

# 超高速マルチモードファイバ通信用 面発光レーザ、フォトダイオード

Chuan XIE\*・Jiaxi KAN・Shenghong HUANG

Li WANG・Neinyi LI・Chan Chih CHEN

稲 野 滋

850 nm Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser and Photodiode for Ultra-High Speed Data Communications over Multimode Fiber — by Chuan Xie, Jiaxi Kan, Shenghong Huang, Li Wang, Neinyi Li, Chan Chih Chen and Shigeru Inano — With the advent of cloud computing, the proliferation of smart phones and tablets, and the omnipresence of social networking, the bandwidth need for data communication continues its phenomenal growth. The maximum data transmission speed is expected to double to the rate of 25 Gbit/s or 28 Gbit/s in a few years. In this paper, we report on the development of the 850 nm vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) and photodiode (PD) at Sumitomo Electric Device Innovations USA (SEDU) intended to operate at this new data rate. These devices are targeted to be used in active optical cables (AOC) and transceivers over multi-mode fiber for optical interconnect and short reach applications. We have successfully demonstrated their operation in an enhanced data rate (EDR)\*<sup>1</sup> AOC running at 25.8 Gbit/s over 50 meters of laser-optimized 50/125 μm multi-mode fiber (OM3)\*<sup>2</sup> at the Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC) 2013.

Keywords: 25 Gbit/s, 850 nm, VCSEL, PIN photodiode, AOC

## 1. 緒 言

現代の巨大なインフラであるインターネットは、歴史的に見ても驚くべき成長を続けている。利用者数の急速な伸びもさることながら、利用者一人あたりの使用データ量も急激に増加している。また近年ではインターネットに接続する機器の種類もパソコン以外のものが増えており、インターネットで利用できるサービスの種類、ネット上で保存するデータの量も飛躍的に伸びている。これらの成長を支えるための通信帯域の拡大、伝送速度の向上が喫緊の課題である。Infiniband (インフィニバンド)<sup>※3</sup>のロードマップ<sup>(1)</sup>によると、2011年に1チャンネル当たりの伝送速度が14Gbit/sになり、2014年にはその次のデータ伝送速度である26Gbit/s (EDR)が必要とされている。

筆者らはその市場要求を踏まえ、伝送速度25~28Gbit/sの次世代850nm 面発光レーザ (Vertical Cavity Surface Emitting Laser 以下VCSEL) およびフォトダイオード<sup>(3),(4),(6)</sup>を開発した。

本稿ではその開発の取り組みについて述べる。またデバイスの特性およびEDR AOCを使用した伝送実験結果を示す。

## 2. デバイス設計

2-1 VCSELの高速化設計 VCSELは端面発光型レーザに比べて小型で熱抵抗が高いため、熱飽和を起ささない低バイアス電流で、緩和振動周波数が十分に上昇する

よう考慮することが重要となる。熱的な制約のほかにも、低消費電力化、長寿命化の要求に応えるために動作電流を低減しなければならない<sup>(2),(3),(5)</sup>。

低バイアス電流で高い緩和振動周波数を得るためには、VCSELの設計において微分利得の増大、内部効率の向上、モード体積の低減を図る必要がある。

VCSELの微分利得を改善するために歪量子井戸を採用し、共振器損失を考慮して構造を最適化した。

効率の改善にはキャリア漏れの低減によるDC、AC特性の改善が必要であり、共振器及び活性領域の再設計を行った。本再設計により温度依存性の小さいVCSELが実現できる。

レーザの作製には高品質な結晶成長が重要であり、レーザの活性領域、とくに量子井戸とバリア界面の欠陥密度を低くしなければならない。欠陥が原因となりキャリアが非発光再結合し、内部量子効率が低下することでレーザ発振閾値が増大してしまう。さらに非発光再結合時に解放されるエネルギーが新たな欠陥を生み、欠陥移動が促進される。このような欠陥発生・移動は信頼性の面で大きな問題となる。

酸化狭径径が比較的大きい場合、これを小さくすることはモード体積の低減に有効である。ところが酸化狭径径がある程度小さくなると、熱飽和と抵抗の増大により帯域が制限されるため、さらに小さくしても動作速度を遅らせる

のみである。酸化狭窄径が非常に小さい場合、横方向の光閉じ込めが低下し動作速度に悪影響を及ぼす。これらの検討に基づいて、今回の VCSEL の酸化狭窄径は既存の 10Gbit/s VCSEL と同様とした。しかし 10Gbit/s VCSEL と異なり、今回の設計は垂直方向の光閉じ込めを向上させており、光強度分布と量子井戸の重なり積分が改善している。

高品質のアイパターンを得るためには、低バイアス電流で高い緩和振動周波数を達成するだけでなく、EO (Electrical to Optical) 応答の適切な減衰も重要である。減衰は主に光子寿命に左右される。図 1 のシミュレーションで示すように、光子寿命が短い場合 (低減衰)、動作バイアス電流での帯域は広がるが、EO 応答のピーキングが増大しアイパターンに大きなオーバーシュートとジッタが生じる。光子寿命を延ばすとオーバーシュートおよびジッタは低減するが、延ばし過ぎると帯域が不足しアイパターンが垂直方向に閉じてしまう。

さらに、デバイス構造の設計においては VCSEL の寄生成分に十分注意を払わなければならない。帯域を制限するのは主に、酸化狭窄径によって決まる抵抗と酸化物容量の抵抗-容量時定数で、これを最小化する必要がある。そのためにも酸化狭窄径を過度に絞ることなく、酸化物容量を効果的に低減するような設計にするべきである。

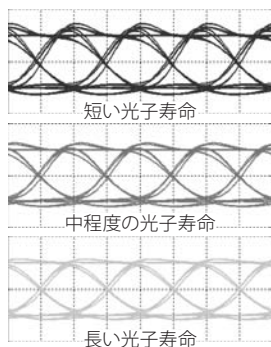
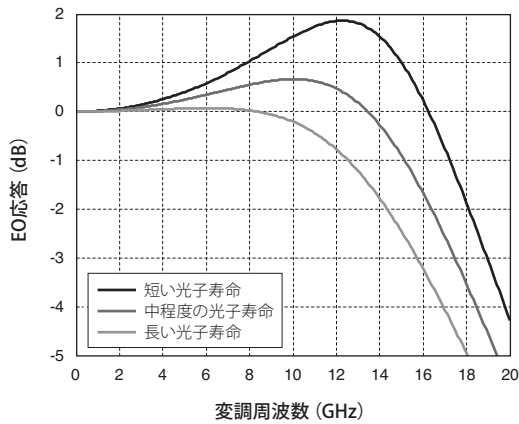
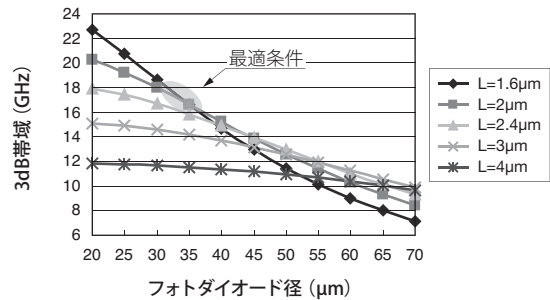


図 1 EO 応答のシミュレーション (上) および 25Gbit/s における (フィルタ通過後) アイパターン (下)

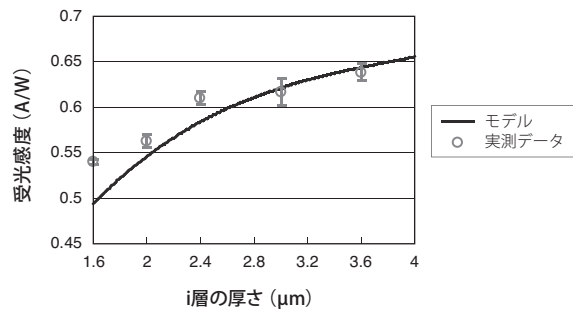
2-2 フォトダイオード設計の最適化 フォトダイオードの帯域は、それ自体の容量とキャリア走行時間という二つの要因により決定される。光ファイバとの光軸調芯のためには受光径の大きいフォトダイオードが有利だが、フォトダイオードの容量は受光部の面積に比例する。容量を下げるためにはフォトダイオードの pin 接合の i 層 (真性層) 厚、L を厚くしなければならない。一方、i 層が厚すぎるとキャリア走行時間が延びて速度が制限される。図 2 (a) に帯域のシミュレーション<sup>7)</sup>を示す (負荷は 50Ω、キャリア速度は飽和状態)。i 層の厚いフォトダイオードの帯域はキャリア走行時間により制限され、受光径を小型化しても大きく広がることはない。小型のフォトダイオードでもよい場合は、i 層を薄くして帯域を広げることができる。

フォトダイオードの応答性は i 層の厚さに依存するが、図 2 (b) に示すように、比較的薄い i 層であっても受光感度は許容範囲にある。

今回の開発においては、図 2 (a) の楕円の影付き部分内もしくはその近傍が最適条件と考えられる。



(a) フォトダイオード帯域のシミュレーション



(b) フォトダイオード受光感度に関するシミュレーションと実測データ

図 2 フォトダイオード帯域 (a) と受光感度 (b)

### 3. デバイス特性

3-1 VCSEL 帯域およびバイアス電流に対する緩和振動周波数 2-1 節に概要を述べた検討に基づいて VCSEL を作製した。この VCSEL は現在製造中である 10Gbit/s

VCSELの速度を大きく上回る。今回開発したVCSELでは、バイアス電流に対する緩和振動周波数の伸びる割合が、各温度でより大きくなる (図3 (b))。帯域が広がるだけでない

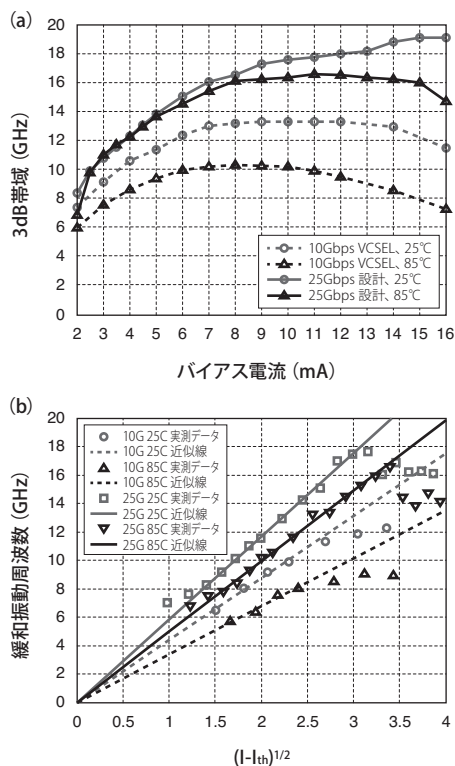


図3 帯域 (a) と緩和振動周波数 (b)

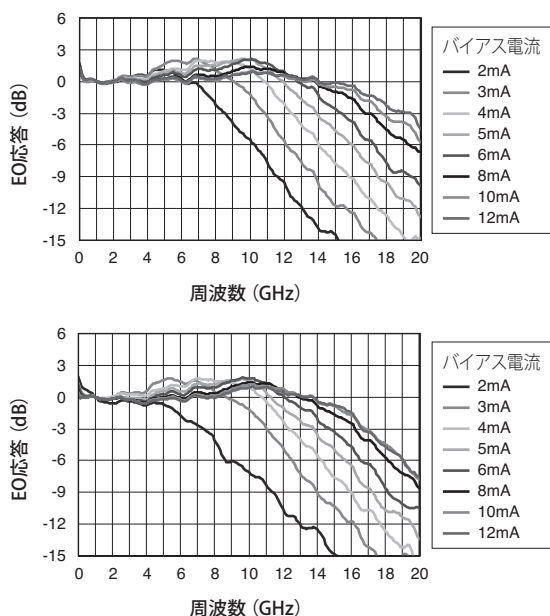


図4 開発VCSELの25°C (上)、85°C (下)におけるEO応答

く、25°C、85°Cにおける差を最小に出来た (図3 (a))。今回のレーザの25°C、85°CにおけるEO応答を図4に示す。

3-2 VCSELのアイパターン 40GHz高周波プローブとパルスパターン発生器、40GHzバイアスティーを用いて、開発したVCSELを伝送速度28Gbit/sまで評価した。VCSELの光出力は先球ファイバを介して光ファイバに接続した。アイパターンは、20GHzの帯域を持つサンプリングオシロスコープで取り込んだ。オシロスコープ自体の高周波特性による補正は行っていない。

図5に25°C、85°Cにおける擬似ランダム信号 (PRBS31 (Pseudorandom Binary Sequence 31))での25Gbit/s、28Gbit/sのアイパターンを示す。バイアス電流は25°Cで8mA、85°Cで9mAである。

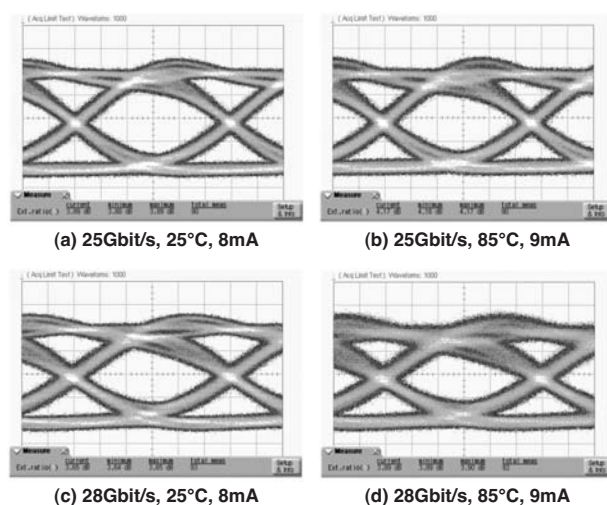


図5 25Gbit/s、28Gbit/sでのVCSELのアイパターン

3-3 VCSELのスペクトル幅 今回開発したVCSELは10Gbit/s VCSELと酸化狭口径、酸化層仕様が同じであるため、スペクトルおよびスペクトル幅も10Gbit/s VCSEL

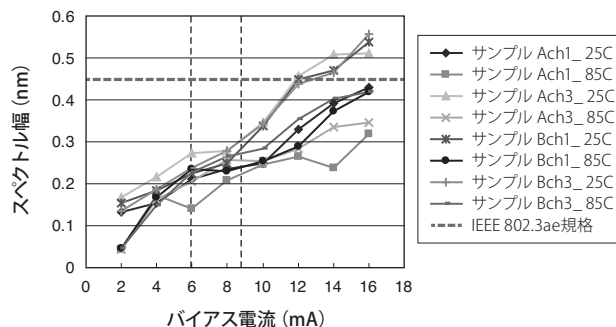


図6 開発したVCSELのスペクトル幅

と同じになる。

図6にスペクトル幅のバイアス電流依存性を示す。25℃、85℃においてバイアス電流を変化させ、2個の1×4アレイA、Bのサンプルで測定した。各温度におけるおおよその動作バイアス電流範囲を2本の縦の点線で示す。

3-4 フォトダイオード動作検証 フォトダイオードの25Gbit/s動作検証にはTIA（Trans-Impedance Amplifier）を用い、OE<sup>\*4</sup>アイパターンを直接測定した。図7に25Gbit/sのPRBS31の電気出力アイパターンを示す。これは現在市販されている二社のTIAとフォトダイオードをワイヤボンディングして測定したものである。測定の光源には今回開発したVCSELをパルスパターン発生器で駆動したものを使用した。

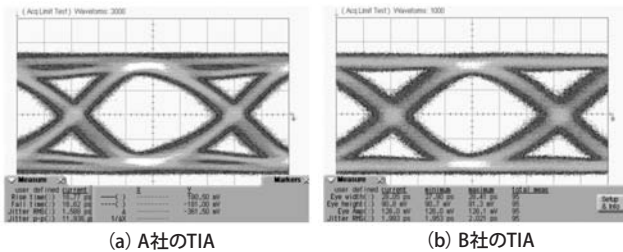


図7 35μmフォトダイオードを使用して測定したTIAの出力アイパターン

3-5 光ファイバ使用時の感度および性能 開発したVCSELとフォトダイオードの、伝送速度25Gbit/sにおけるリンクバジェットの評価を実施した。評価の構成は送信側はVCSELの駆動にはパルスパターン発生器を用い、受信側は25GHz対応TIAと共に評価プリント基板上に実装した。受信側のフォトダイオードの受光径は25μm、35μmの二種類を評価を行った。VCSELからの出力光は先球ファイバを用い、フォトダイオードに接続した。測定項目はback to back（送信機と受信機を直結させた状態）の感度および、種々の長さのOM3ファイバを通過させた時の受信感度である。パターン依存度の確認として、PRBS7、PRBS31、2種類のパターンを使用した。結果を図8に示す。

図8(a)と図8(b)のBER（Bit Error Ratio）曲線を比較すると、受光径25μmと35μmのフォトダイオードの性能は同等であることがわかる。両方の検出器ともback to backの受信感度（BER = 10<sup>-12</sup>）が、OMA（Optical Modulation Amplitude）値で-8dBmより優れている。50mのOM3ファイバでは、モード分散と波長分散によるリンクペナルティはほとんど無視できる。200mのOM3接続においてもPRBS31に対して約-5dBmのOMA感度でエラーフリー動作を達成した。最悪値パターン依存性は約1dBである。

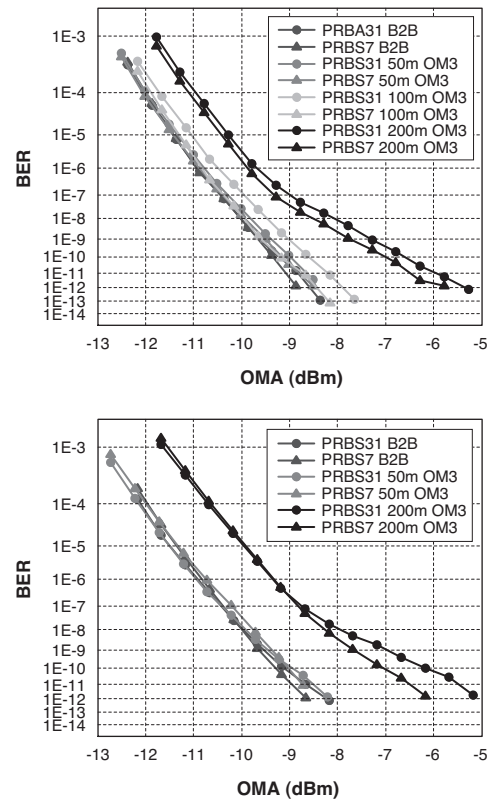


図8 受光径25μmフォトダイオード（上）および35μmフォトダイオード（下）の25Gbit/s BER曲線

#### 4. EDRでの性能実証

この開発技術をより現実的な使用条件で実証するために、プリント基板上にVCSELドライバICとTIA-ICを搭載し、EDRケーブルを作製した（図9）。高周波域での性



図9 EDRケーブルのブロック図（上）、インフィニバンドAOC（下）

能を確保するために、通常のプリント基板FR-4を基材とし、高速伝送部にはパナソニックのメグトロン6-R5775を使用した。VCSEL、フォトダイオードのそれぞれのドライバとTIAの接続にはワイヤボンディングを使用した。50m

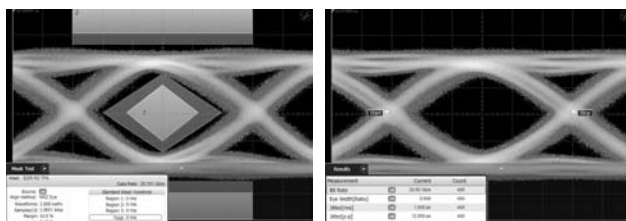
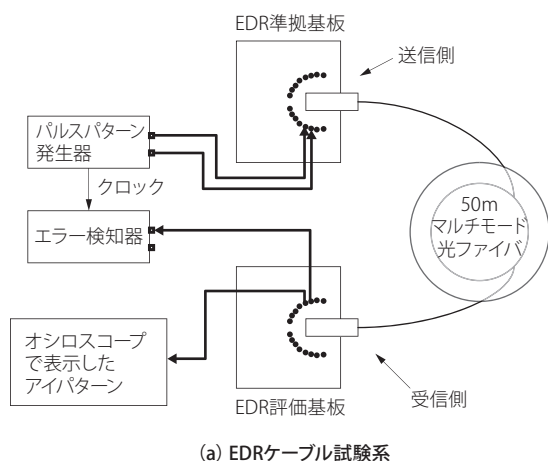


図10 EDRケーブルの電気アイパターン

のOM3マルチモード光ファイバケーブルを使用し、ドライバ、TIAのICを組み合わせて、伝送速度25.8Gbit/sでPRBS31に対してエラーフリー動作 (BER <math>10^{-15}</math>) を達成した。図10 (a) にEDRケーブルの試験系を示す。受信器出力アイパターン (PRBS31) のマスクマージン値はインフィニバンドマスク (図10 (b)) に対して40%以上である。J9ジッタ\*5は0.51mUI。伝送速度を28.05Gbit/s (32GFC\*6の速度) に上げても、PRBS31のアイパターンは良好でありジッタも小さい (図10 (c))。28.05Gbit/sの速度でもPRBS31に対してエラーフリー動作を達成した。

今回作成したEDRケーブルはOFC2013にて動態展示を実施した (写真1)。

## 5. 結 言

本論文では次世代高速VCSELとフォトダイオードの開発状況について報告した。開発したVCSELおよびフォトダイオードは25~28Gbit/sでの動作が可能で、この伝送速度でマルチモード光ファイバリンクにも適用可能であることを実証した。

本研究に際して、デバイスの作製に関してSEDU (Sumitomo Electric Device Innovations U.S.A. Inc.) のVCSEL製造工場 (米国ニューメキシコ州アルバカーキ) に、伝送試験用EDRの組み立てに関してSEDUの送受信機設計グループ (米国カリフォルニア州サンノゼ) に協力いただいた。特に、Sanh Luong氏にはフォトダイオードのサンプル作製を、Edwin Loy氏にはEDRケーブルの組み立てを担当いただいた。

注) 本論文は、英文原稿を編集委員会にて日本語訳したものである。



写真1 OFC2013での動態展示の様子

## 用語集

### ※1 EDR

Enhanced Data Rate (InfiniBand)。

### ※2 OM3

コア径50μmのマルチモードファイバw、帯域が広く、主に10Gbit/s伝送用に使用される。

### ※3 Infiniband

HPC (High performance Computing) で使用されるサーバ間通信技術。

### ※4 OE

Optical to Electrical。

## ※5 J9 ジッタ

Infiniband の伝送品質の一つ、伝送誤り率  $2.5 \times 10^{-10}$  相当のトータルジッタ量。

## ※6 32GFC

Fiber Channel、ストレージ系に使用される通信技術、現在は 1GFC、2GFC、4GFC、8GFC が運用開始されており、16GFC は運用準備段階、32G は次世代ネットワークの伝送速度 (28Gbit/s)。

## 参 考 文 献

- (1) [http://www.infinibandta.org/content/pages.php?pg=technology\\_overview](http://www.infinibandta.org/content/pages.php?pg=technology_overview)
- (2) Xie, C., Li, N., Huang, S., Liu, C., and Jackson, K. P., "The Next Generation High Data Rate VCSEL Development at SEDU," Proc. SPIE 8639 863902 (2013)
- (3) Xie, C., Li, N., Brow, P., Jackson, K. P., "Turbocharging VCSELS," Compound Semiconductor, 42-47 (October 2012)
- (4) Li, N., Xie, C., Luo, W., Helms, C. J., Wang, L., Liu, C., Sun, Q., Huang, S., Lei, C., Jackson, K. P., and Carson, R. F., "Emcore's 1Gb/s to 25Gb/s VCSELS," Proc. SPIE 8276 827603 (2012)
- (5) Graham, L. A., Chen, H., Gazula, D., Gray, T., Guenter, J. K., Hawkins, B., Johnson, R., Kocot, C., MacInnes, A. N., Landry, G. D., and Tatum, J. A., "The next generation of high speed VCSELS at Finisar," Proc. SPIE 8276 827602 (2012)

## 執 筆 者

**Chuan XIE**\* : Ph. D, Senior Staff Scientist, R&D,  
Sumitomo Electric Device Innovations  
U.S.A., Inc.



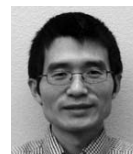
**Jiaxi KAN** : Ph. D, Senior Staff Scientist, R&D,  
Sumitomo Electric Device Innovations  
U.S.A., Inc.



**Shenghong HUANG**  
: Ph. D, Staff Scientist,  
Sumitomo Electric Device Innovations  
U.S.A., Inc.



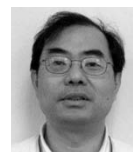
**Li WANG** : PhD, Staff Scientist R&D,  
Sumitomo Electric Device Innovations  
U.S.A., Inc.



**Neinyi LI** : Ph. D, Senior Director,  
VCSEL FAB & Development, Sumitomo  
Electric Device Innovations U.S.A., Inc.



**Chan Chih CHEN**  
: Senior Director, Module Design,  
Sumitomo Electric Device Innovations  
U.S.A., Inc.



**稲野 滋** : Vice President,  
VCSEL Technology, Sumitomo Electric  
Device Innovations U.S.A., Inc.



\* 主執筆