SLD の光センシング応用

中山貴司 Takashi Nakayama

[要	旨]	光センシング技術は近年医用,産業,工業計測の分野で急速に普及しつつある。このうちスーパールミネッセ
		ントダイオード(Super Luminescent Diode: SLD)を使ったシステムは主に普及価格帯向けの製品に採用され
		ている。当社の SLD は広帯域, 低コヒーレンス, 高出力という特長があることから, 光センシング用光源に最適
		である。本稿では SLD の原理や波長別の特性について説明するとともに,実際の干渉計測の結果を示す。ま
		た, 医用分野での光干渉断層計(Optical Coherent Tomography: OCT)応用, 産業分野での原子間力顕微
		鏡, ファイバ・ブラッグ・グレーティング(Fiber Bragg Grating: FBG)センシングなどへの応用例について紹介
		する。

1 まえがき

光センシングとは、光を用いて離れたところにある対象物を定量 的に測定する技術である。光を出射し対象物から反射や散乱され 戻ってきた反射散乱光の波長や出射光との時間差を測定すること で対象物との距離のほか厚みや表面粗さ、断面などが測定できる。 近年の高齢化社会をむかえる医用分野や、製造業で急速に進む デジタルトランスフォーメーション(Digital Transformation: DX)化 等での活用が期待される。

これら光センシングに用いられるスーパールミネッセントダイオード(Super Luminescent Diode: SLD)はレーザダイオード(Laser Diode: LD)並みの光出力と低コヒーレンスで広帯域の光スペクトル を有し、かつ高効率で光ファイバ結合が可能という特長がある。

2 SLD の基礎

2.1 半導体発光素子の比較

表1に端面出射型LD,SLD,発光ダイオード(Light Emitting Diode: LED)の各種半導体発光素子の特徴をまとめた。それぞれの素子の断面図を示すが、すべて電流注入によって光を生成する活性層を有している。LD は両端面に反射膜がコーティングされており、光が素子内部で反射し往復しながら増幅され、活性層の共振利得とミラー損失が釣り合ったときにレーザ発振する。スペクトル半値幅は数 nm 以下の狭いスペクトル半値幅となる。後述するコヒーレンス長は数十 cm から数 m となり、干渉しやすい光である。光出力は100 mW 以上と高出力が得られる。光は素子内の導波路を導波して端面から出射されるのでレンズ結合も可能でシングルモードファイバとの結合性も優れている。

項目	LD	SLD	LED	
発光状態	電極、 	電極、 窓領域 注性層 コーティングR1 電極 コーティングR2	電極、 ↑ _電極 活性層	
	コーティング反射率 R1 < R2	コーティング反射率 R1=R2≒0	4 <u>8</u> /1 <u>9</u> 2	
放出光	誘導放出光	増幅された自然放出光	自然放出光	
スペクトル半値幅	P 数 nm以下	P λ 10~50 nm	P ~100 nm	
コヒーレンス長	数10 cm~数 m	10~80 μm	数 µm	
光出力	数100 mW	10~数10 mW	数 mW	
ファイバ結合性	0	0	×	

寺徴
寺征

一方, LED は面から発光される。放出される光は自然放出光で ありスペクトル半値幅は 100 nm 以上, コヒーレンス長は数 μm 程 度となり干渉しにくい光である。光出力は数 mW 以下で非常に弱く, 光は素子内の導波路を導波していないためファイバ結合性は悪い。

SLD は LD に類似した構造であるが,両端面に無反射(Anti Reflectance: AR)膜をコーティングしており,光は素子内部で共振 しない。しかし,導波路を導波中に光は増幅されて,放出される光 は 自 然 放 出 光 が 増 幅 さ れ た 光 (Amplified Spontaneous Emission: ASE)になる。活性層構造や素子長にもよるが,スペクト ル半値幅は概ね 10~50 nm,対応するコヒーレンス長は 10~80 μ m,光出力は 10~数+ mW 程度が得られる。すなわち SLD とは LD と LED の中間の光出力やスペクトル半値幅, LD 同等のファイ バ結合性を有する半導体発光素子である。

2.2 SLD の素子構造

当社の SLD の素子構造を図 1 に示す。有機金属気相法 (Metalorganic Vapor Phase Epitaxy: MOVPE)による結晶成長 で素子を作成している。活性層は多重量子井戸(Multi Quantum Well: MQW)構造を採用している。基板材料は発光波長が 1.1 µm 以下の短波長 SLD では GaAs, 1.2 µm を越える長波長 SLD で は InP を用いている。



図 1 SLD 素子構造

SLD は素子内部での光の共振を抑制するために素子端面の反 射率を出来る限り低く抑える必要があり、素子端面には誘電体膜に よる AR 膜をコーティングしている。しかし、それでも反射率は 0.1% 程度が限界である。反射率とは端面で反射された光が再び導波路 に結合する確率であり、これを低減するために、後方端面近傍に導 波路が存在しない窓領域と、斜め導波路構造を複合的に適用して いる ^{1).2)}。これらの複合的な効果により、端面の実効的な反射率は 0.005%と非常に低く抑えられ、素子内の光の共振を抑制している。

2.3 SLD の光出力

図2に短波SLDの発光の模式図を示す。SLDは活性層への 電流注入により活性層で自然放出光が発生する。その自然放出光 は電極の存在する領域の導波路内を導波中に電流注入により増 幅されASE光として素子前端面から出射される。素子後端面方向 に導波された光は増幅されることはなく、さらに光は吸収される。2.2 で述べたようにSLDの端面反射率は極限まで反射率を低減してい るため光は素子内を往復せずシングルパスで進行波増幅される。 結果としてSLDの光出力は10~数十mW程度を得ることができ る。スペクトル半値幅はASE光であるため10~50 nmと広帯域で ある。また、両端面の反射率を極限まで下げているため干渉測定の 際に誤差要因となるスペクトルの振幅であるスペクトルリップルは 1%以下と非常に小さく抑えられている。

また当社 SLD のシングルモードファイバとの結合効率は 30~50%程度を得られている。



図 2 SLD 発光の模式図

2.4 コヒーレンス特性

次に SLD の特徴である低コヒーレンス性について述べる。図 3(a)に典型的なマイケルソン干渉計の図を示す。SLD からの光を ハーフミラーで2つの光路に分け、一方を測定光として測定対象物 へ照射し反射光をフォトダイオード(Photo Diode: PD)で受光する。 もう一方は参照光として参照ミラーから反射しPD で受光する。参照 ミラーは光路方向に可動して、測定光と参照光の光路長が一致し たときに光は干渉を起こし強度が強くなる。その様子を図 3(b)で示 す。横軸は光路差、縦軸は干渉強度でありコヒーレンスレベルと呼 ぶ。コヒーレンスレベルの半値半幅を可干渉距離(コヒーレンス長) *l*_cと呼び、式(1)で表される³。







(b) 元路左と強度変位
図 3 コヒーレンス実験
$$l_c = \frac{2ln2}{\pi} \frac{\lambda_c^2}{\Delta \lambda}$$
 (1)

ここでλ。はASE 光の中心波長, Δλはスペクトル半値幅である。この 式から分かるようにスペクトル半値幅が広く広帯域な光ほどコヒーレ ンス長が短く、低コヒーレンスな光源となる。当社の SLD ではλ_c = 840 nm, $\Delta\lambda$ = 50 nm で計算するとコヒーレンス長lcは 6 µm とな る。SLD はlcが非常に短く僅かでも光路長がずれると干渉しなくな るということが分かる。

SLD のコヒーレンス長が非常に短く低コヒーレンス光源であると いう特長は、干渉計測を行う上で分解能がよく干渉ノイズが小さい 測定を可能とする。

2.5 モジュール構造

当社の SLD のパッケージにはバタフライモジュール, #5.6CAN, 円筒モジュールの3種類がある。図4に各パッケージの外観写真を 示す。このうち本章ではバタフライモジュールについて詳細を述べる。



(c) 円筒モジュール (b) *\phi*5.6CAN

図 4 SLD パッケージ

当社ではファイバアンプ励起用レーザとして実績のあるバタフラ イモジュールの組立技術を保有しており、SLDも同様の部品構成と 製造工程を用いて組立を実施している。 図 5 にモジュール構造概 略図を示す。SLDチップをチップキャリアに搭載したチップオンキャ リア(Chip on Carrier: COC)とモニター用 PD をハンダ付けした基 板を熱電クーラー(Thermo Electronic Cooler: TEC)とともにパッ ケージ底面にハンダ付けする。その後、レンズアイソレータを溶接 固定し、フタをシーム溶接して密封する。最後にパッケージ壁面の サファイアガラス窓から放出される光を受けながらファイバを光軸調 整して溶接固定する。これらすべての組立工程は他の光デバイス 製品との共通化を図り高精度自動ボンディング装置による製造ライ ンで行われる。





なおアイソレータは長波 SLD バタフライモジュール製品のみ搭 載している。そのため短波 SLD モジュール, CAN, および円筒モ ジュール製品では戻り光による特性変化に注意が必要である。

3 アンリツ製 SLD 製品

3.1 アンリツ製 SLD 製品の仕様

図 6 には当社製短波 SLD の特性例,図 7 には当社製長波 SLD の特性例, **表 2** に当社製 SLD モジュールの仕様を示す。

図 6(a)の光出力・電流特性より、レーザ発振しないため電流しき い値が存在せず光出力が急激に増加する特性を示していることが 分かる。図 6(b)は 5 mW 時の光スペクトルである。通常 0.8 µm SLD(AS8B115GT30M)は単峰性のスペクトル形状を有しておりス ペクトルピーク強度の3 dBとなるスペクトル幅で定義されるスペクト ル半値幅が 14 nm である。一方,広帯域 0.8 µm SLD (AS8B115LT40MA)は電流増加に伴い短波長側の利得が増加す るように活性層を設計しているため光スペクトルは双峰性の形状で, そのスペクトル半値幅はおよそ 50 nm と広い。前述したとおりスペク トル半値幅が広いとコヒーレンス長が短くなるため,広帯域短波 SLD は干渉計測時の分解能に優れている。



(b) 短波SLD 光スペクトル特性

820

Wavelength [nm]

840

860

-AS8B115LT40MA

880

900

760

780

AS8B115GT30M

800

図 6 短波 SLD 特性グラフ

図 7(a)の光出力・電流特性では、図 6 の短波 SLD に比べ大き な電流を流すことでファイバ出力 10 mW を超える光出力が得られ ていることがわかる。 図 7(b)の光スペクトルに示すように当社の長波 SLD は 1.3 µm 帯から 1.6 µm 帯まで波長の幅広いラインナップとなっている。

1.55 μm SLD(AS5B310KM50M)は価格を抑えた廉価機種で ある。光出力は3 mW で低いが波長,スペクトル半値幅は他機種と 同等であるため,干渉計測の分解能も同程度となる。



図7 長波 SLD 特性グラフ

SLD はチップ温度が上昇すると出力が大きく下がる。これら短波 および長波 SLD モジュールは温度制御用の TEC が内蔵されたバ タフライモジュールである。そのため、外部温度に依らず SLD チッ プ温度を一定で制御でき、安定した特性を得られる。図示した特性 はいずれもチップ温度 25℃制御時のものである。

表 2	アンリツ製	SLD	モジュール	什様
1 4	ノマノノ衣	DLD	L / F	11/2

	単位		短波 SLD 0.8 µm SLD		長波 SLD			
項目					1.31 µm SLD	1.55 µm SLD		1.65 µm SLD
			AS8B115GT30M	AS8B115LT40MA	AS3B119GM10M	AS5B125EM50M	AS5B310KM50M	AS6B118GM50M
定格光出力	mW	_	5	5	15	25	3 typ	10
順電流	mA	Max	150	180	400	500		350
		Тур	—	_		—	200(電流規定)	—
中心波長	nm	Max	810	820	1290	1530	1530	1630
		Тур	830	840	1310	1550	1550	1650
		Min	850	860	1330	1570	1570	1670
スペクトル半値幅	nm	Тур	14	50	50	60	60	70
		Min	10	45	55	55	40	65

3.2 アンリツ製 SLD 製品のコヒーレンス特性と信頼性

AS8B115LT40MA のコヒーレンス特性を測定した結果を図8に示す。横軸は干渉測定の光路差であり縦軸はコヒーレンスレベルである。図8の内挿図にメインピークの拡大図を示す。当社SLDは低コヒーレンスであるため光路差が7.7 µm でコヒーレンスレベルが3 dB 落ちているのが分かる。これは式(1)で求められたコヒーレンス長6 µm とおおよそ一致する。メインピークの他に主に素子端面の反射に由来するピークが発生する。メインピークと次に大きなピークとの強度差を第2コヒーレンスレベルと呼ぶ。この第2コヒーレンスレベルが大きいと干渉計測でノイズとなってしまう。等価屈折率n_{eff}の媒質中の距離lの位置に反射点がある場合,第2コヒーレンスが起こる反射点間隔Lは式(2)で表される²⁾。



AS8B115LT40MA の素子長lは 1 mm であるためLが約 7 mm の ところに第 2 コヒーレンスピークが現れるが当社の SLD は前述した とおり端面反射率を極限まで低減しているため, 第 2 コヒーレンスレ ベルがメインピークの 25 dB 以下と非常に小さいことがわかる。

次に信頼性について述べる。AS8B115LT40MA に内蔵されて いるチップ 13 個それぞれに対して素子端面出力 15 mW (ファイバ 出力 5 mW 相当)一定制御, 雰囲気温度 $T_a = 50$ ℃で 5,000 時間 の連続動作試験を実施した。結果を図 9 に示す。縦軸は動作電流 L_{0p} である。

動作電流値が初期値の 1.2 倍となる時間を故障とし,累積故障 数が全体の 50%になる時間をメディアン寿命 ML と定義すると, T_a = 50°Cにおける寿命 ML(50°C)は約 3 万時間と推定される。素子 の寿命は式(3)のアレニウスの関係式に従うので,活性層における 活性化エネルギー E_a を 0.4 eV とすると 25°C での寿命 ML(25°C) は 10 万時間以上となり,センシング装置に搭載する上で十分高い 信頼性を有していることが分かる。



図 9 高温動作試験

$$ML = A \exp\left\{-\frac{E_a}{kT}\right\} \tag{3}$$

ここで k はボルツマン定数, T は温度である。

また,通信機器に使用される光デバイスの信頼性規格である Telcordia GR-468 CORE に準拠した振動衝撃試験,高温放置試 験,温度サイクル試験等も行い,全項目に問題ないことを確認して いる。

4 SLD の応用

4.1 SLD の干渉実験

短波 SLD モジュールを用いて干渉計測実験を行った。図 10 に 実験で用いたマイケルソン干渉計を示す。ここで光カプラは図 3 や 後述する図 12 中のハーフミラーと同じ機能をもつ。SLD モジュー ルからの光を光カプラにより分岐し、一方を測定対象物に、もう一方 を偏波コントローラと分散補償用ガラス板を通し参照ミラーに反射さ せる。測定対象物からの反射光と参照ミラーからの反射光を光カプ ラで合波させ分光器に入力する。光路長差をΔLとすると分光器で 観測されたスペクトラムは式(4)を満足するλnで強度ピークを持つ。



図 10 干渉実験系

(4)

このスペクトラムを FFT(Fast Fourier Transformation)を施すこと により*AL*を算出すれば測定対象物の反射点までの距離がわかる。 測定対象物の内部構造による反射点も観測可能である。

さらに対物レンズを横方向に走査することにより深さ方向の断層 画像を取得することができる。この測定を光干渉断層計:光コヒーレ ンストモグラフィー(Optical Coherence Tomography: OCT)という。 OCT で実際に断層を撮影した例を図 11 に示す。画像のコントラス トは反射強度を表しており明るい箇所が高反射となっている。 (a)(b)(c)はそれぞれ植物の葉の葉脈部分(a),タマネギー層(b),そ して赤線で示す鳥の羽の中心付近(c)の OCT 像である。(a)では葉 の表面のみ反射強度が高い一方,(b)ではタマネギの 1 層分の表 面と裏面で反射強度が高くなっていることが分かる。また,それらに 挟まれた層の内部まで観察できた。(c)では鳥の羽の断面形状を明 瞭に捉えることができた。



図 11 SLD による干渉実験結果

4.2 SLD の医用分野応用

血中のヘモグロビンは光の吸収が波長が短いほど大きく、700

nm より長波側で小さくなる。一方, 水は 1000 nm より長い波長で 吸収が大きい。その間の 700 nm から 1000 nm の波長域が水とへ モグロビンの吸収がともに小さい領域になる。この領域は「生体の光 学的窓」と呼ばれており, 医用センシング用の波長としてよく使われ ている。そのため, 特に 800 nm 帯の SLD を用いた OCT の眼科 での応用が盛んであり, 眼底網膜の断面観察に用いられる。これは 低侵襲で安全かつ精密な眼科検査を実現し, 加齢黄斑変性症や 緑内障の早期発見につながっている。

図 12 に SD(Spectral Domain) -OCT の光学系の模式図と当 社の 0.8 µm SLD を用いて得られた網膜の断面画像を示す。SLD からの光はハーフミラーで分岐し,一方を測定対象物である眼球の 網膜,もう一方を固定の参照ミラーに反射させる。反射されて戻って きた光を合波し分光器で受け干渉スペクトルを取得する。信号処理 は 4.1 で述べたとおりであり,図 12(b)に示す網膜の断層画像を得 られた。画像上部が硝子体側であり神経網膜,網膜色素上皮,脈 絡膜と網膜の断層構造が確認できた。特に網膜色素上皮で反射強 度が強くなっているのが分かる。また,眼球の角膜から眼底までの 距離である眼軸長を測定することも可能である。従来は眼球にプ ローブを直接接触させ超音波による測定を行っていたが光を用い ることにより非接触での測定が可能となった。眼軸長測定は白内障 の治療として人工レンズの度数を決めるための事前検査として用い られる。また,眼軸長が伸びることによる近視(眼軸近視)の検査に も用いられる。



図 12 SLD を用いた OCT

4.3 SLD の産業分野応用

(1) 原子間力顕微鏡(Atomic Force Microscope: AFM)

広帯域なスペクトルを有する SLD は表面形状や表面粗さ等の形 状計測に応用される。その一例として AFM を挙げる。 AFM の模式 図を図 13 に示す。カンチレバーの先に付いた探針と試料表面の 原子との間に働く原子間力によりカンチレバーがたわみ, そのたわ み量を計測する。そのカンチレバーの裏面に光を照射し反射光を 光変位検出器で受光し変位量を検知する。 AFM では nm オー ダーの非常に高い精度での物質表面観察が可能となる。

AFM に使用する光源はスペックルノイズが小さいという理由で SLD が有利である。スペックルノイズとは反射光同士の干渉により 光強度が揺らいでしまうという現象である。高コヒーレントなレーザ光 は干渉しやすいため時間的,空間的に輝度が変動してしまう。一方 SLD は低コヒーレントで干渉しにくいため輝度の変動は比較的少 なく非常に高精度の変位量の観測が可能となる。



図13 原子間力顕微鏡の模式図

(2) 光ファイバセンサ

光ファイバセンサの一種である FBG(Fiber Bragg Grating)セン サはファイバ内部に形成された FBG を用いて測定対象物の伸縮 (歪)や温度を測定するセンサである。SLD のような広帯域の光を 入射するとそのグレーティングピッチに対応した光のみが反射して 戻ってくる。FBG センサの屈折率が歪み,温度等で変化したときに 対応する反射波長も変化する。その結果,反射してきた光の波長を 観察することで歪,温度等のセンシングを行うことができる。

SLD を用いた FBG センサを図 14 のように構成し実験を行った。SLD からの光を FBG ファイバに入力する。FBG より反射して 戻ってきた光は光サーキュレーターを通して 64ch の AWG(Arrayed Waveguide Grating)に入力し分波する。分波された光は 64chPD アレイで受光し A/D 変換し各波長の光パワーを 計測し、FBG から反射された光の波長を計算することができる。

図 14(b)に測定結果を示す。挿入図のように水色で示すプラス チック板に緑色で示す FBG ファイバを貼り付けた。グレーティング 部は3か所ありそれぞれ FBG1, FBG2, FBG3とする。X 点に衝 撃を加えた時間を0秒とし各 FBG 部からの反射光の強度変化を 観察し歪の変化を測定できた。図 14(c)に時間を拡大したグラフを 示す。衝撃印加地点に一番近い FBG1の信号が0秒時点で変動 を始め,200 µs後に FBG2の信号が,400 µs後に一番距離があ る FBG3の信号が変動を始めた。また信号の変動量もXからの距 離に対応していることが分かった。このように FBG センサを用いるこ とで衝撃の到達時間と歪の伝達の様子を観測することができた。



5 むすび

SLD モジュールの基礎, 原理, 特性例について説明した後で, アンリツ製 SLD の高出力, 低コヒーレンスの特長を活かした応用例 を示した。

ここでは挙げられなかったがその他に医用分野では眼球の屈折 度を測定するオートレフケラトメータ等にも SLD は用いられている。 また産業分野での応用例としては,他にも膜厚計,変位計や光エン コーダが挙げられる。

今後もより高感度,高分解能なセンシングを求める市場のニーズ に対応するため,より高出力でスペクトル半値幅の広い SLD モ ジュールを開発していく必要がある。

参考文献

- 渡邉宏佑,吉田谷弘明,鈴木徹也,村上清一,山田敦史,三瀬一明, "高出力 0.8 µm SLD の開発",アンリツテクニカル, No.82, pp.59-65(2006.3)
- 2) 山田敦史,吉田谷弘明,藤田幹明,森本慎太郎,尾松孝茂,"斜め窓 構造を用いた 1.3 µm スーパールミネッセントダイオード",電子情報通 信学会論文誌 C, Vol. J97-C, No.8,pp.308-316, (2014)
- 田久保勇也, "OCT 応用のための分散チューニングファイバレーザの 性能向上に関する研究",東京大学 博士論文, 2015.12.

執筆者



中 山 貴 司 センシング&デバイスカンパニー 開発本部 第1開発部

公知