車載光ファイバ通信の現状と今後

各務 学^{1,7}, 小林 茂², 芹澤 直嗣³, 平岩 徹也⁴, 麻生 修⁵, 後藤 英樹⁶

¹(株)豊田中央研究所 (〒480-1192 愛知県長久手市横道41-1)

²タイコエレクトロニクスジャパン合同会社 (〒214-8533 神奈川県川崎市多摩区登戸3816番地)

³矢崎総業(株) (〒410-1194 静岡県裾野市御宿1500)

⁴古河AS(株) (〒522-0242 滋賀県犬上郡甲良町尼子1000)

⁵古河電工(株) (〒100-8322 東京都千代田区丸の内2丁目2番3号)

⁶トヨタ自動車(株) (〒170-8405 東京都豊島区東池袋3-3-5)

⁷豊田工業大学大学院 (〒468-8511 愛知県名古屋市中白区久方2-12-1)

Present Situation and Future Trends in Automotive Optical Fiber Networks

Manabu KAGAMI,^{1,7} Shigeru KOBAYASHI,² Naoshi SERIZAWA,³
Tetsuya HIRAIWA,⁴ Osamu ASO,⁵ and Hideki GOTO⁶

¹Toyota Central R&D Labs. Inc., 41-1 Yokomichi, Nagakute, Aichi 480-1192

²Tyco Electronics Japan G.K., 3816 Noborito, Tama-ku, Kawasaki, Kanagawa 214-8533

³Yazaki Corp., 1500 Mishuku, Susono, Shizuoka 410-1194

⁴Furukawa Automotive Systems Inc., 1000 Amago, Koura, Inukami, Shiga 522-0242

⁵Furukawa Electric Co. Ltd., 2-2-3 Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8322

⁶Toyota Motor Corp., 3-3-5 Higashiikebukuro, Toshima-ku, Tokyo 170-8405

⁷Toyota Technological Institute., 2-12-1 Hisakata, Tenpa-ku, Nagoya, Aichi 170-8405

(Received January 7, 2014)

The data-rate of in-vehicle communication requires improvement due to the implementation of infotainment applications and advanced driver assistance systems. In order to meet severe in-vehicle requirements, engineers have been continuously developing a physical layer, trying to choose between a metal cable and an optical fiber. In this paper, we review the present state and some future activities regarding in-vehicle optical fiber networks especially from the aspect of both device development and standardization.

Key Words: Automotive network, Optical fiber, Ethernet, ADAS, Standardization

1. はじめに

自動車用通信は電子機器の発展に伴いネットワークが大規模化・複雑化している。車載ネットワークは、Fig. 1に示すように、制御系、安全系、インフォテインメント系に大別でき、更に制御系はボディ系、パワートレイン系、シャーシー系に分類できる。自動車への光ファイバ適用は日本が世界に先駆けて1981年に日産、1982年にトヨタが採用した¹⁾。当時はプラスチック光ファイバと赤色LEDによる2 kbps程度のP2P(Pear to Pear)通信であったが、その後、通信の多重化が進み、現在ではAudiの一部量産車で150 Mbpsに至っている。この間、複数のECU(Electronic Control Unit)間を所定のネットワークプロトコルで制御された本格的なネットワークとして発展するようになり、1997年にDaimlerがインフォテインメント系で5.7 Mbps(プロトコル: D2B)、2001年にBMW

が安全系で10 Mbps(プロトコル: ByteFlight)で量産車に光ファイバネットワークを初めて搭載した。その後、D2BはMOST(Media Oriented Systems Transport)に引き継がれインフォテインメント系のデファクト規格となった。一方、ByteFlightは普及が進まず、電線を用いたFlexRayシステムへと進化を遂げている。

近年、予防安全への関心の高まりで、カメラ等の広帯域アプリが増え、安全系ネットワークの高速化も進み、インフォテインメント系と同程度の通信速度が必要とされている。これら二つの高速ネットワークを低コストで実現しようという業界コンソーシアムが欧州を起点として2011年に発足した。OPEN Alliance SIG(One-Pair Ethernet Alliance Special Interest Group)と呼ばれる団体で、UTP(Unshielded Twisted Pair)電線を用いて、汎用プロトコルEthernetをベースにリアルタイム性とフェールセーフ機能を強化した車載要件を満たすシステム開発と、そ

Fig. 1 Typical automotive network protocols (incl. a protocol under development).

の標準化に取り組んでいる¹⁾。以上のように、車載通信は高速化が着実に進んでおり、物理層として電線と光ファイバがプロトコルのデファクト競争と絡んで開発競争が起きている。本稿においては光ファイバを用いたシステムにフォーカスして、現状と開発動向を解説する。

2. 車載Ethernetシステム

複雑化する車載ネットワークを、高速Ethernetを用いて簡素化し、かつ、先進運転者支援システム(Advanced Driver Assistance Systems: ADAS)のように系をまたいだ複数のECUが連携するアプリに対して柔軟に対応可能なシステム提案がなされている²⁾。Fig. 2はその一例であり、パワートレイン系、シャーシー系、ADAS系、インフォテインメント系の各ES-ECUは、各系が接続するドメインゲートウェイを介して高速に相互接続されており、制御性向上、配線数の低減を実現している。各ES-ECUはそれぞれ小規模システムを個別に管理するECUであ

Fig. 2 An example of a network showing an automotive domain control system³⁾. Control data is transmitted in the area enclosed with the three circles. (DLC: Diagnostic link connector).

Fig. 3 Examples of networks showing a safety system and infotainment system³⁾. In the former system, the information about obstacles obtained from various sensors is sent to a control system. In the latter system, a view of surrounds is displayed using multiple cameras. Implementation of Ethernet is possible in the two dashed-line areas.

り、複数のデバイスやモジュールが接続されている。

安全系およびインフォテインメント系の搭載例をFig. 3に示す。車の前後左右に搭載されたカメラ4台と表示用ナビのシステムはサラウンドビュー表示が可能となり、同じく前後左右に搭載されたレーダーと前方監視用のステレオカメラで検出した障害物情報を制御系と連携させるADASシステムの搭載例を示している。今後進展するセンサ(フュージョン含む)技術、制御技術と一体でネットワークも進展していく。

上記は一例であるが、日本国内の自動車関連企業が集うコンソーシアム(Japan Automotive Software Platform and Architecture: JASPAR)内の次世代高速LANワーキンググループにおいて車載Ethernetに関する議論が多様になされており、物理層においても、電線と光ファイバベースの両方式が検討されている。概して、電線は低コストと標準化でリードし、光ファイバは高速化と耐電磁誘導性に優れており、特に電線に関してのこれらの比較や研究開発はIEEE内で議論され広く公開されている¹²⁾。

3. 車載光ネットワークの現状

車載光ネットワークの代表格であるMOST(Media Oriented Systems Transport)⁴⁾は2001年にリリースされ、当初、25 Mbpsであった伝送速度は2012年には150 Mbpsへと高速化の道を進み、この10年以上の間に16メーカーより150車種を超える車に搭載されてきた。Fig. 4 (a)にMOSTシステムのイメージモデルを示す。伝送路にはコア/クラッド径が約990/1000 μm のPOF(Plastic Optical Fiber)が用いられている。光ファイバは電磁ノイズの影響を受けない、また放たないという利点(電磁両立性)があり、高速伝送で用いられるシールド付電気ケーブルに比べて軽く、細く、また柔軟性があるという車載用ハーネスの軽量化の課題に応えるものである。

ところで、コネクタ内に搭載される通信ICとFOT

¹¹⁾ <http://www.opensig.org/>

¹²⁾ <http://ieee802.org/3/bp/index.html>

(Fiber Optic Transceiver)は一般的に通信性能を担保するために近接配置されることが望ましいとされているが、ヘッダーコネクタは外部とのインターフェース機能を有しているため基板端に設置しなければならない。その結果、通信ICも基板端への配置が要求される。このような制約を解消し、ECU基板の設計自由度を向上させるためFOTや通信ICを基板の任意の場所に配置できるようピグテイルタイプのコネクタも標準化されている。ピグテイルタイプの光コネクタはFOT部が直接基板に接続され、POF(～10 cm)を介して基板端に設置されたコネクタに接続されている。Fig. 4 (b)に示すようECUが複数の基板により構成される場合であっても使用できるメリットがある。ピグテイル構造であっても、ヘッダーと同一のコネクタ嵌合間口になっているため、プラグ接続の際には問題とならない。

なお、自動車の光コネクタでは、フェルールの周囲をハウジングで囲まれた構造を有していることが特徴といえる。これは自動車組立ラインにおける作業性を考慮したためである。時には、機器裏へコネクタ接続を行うこともあり、作業者は手さぐり状態でコネクタを嵌合させなければならない。その様な場合であっても光ファイバの端面を傷つけることの無いよう保護されている。

さらに、ECUの多機能化に伴い多くのコネクタを限られたスペースに搭載しなければならない。結果としてコネクタの小型化ニーズが高まりつつある。そこでMOSTでは2012年に新たに小型の光コネクタの標準化が行われた(Fig. 4 (c)参照)⁵⁾。従来のヘッダーコネクタに比べ基板占有面積を55%削減した光コネクタで、半導体部品の実装プロセスの中でコネクタ搭載できるようリフロー半田工程にも対応しており、ECU組立コストの削減にも貢献している。

POF端末の処理はガラス製の光ファイバ同様にフェルールを付けるが、その取り付け方法はユニークである。POFの直ぐ外側は、POFに密着した黒色のバッファー層で覆われており、半透明な樹脂フェルールを介して両者をレーザー溶着することが出来る。従来のファ

Fig. 4 Optical components currently used in MOST150. (a) A network example connected in a ring topology, (b) A pigtail type optical connector included in an ECU, (c) A newly developed small MOST connector (header type, 14.6 × 20.2 × 9.9 mm).

イバで行われているフェルールの接着硬化に比べ極めて簡便に取り付けられ、他の実装技術と併せて完全全自動組み立てが可能となり、低コスト化を実現している。基板に装着するヘッダーコネクタには発光素子のLED (Light Emitting Diode)、受光素子のPD(Photo Diode)が配置され電気-光/光-電気変換に加えて、フェルールのアライメント、フェルールの保持、素子の電氣的シールドなどの機構および機能が備わっている。ケーブル同様にヘッダーコネクタの組立ておよび検査も自動化が進んでいる。

4. 今後の取組 ～ギガビット伝送に向けて～

現在、一部の車種ではリアシートへの画像伝送用にSTP(Shielded Twisted Pair)等のシールド付電線を用いたP2Pのギガビット伝送が行われているが、2010年代後半には本格的なギガビットのネットワークが採用されると見込まれている。光ファイバ通信においても、ギガビット伝送への取り組みが始まっており、LEDを用いた多値伝送と半導体レーザーを用いた2値伝送の両アプローチがなされている。車載環境でのロバスト性、コストを含めた電線と三つ巴の開発競争を続けている。本節では、上記に向けた取り組みの一例として、広帯域光ファイバ、光源、多値通信技術、更には、低コスト化に向けた集積技術の紹介を行う。

4.1 光通信システムの実装

Table 1に光ファイバと光源波長、帯域を示す。産業、通信用では様々なコア径、屈折率分布の組み合わせがあるが、過去の自動車にて検討されてきたPOF、PCF (Plastic Cladding Fiber)、GF(Glass Fiber)について記載している。

自動車の中でシステムを定義する上では伝送距離15 m、中継コネクタは4点、ないしは40 m中継コネクタ無しというのが現状一般的な仕様である。その中でシステムを成立させる為に環境対応(粉塵対応、振動対応、温度対応)、組み付け対応(小曲げ半径)の課題が議論されている。特に、先に紹介した自動組み立てを意識したこれらの課題解決が重要になっている。

接続部における粉塵、振動対応についてはPOFの特徴である大きなコア径同士の空間結合では相対的に影響が小さくなり車載適用を満足できた。しかしPCFやGFではコア径が小さい為、粉塵噛み込みや振動による軸ズレ、調心系コストが課題となる。また、850 nmのVCSELを使う事によるアイセーフ、パワーバジェットについては別途アライアンス等での定義が必須となってくる。

温度対応に関しては、従来の光ファイバケーブルであれば、クラッド上の1次被覆にUV硬化樹脂を用いた物が一般的だが、自動車の耐熱要求は-40～105℃(125℃)となる。そのため、被覆材の材料再選定が必須となってくる。合わせて前述した小曲げ半径のファイバの信頼性、組電線との協調と合わせて解決していくべき大きな

課題と捉えていく必要がある。さらに、1 Gbpsより高い帯域になる事も想定すれば、ファイバ選定の際にはディーラーでの作業性、メンテナンス機器導入等のインシヤル費を含めて検討・議論しなければならない点は強く意識しておく必要がある。

4.2 広帯域光ファイバの車載適用

Table 1において最も広帯域であり、これまで主に長距離伝送路として用いられてきたGFを、自動車内の高速伝送用途で使用する場合は、車載用途の方が市場環境は厳しく、信頼性設計の見直しが必要とされる。例えば前者では最小曲げ半径30 mmであったのが、車載用途では数mmという強い曲げ応力下での保証を要求される。光ファイバの信頼性に関しては、光学的信頼性と機械的信頼性の二つがある。近年の開発により、光ファイバは曲げ起因のマクロベンド損失に対する光学的信頼性を強く有するようになった⁶⁾。このため機械的信頼性に関する議論の重要性が増している。

機械的信頼性に関する最近の研究により、GFを長尺で用いる場合の信頼性の議論と、短尺で用いる場合の議論には質的に異なる場合がある事が明らかになってきた^{7,8)}。GFを長尺で用いる場合、製造時に入った亀裂が長手方向に存在する確率が高く、それを起点に破断が生

Table 1 Various types of optical fibers for automotive use.
(*1 Fiber length: 40 m).

Fiber	IEC category	Wave-length [nm]	Data rate*1 [bps]	Core diameter [μm]	NA	Index profile
POF	A4a.2	650	~150 M	~980	0.485 ±0.045	SI
PCF	A3e	850	~1.0 G	200	0.37 ±0.02	SI
GF	A1a, A1b	850	~5.0 G	50, 62.5 (85)	0.20 ±0.0015	GI

Fig. 5 An example of an optical fiber failure probability inference model on the assumption that it is used in applications for about 15 years. A 2.5-turn for a certain bend radius is considered in this model. The inferred results are obtained by changing the strain ϵ_s in the screening process. In case of the radius being smaller than 5 mm, the difference of the screening conditions is not significant for the fiber mechanical reliability.

じる。このため、亀裂を取り除くためのスクリーニング試験の負荷を大きくするほど信頼性が高くなる。一方でGFを短尺で使用し半径数mmの小さな曲げを与える場合、加わる応力は局所的に集中して大きくなるものの、その局所部に亀裂が存在する確率は非常に小さくなる。このためガラス材料固有の強度がGFの機械的信頼性を実質的に決定する事になり、スクリーニングの負荷を大きくしても信頼性の向上には効かなくなる。Fig. 5に結果例を示す。このように実際に使われる市場環境を想定して機械的信頼性の設計を見直す事で、光ファイバの信頼性技術を構築していく事が重要である。

4.3 次世代コネクタ

次世代MOSTは将来の要求を見据え、伝送速度5 Gbpsを実現するシステムを目指し、すでに技術開発が進められている。接続部品には航空防衛分野や屋外用途、いわゆる厳しい環境下で実績のあるレンズ光コネクタの採用が検討されている⁹⁾。Fig. 6 (a)にLCコネクタハウジングを用いたレンズ光コネクタの例を示す。コネクタ端面は物理的に接触せずに光コネクタ同士および光コネクタと受発光素子の間を拡大コリメート光により光学的接続を可能とする。Fig. 6 (b), (c)に50 μmと85 μmのコア径および200 μmの拡大ビームのレンズ表面に20 μmのダストが付着したときのシミュレーションモデルとその結果をそれぞれ示した。50 μmおよび85 μmでは損失増加が顕著であるが200 μmに拡大したビームであればダストに起因する減衰の発生リスクを著しく抑えることができることを示している。

4.4 多値光通信

光ファイバ中の伝送容量を上げるために、これまでは時分割多重および波長分割多重が多用されてきた。それらの限界に伴い、近年、Multi-level, Multi-mode, Multi-core等のパラレル伝送の開発が進み、これらの頭文字を取った3M技術¹⁰⁾と呼ばれる多重伝送方式が基幹通信網で盛んである。このうち、多値(Multi-level)通信は無線

Fig. 6 Optical lens LC connector. (a) Connector configuration (b) Optical loss rate simulation on the assumption that dust (diameter of 20 μm) adheres to the lens (from 50 to 370 μm beam expander) surface. (c) Dust adhesion model.

で広く実用化されており、光デジタル信号処理技術の発展とともに、光ファイバでも実用化されるに至っている。

POFのような極端に大きなマルチモード伝送路では、モード分散が大きく、符号間干渉(Inter Symbol Interference: ISI)が、伝送路の帯域や距離の増加とともに急激に大きくなる。このようなISIを補償するために、一般にEqualization技術が用いられる。近年、KDPOF社が開発したISI補償技術は、受信側だけではなく送信側でも符号変調を行うプリコーディング方式を採用してエラー訂正を強化した。MLCC(Multi-Level Coset Codes)¹¹⁾と呼ばれる符号化技術であり、例えば、送信レベルを3値とし、それぞれのレベルでエンコードし、各レベルで同じエラー訂正システムを共有することを特徴としている。このエラー訂正システムをPOFとLEDの伝送系に適用し、通信速度1 Gbpsで伝送長50 mに成功している。成果はドイツのVDEで標準化されている¹²⁾。このようなデジタル信号処理技術の併用は、比較的安価な低速光伝送路を用いての高速通信に有効である。

4.5 低コスト集積技術

電子デバイスの低コスト化と高信頼性化に関しては、集積化が必須といっても過言ではない。光通信デバイスは受発光素子などの能動デバイスや、光導波路や分岐/結合光学系の受動デバイスのモノリシック集積にはまだ多くの研究が必要なため、現状は、個別部品のパッシブ実装やマルチチップ実装の研究が進められている。それらの一例を紹介する。

Fig. 7はコネクタモジュール内に配置された個別部品(光ファイバ、光源、光検出器、波長フィルタ)間を光配線によりパッシブ実装を行う例である¹³⁾。(a)まず、3本のスリーブ付PCFをコネクタモジュールのスロットに挿入し、対峙した空間に光硬化性樹脂を注入する。自己形成光導波路¹⁴⁾は、光硬化性樹脂が光照射により硬化が始まる際に生じる屈折率上昇で空間ソリトン効果を発現し、固体化した光導波路を自律形成する手法である。3方向から波長458 nmの光を照射すると、約200 μm の均一直径の光導波路が成長し、成長は光強度の強い方向に成長するため、相互接続が実現する。中間部に波長フィルタを予め設置しておくで合分波回路が形成される¹⁵⁾。(b)未硬化の樹脂を低屈折率の光硬化性樹脂で置換し、硬化した後、2本のスリーブを引き抜き、外径の一致し

Fig. 7 An example of a WDM (Wavelength Division Multiplexing) FOT module formation method using the self-written waveguide technology.

Fig. 8 Bit error rate properties of a fabricated WDM FOT. Two VCSELs, wavelength of 780 nm and 850 nm, are used in this module.

たVCSELとPDを挿入することで、(c)2波長(780 nmと850 nm)を用いた一芯双方向通信用モジュールが完成する。配線からパッケージまでのパッシブ一括実装の例である。伝送速度1.25 Gbpsの全二重通信において、符号誤り率 10^{-12} で規定される最小受信光量はそれぞれ-13.6 dBm, -12.5 dBmであり、基本的な通信特性に問題はないことを確認している(Fig. 8)。

4.6 チップ化集積

光部品の実装は一層の低コスト化が望まれる。Fig. 9にウェハレベルでの面発光レーザー(Vertical Cavity Surface Emitting Laser: VCSEL)を実装する3Dスタッキング法の例である。配線に従来のワイヤボンディングを用いず、全て半導体製造プロセスの延長線上で可能となるため将来の低コスト化、加えて光導波路素子との容易な結合が可能となる等、大いに期待される技術である¹⁶⁾。このようなチップ化が進めば、光通信の低コスト化が促進される。

Fig. 9 An example of a wafer-scale chip that is going to be integrated in an FOT. (a) Illustration of 3D-stacking wafer (b) Enlarged illustration showing an extracted individual FOT chip (c) Magnified photograph showing fabricated and plated wires for a VCSEL array.

5. 標準化動向

経済産業省の国際標準共同研究開発事業として「高速車載LAN用光伝送サブシステムの試験方法に関する標準化プロジェクト」が推進されており、Table 1中のステップインデックス型マルチモード光ファイバ(Step Index type Multi-Mode Fiber: SI-MMF)であるPCFおよびPOFについて、その中を伝送する光のモード分布(Mode Power Distribution: MPD)測定法に関する標準化がIECにおいて進められている。この方法はSI-MMFから放射される光パワーを遠視野像として測定し、Fig. 10で示すような、全放射光量に対する放射コーン α 内の相対パワーEAF(Encircled Angular Flux)として示される。同図では高次モード励振、または、低次モード励振された光がファイバ中を長距離伝搬すると、それぞれのMPDが平衡モード分布(Equilibrium Mode Distribution: EMD)に漸近する様子を示している。例えば、光学特性を測定する際のMPDを測定テンプレートとして標準化することで、再現性に優れた試験条件を提供することができる。また、各光部品の光学特性をEMDで測定し、かつ、その出力MPDをデータベース化することで、車載システム設計および検証ツール開発に役立てようとするTotal MPD Management¹⁷⁾というコンセプトが提案されている。光物理層のインターフェースだけではなく信号の波形管理までも含めたシステム全体をMPDで包括的に管理を行うものであり、個別部品の詳細な仕様制定や、多車種展開などによる設計工数低減にも有効である。この標準化は自動車分野だけでなく、MMFのシステムの普及が進んでいる光配線板、ファクトリーオートメーション、FTTHなどへの応用が期待される。

Fig. 10 EAF measurement example. Each curve is plotted using an A3e fiber with a certain length. L and H mean optical launching conditions of lower mode excitation and higher mode excitation, respectively.

6. まとめ

汎用プロトコルであるEthernetを車載要件で物理層からミドルウェアまでを見直し、車への普及に向けた開発が加速している。通信速度1 Gbpsに向けては、物理層として電線および光ファイバを用いる開発がコンソーシアム内で活動しており、前者は低コスト化及び標準化でリードし、後者は耐ノイズ性および高速化で有利である。両陣営ともお互いの弱点を補う研究開発を激しい競争下で行っている。本稿では光ファイバネットワーク側から見た現状と将来動向を中心に記したが、電線陣営も旺盛な研究開発を行っている。このような競争は将来の安全安心快適な自動車を実現するうえで極めて重要であり、勝ち残る技術が、標準化、認証等を経て世界中のユーザに提供されるデファクトとして花開くことを期待している。

参考文献

- 1) 増谷 孝好：プラスチック光ファイバの応用技術(宮地 杭一監修，電気書院，1988) p. 121.
- 2) G. Alderisi, A. Caltabiano, G. Vasta, G. Iannizzotto, T. Steinbach, and L. L. Bello: Vehicular networking Conference, Seoul, Korea, 2012 (IEEE, Boston, 2012) p. 187.
- 3) 後藤 英樹：「車載Ethernet技術の業界動向と自動車業界からの期待」(日経エレクトロニクスセミナ，第2回車載Ethernetが変えるクルマの未来，2013年7月11日)。
- 4) A. Grzempa: MOST Conference, Francis, 2011 (MOST Cooperation, Karlsruhe, 2012).
- 5) N. Serizawa: Elektronik automotive, Special Issue MOST (2012) p.36.
- 6) 岩屋 光洋，末松 克輝，稲葉 治巳，杉崎 隆一，布施 和幸，西本 卓矢，嘉本 健治：古河電工時報 **129** (2012) 1.
- 7) 麻生 修，松藤 敏夫，石川 卓哉，忠隈 昌輝，乙須 総一郎，八木 健，奥 誠人：古河電工時報 **130** (2012) 1.
- 8) 富田 茂，倉嶋 利雄：電子情報通信学会誌 **91** (2008) 689.
- 9) A. Engle and M. Dittmann: Elektronik automotive, Special Issue MOST (2013) p. 10.
- 10) M. Nakazawa: Optical Fiber Communication Conference (OFC), Los Angeles, 2012 (IEEE, Boston, 2012) OTu1D.1.
- 11) G. D. Forney, M. D. Trott, and C. Sae-Young: IEEE Trans. Info. Theory **46** (2000) 820.
- 12) VDE 0885-763, "Physical layer parameters and specification for high speed operation over plastic optical fibres Type HS-BASE-P," Oct. 2013.
- 13) 山下 達弥，各務 学，安田 孝，後藤 英樹：エレクトロニクス実装学会誌 **12** (2009) 417.
- 14) M. Kagami, T. Yamashita, and H. Ito: Appl. Phys. Lett. **79** (2001) 1079.
- 15) M. Kagami, T. Yamashita, M. Yonemura, and T. Matsui: IEICE Trans. **E90-C** (2007) 1061.
- 16) P. Duan, O. Raz, B. E. Smalbrugge, J. Duis, H. J. S. Dorren: Opt. Express **20** (2012) B386.
- 17) M. Kagami, A. Kawasaki, and M. Yonemura: IEEE CPMT Symposium Japan, Kyoto, 2013 (IEEE, Boston, 2013) p. 131.