}{\omega_i} E(\lambda_i)^2 + \frac{k_j}{\omega_j} E(\lambda_j)^2 + \frac{k_{ij}}{\omega_{ij}} E(\lambda_{ij})^2 \right] \quad (6)$$

$$\Delta k' = \Delta k'' = (k_{ij} - k_i - k_j - k_G)^\alpha \quad (7)$$

と、すると計算値が実験値に一致する。

図4に計算値と実験値のスペクトル比較を示す。PPLNの温度を変化させると位相整合条件が変わり、その結果得られる2次波のスペクトルが変化するが、計算値と実験値が一致していることが分かる。

図5に図3のスペクトルを基本波として用いた場合の変換効率のグラフを示す。変換効率で基本波パワーの10%以上、488 nm出力で40 mW以上を確認している。十分20 mW以上の光源を製造することが可能である。

5. 特性評価

開発した青色レーザの外観を図6に示す。サイズは、(L) 177 × (W) 127 × (H) 40.8 mm、消費電力18 Wと小型、低電力化

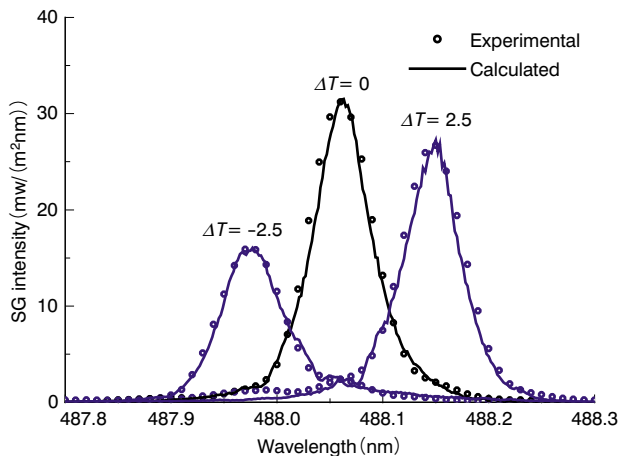


図4 計算値と実験値のスペクトル比較
Comparisons of spectrum between the calculated and experimental results.

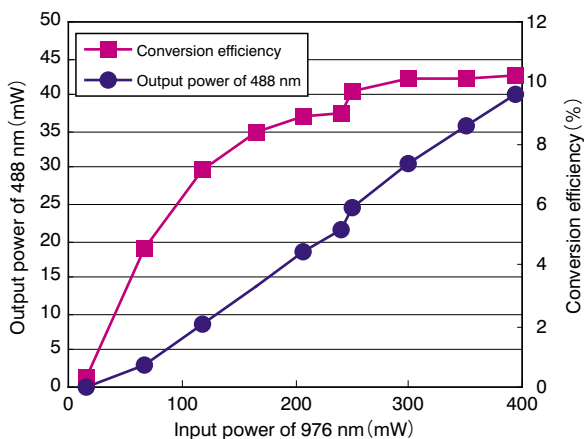


図5 変換効率
Conversion efficiency and output power of the SFG blue laser.

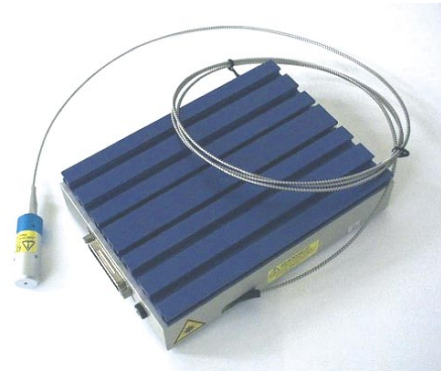


図6 HPU50204外観 ((L) 177 × (W) 127 × (H) 40.8 mm)
Appearance of HPU50204, 488-nm SHG blue laser.

表2 ノイズ特性測定結果
Results of noise characteristics measurement.

HPU50204 noise measurement			
Optical power (mW)	Filter (kHz)	Noise (%)	
		p-p	rms
20	20000	0.124	0.027
	1280	0.144	0.032
	320	0.210	0.039
	160	0.185	0.035
	20	0.210	0.034
	10	0.210	0.036

を達成している。また、出力端をファイバで引き出しているためハンドリングも容易で、用途により、コネクタ化やコリメータ化等アレンジも可能である。

次に、HPU50204の評価結果を示す。評価は、

- ①ノイズ特性
- ②パワー安定性
- ③波長安定性
- ④温度特性
- ⑤ビームプロパティの測定
- ⑥ポインティングスタビリティの測定

の6項目について行った。

5.1 ノイズ特性評価

レーザ光をPDで受光して光電変換し、更にI-V変換してオシロスコープで各周波数ごとの変動成分(p-p, rms)を測定した。結果を表2に示す。

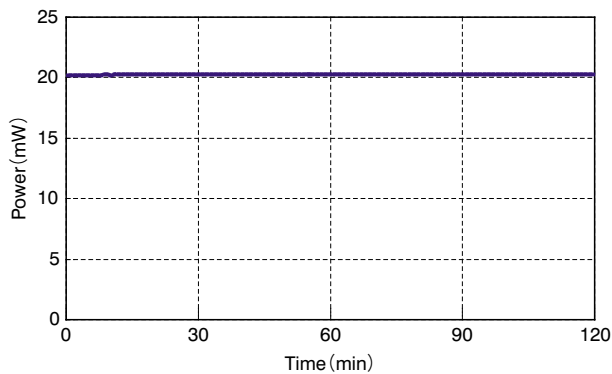
ノイズ特性は分析用光源において重要な特性であるが、目標であるp-p ≤ 1%, rms ≤ 0.25%に対し、十分小さな値を達成している。

5.2 パワー安定性評価

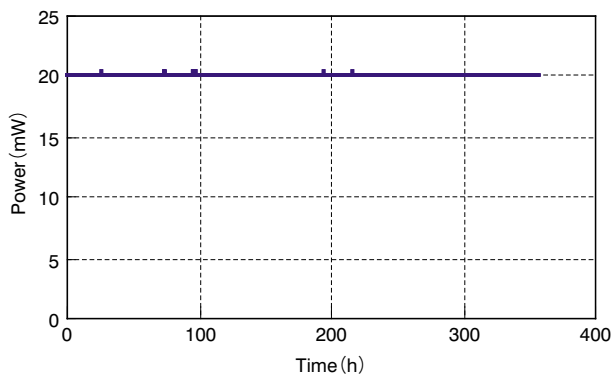
パワーの安定性評価を行った。結果を図7に示す。スペック値である ≤ 2% に対し、0.24%と十分仕様を満足している。また2週間の連続運転においてもパワーの変動幅は1.37%と安定している。

5.3 波長安定性評価

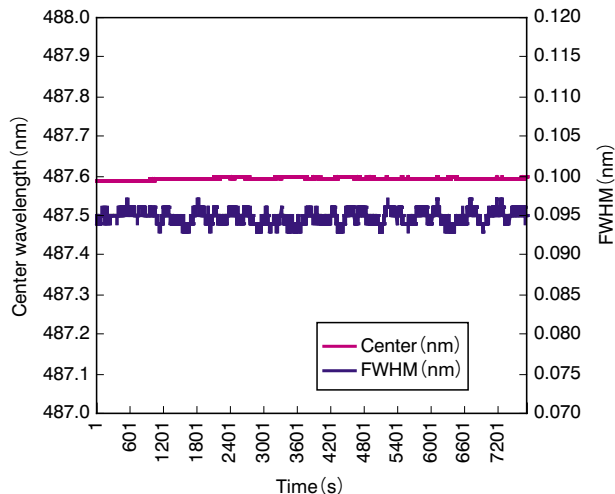
スペクトラムアナライザ(ANDO AQ6315)でスペクトルの安定性を測定した。結果を図8に示す。中心波長、FWHMとも安定しており、基本波のスペクトルの安定化、またPPLN温度の安定制御がなされていることが分かる。



(a) 2 hours



(b) 2 weeks

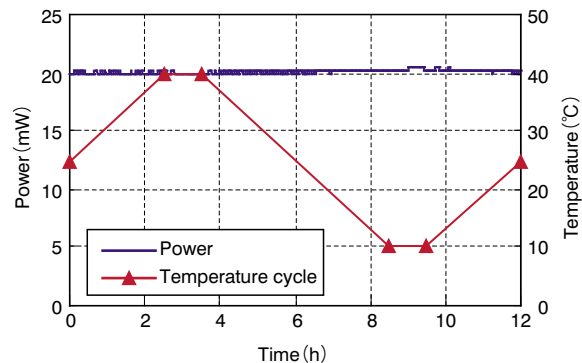
図7 パワー安定性
Output power stability.図8 波長安定性測定結果
Results of wavelength stability measurement.

5.4 温度特性評価

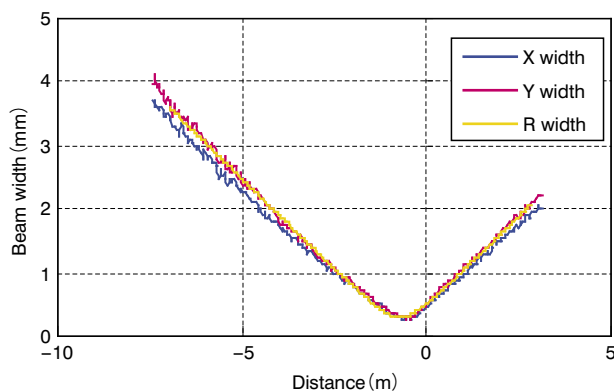
図9に温度特性測定結果を示す。温度こう配を $6^{\circ}\text{C}/\text{h}$ （スペックは $6^{\circ}\text{C}/2\text{h}$ ）とし、 $10^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ の温度サイクルをかけている。結果、 10°C で20.38 mW、 40°C で19.85 mW、変動幅で2.6%と使用環境内における安定性も良い。

5.5 ビームプロパティ評価

開発した青色レーザの出射端をf 3.85のレンズを用いてコリメータ化した時のビームパラメータの測定結果を表3、図10に示す。

図9 温度特性測定結果
Results of temperature characteristics measurement.表3 ビームパラメータ測定結果
Results of beam parameter measurement.

Parameter	X	Y	R
Spatial mode (M^2)	1.049	1.112	1.081
$2W_o$ (mm)	0.5722	0.5988	0.5859
$2W_e$ (mm)	1.0015	1.0512	1.0266
Z_o (m)	-0.72	-0.7471	-0.7337
Z_r (mm)	0.5012	0.5178	0.5099
Divergence (mrad)	1.142	1.156	1.149
Astigmatism (%) (Z_{oy}/Z_{ox})/ Z_{rr}			5.31
Waist Asymmetry ($2W_{oy}/2W_{ox}$)			1.0465
Div. Asymmetry θ_y/θ_x			1.0129

図10 ビーム伝搬表示
Beam width in external propagation.

開発した青色レーザは、出射端までファイバOUTで出ているため、レンズの選定によってどのようなビーム径でも対応は可能である。ビームプロファイラを使用して測定した結果を表3に示す。

$M^2 \leq 1.2$ の理想的なビーム形状が得られている。また、ビーム径、ビーム広がり角も目標スペック内の特性が得られている。

5.6 ポインティングスタビリティ評価

図11にポインティングスタビリティの評価系を示す。ポインティングスタビリティはアルゴンレーザ等では発熱振動によってビーム位置が動くため問題になっていた特性である。開発した青色レーザでは、ファイバ端をコリメータ化しているた

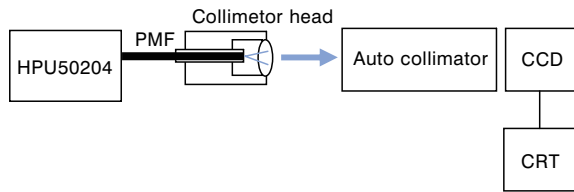


図11 ポインティングスタビリティ測定系
Measurement system for beam pointing stability.

め、レーザヘッド部の発熱、振動は全く無く、測定結果も測定分解能0.0024 mrad以下と優秀な特性を得た。

6. 信頼性

長期信頼性評価は現在、2ヶ月を経過したところであるが、特に問題は生じていない。通信用半導体レーザを基本波に用いているため長寿命が期待できる。

7. おわりに

通信用の976 nm半導体レーザと波長変換素子を組み合わせた488 nm青色レーザを開発した。開発したレーザは、シンプルな構成のため、長寿命、小型、低価格、低ノイズ、低消費電力である。今後、バイオ用分析光源のアルゴンレーザ、DPSSレーザ代替として、需要が期待される。

参考文献

- 1) M. M. Fejer, G. A. Magel, D. H. Jundt, and R. L. Byer: J. Photo Elect., **28** (1992), 2631.
- 2) J. A. Armstrong, N. Bloembergen, J. Ducuing, and P. S. Pershan: Phys. Rev., **127** (1962), 1918.
- 3) A. Yariv: Optical Electronics, Saunders College Publisher, City of publication, 4th ed., (1991), 258.