

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	半導体光増幅器を用いた光アクセスシステム広域・多分岐化技術に関する研究
Title(English)	A study on semiconductor optical amplifier control technologies for long-reach and high-splitting optical access network
著者(和文)	田口勝久
Author(English)	Katsuhisa Taguchi
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10220号, 授与年月日:2016年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:植之原 裕行,浅田 雅洋,小山 二三夫,渡辺 正裕,宮本 智之
Citation(English)	Degree:., Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10220号, Conferred date:2016/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

学位論文

半導体光増幅器を用いた
光アクセスシステム広域・多分岐化技術に関する研究

2016年2月

指導教員

植之原 裕行 教授

東京工業大学大学院
総合理工学研究科
物理電子システム創造専攻
田口 勝久

目次

第 1 章	序論	1
1-1	研究背景	1
1-1-1	光ファイバ通信システムの進展	1
1-1-2	ブロードバンドサービスの普及とアクセスシステムの光化	3
1-1-3	PON システム	5
1-1-4	PON システムの標準化動向	9
1-2	本研究の目的、および意義	14
1-2-1	光アクセスシステムにおける長延化、および多分岐化の要求	14
1-2-2	光増幅 PON システムの研究開発動向	16
1-2-3	PON システムへの SOA 適用に向けた課題	20
1-2-4	本研究の目的、および意義	22
1-3	本論文の構成	23
	参考文献	24
第 2 章	PON システムへの SOA 適用に向けた技術課題	29
2-1	SOA を適用した光増幅 PON システム	29
2-2	SOA を適用した光増幅 PON システムの動作領域解析	31
2-2-1	動作領域の制限要因	31
2-2-2	SOA を適用した光増幅 PON システムの動作領域	35
2-3	ONU バースト光送信器への要求性能解析	38
2-3-1	広域・多分岐化に向けた ONU バースト光送信器への要求	38
2-3-2	多分岐化におけるバーストオフレベル特性の要求性能	40
2-4	まとめ	41
	参考文献	43
第 3 章	光波長変換型 ALC による動作領域拡大技術	45
3-1	上り信号増幅用 SOA の動作領域拡大	45
3-2	相互利得変調を用いた ALC 効果	46
3-3	中継光増幅 GE-PON システムにおける有効性検証	48
3-3-1	波長変換型 ALC の構成	48
3-3-2	波長変換型 ALC の出力特性	50
3-3-3	ロスバジェット評価	53
3-4	局置光増幅 GE-PON システムにおける有効性検証	55
3-5	中継光増幅 10-Gbit/s 級 PON システムにおける有効性検証	57
3-6	まとめ	59

参考文献.....	60
第 4 章 SGC 光を用いたパターン効果抑圧技術	62
4-1 下り信号増幅用 SOA の動作領域拡大	62
4-2 O/E/O 変換器型 SGC 光生成部を備えたパターン効果抑圧 SOA.....	64
4-3 光増幅 GE-PON システムにおける有効性検証	66
4-3-1 基本増幅特性.....	66
4-3-2 下り信号におけるアクセス区間ロスバジェット評価.....	69
4-3-3 OMA を用いたアクセス区間ロスバジェット推定.....	71
4-4 10-Gbit/s 級 PON 向けバースト光送信器に対する有効性検証.....	75
4-4-1 パターン効果抑圧 SOA を適用した 10-Gbit/s バースト光送信器	75
4-4-2 上りバースト光伝送特性評価	77
4-5 TWDM-PON 向け波長可変バースト光送信器に対する有効性検証.....	79
4-5-1 パターン効果抑圧ブースタ SOA を用いた高出力波長選択型 ONU.....	79
4-5-2 パターン効果抑圧効果およびロスバジェット推定.....	83
4-5-3 40-Gbit/s 級 TWDM-PON 上り伝送評価.....	86
4-6 まとめ	92
参考文献.....	93
第 5 章 ONU 高性能化に向けた SOA バースト制御技術	95
5-1 波長可変バースト光送信器の高性能化.....	95
5-2 高出力、および低バーストオフレベル化対応技術	97
5-2-1 パターン効果緩和に向けた利得ピーク離調設計技術.....	97
5-2-2 バーストオフレベル低減に向けたバースト制御技術.....	98
5-3 駆動電流制御ブースタ SOA を用いた波長可変バースト光送信器.....	100
5-3-1 パターン効果緩和効果、および出力特性.....	100
5-3-2 上りバースト信号 40 km 伝送実験、およびロスバジェット評価.....	104
5-4 逆バイアス電圧制御ブースタ SOA を用いた波長可変バースト送信器.....	109
5-4-1 光吸収効果の静特性、およびバースト駆動特性.....	109
5-4-2 クロストークペナルティ評価	114
5-5 まとめ	118
参考文献.....	119
第 6 章 今後の展望.....	121
参考文献.....	123
第 7 章 結論	124
研究発表リスト.....	126
謝辞	133

第1章 序論

1-1 研究背景

1-1-1 光ファイバ通信システムの進展

現在、光ファイバ通信システムは、大陸間を結ぶ光海底ケーブルシステム、地域間を結ぶコア/メトロネットワーク、および通信事業者ビルと各家庭を結ぶアクセスネットワークに至るまで、情報化社会を支える重要な通信インフラとして、全世界で導入されている。これら光ファイバ通信システムの研究開発は、1966年にイギリスの **Standard Telecommunication Laboratories** に所属する **K. C. Kao** らが行った、高純度化したガラス繊維を用いた光による通信の可能性に関する報告 [1]、および 1970年にアメリカの **Bell Telephone Laboratories** に所属する **I. Hayashi** らが行った、GaAs系半導体レーザの室温連続発振に関する報告 [2]、および同じく **Bell Telephone Laboratories** に所属する **S. D. Personick** らが行った、高感度受信器を用いたデジタル光ファイバ通信システムに関する報告 [3]、などを契機として本格化した。特に、光ファイバの低損失化においては、**K. C. Kao** の報告から4年後の1970年に、アメリカのガラスメーカーである **Corning** 社が、光信号波長 **632.8 nm** における損失を、**20 dB/km** まで低損失化した石英系光ファイバを発表した [4]。また、伝送路に用いる光ファイバについても、研究当初のマルチモード光ファイバ (**MMF: Multi mode fiber**)から、更なる低損失化・伝送帯域拡大を可能とするシングルモード光ファイバ (**SMF: Single mode fiber**)へと代わり、1979年には **NTT** が、光信号波長 **1550 nm** において **0.2 dB/km** の低損失化を実現した **SMF** を報告した [5]。これら、光ファイバ技術の進展に伴い半導体レーザの発振波長も **850 nm** 帯から、**SMF** のゼロ分散波長帯である **1300 nm** 帯、さらには **SMF** の最低損失波長帯である **1550 nm** 帯へと遷移した。一方、光ファイバ、および半導体デバイス技術と並行して、光ファイバ通信システムの研究開発も精力的に進められ、国内においては1985年には旭川から鹿児島まで縦貫する光ファイバネットワーク、および1989年には太平洋横断海底ケーブルシステムが導入された。また、1987年には、希土類元素であるエルビウムを光ファイバに添加し、励起光源を用いることで、**SMF** の低損失波長帯である **1550 nm** 付近での光増幅動作を実現する、エルビウム添加光ファイバ増幅器 (**EDFA: Erbium doped fiber amplifier**)が報告され、1989年には **1480 nm** 帯小型励起光源を用いた **EDFA** が実現された [6-8]。それまでは、中継器に入力された光信号を電気信号に変換し再生処理した後、再度光信号に変換して中継する光/電気/光 (**O/E/O: Optical/Electrical/Optical**)中継器を導入していたが、高効率かつ低雑音で光増幅可能な小型 **EDFA** が開発されたことにより、**10 Gbit/s** 以上の高速信号増幅、および中継間隔の延伸が可能となった [9]。これら **EDFA** は、波長分割多重 (**WDM: Wavelength division multiplexing**)信号の一括増幅を可能とし、さらには1990年代前半に石英導波路回路 (**PLC: Planar lightwave circuit**)技術が確立され、**WDM** 中継伝送

システムのキーデバイスであるアレイ導波路回折格子 (AWG: Arrayed waveguide grating) [10]に代表される波長合分波器が実現されたことにより、これら要素技術を組み合わせた長距離 WDM 中継光伝送システムの検討が本格化した。これら、WDM 中継伝送システムは 1999 年の実用化以降、大陸間を結ぶ海底光ケーブルシステム、および国内の中長距離ネットワークを支える基盤技術として導入が進められ、現在では 40 Gbit/s の光信号を 40 波多重した、1.6 Tbit/s の WDM 伝送システムが運用されている。

また、2004 年より、さらなる伝送容量、および伝送距離の拡大に向けて、送受信回路にデジタル信号処理 (DSP: Digital signal processing)技術、およびコヒーレント検波技術を組み合わせることにより、それまで制御することが困難であった、光の波としての性質である位相や偏波を活用した多値変調信号の長距離伝送を可能にする、デジタルコヒーレント技術が提案され、活発に研究開発される様になった [11-13]。現在では、変調方式として光信号の光波を 4 つの異なる位相状態に変調する、4 値位相変調 (QPSK: Quadrature phase shift keying)信号が主に用いられており、これらデジタルコヒーレント技術は、送信部においては信号を多値変調することにより、高周波数利用効率による大容量化が可能となる。また、受信部においてはコヒーレント検波に DSP 技術を適用することにより、高速変調信号が長距離伝送時に受ける、波長分散や偏波分散による波形歪みの補償が可能となり、伝送距離の拡大が可能となる。これらデジタルコヒーレント技術の適用により、従来の光中継伝送システムで必要であった分散補償光ファイバ (DCF: Dispersion compensation fiber)が削減でき、システムの経済化が期待できる [14]。さらに、近年では、抜本的な伝送容量の拡大を狙った、マルチコアファイバ (MCF: Multi core fiber)を用いた空間分割多重 (SDM: Space division multiplexing)技術や、光のモードを利用したモード多重 (MDM: Mode division multiplexing)技術が提案され、検討が進められている。特に、システム伝送容量の進展は顕著であり、2012 年においては、一般的な光ファイバであるシングルコア SMF を用いて、WDM 信号に DSP を適用した 102.3 Tbit/s 伝送が世界記録であったのに対して [15]、2015 年現在においては 22 コアシングルモード MCF を用いた 2.15 Pbit/s 伝送 [16]、および 19 コア 6 モード MCF を用いた 2.05 Pbit/s 伝送 [17]などが報告されている。つまり、研究レベルではあるが、限界が近いとされていた光伝送システムの伝送容量は、この数年間で 1 桁以上向上したことになる。このように、光ファイバ通信の技術革新は、伝送容量および伝送距離の拡大を目指して、中継光伝送システムの高度化を目指して行われてきた。

1-1-2 ブロードバンドサービスの普及とアクセスシステムの光化

1990 年後半からインターネットが一般家庭に普及するに伴い、それまではメタルケーブルを用いた電話による音声サービスが中心であったアクセスネットワークにおいても、データ通信への対応が求められるようになった。インターネットの普及初期においては、アナログの電話回線を利用したモデムによるダイヤルアップ接続、またはメタルケーブルで 64~128 kbit/s のデジタル通信が行える、ISDN (Integrated services digital network)回線の利用が主流であった。その後、インターネット技術が発展し、音楽配信、動画共有、ファイル交換等、サービスが充実するにつれて、メタルケーブルを用いて、より高速なデータ通信が行える ADSL (Asymmetric digital subscriber line) サービスが 1999 年に登場し、サービスの低価格化を実現したことから、爆発的にユーザを獲得することとなった。しかし、ADSL はメタルケーブルの周波数上においてアナログ電話の音声周波数帯である 0.3~3.4 kHz を避け、データ通信用周波数帯を 26 kHz ~3.7 GHz の高周波領域に割当てたため、サービス提供エリアや通信品質が、収容局からの距離や外部ノイズなどの影響により制限され、サービスの安定提供に課題があった。

一方、ADSL に代わるブロードバンドサービスとして、光ファイバを各家庭まで引き込み光ファイバ通信による高速サービスを提供する、FTTH (Fiber to the home) サービスが 2001 年に開始された [18]。ブロードバンドサービスユーザの推移を図 1-1 に示す [19]。FTTH サービスは、中継光伝送システムと同じく、伝送路に用いる光ファイバの低損失特性、広帯域特性により、メタルケーブルを用いたデータ通信と比較して格段に安定した通信サービスを提供する。また、アクセスネットワーク特有の特徴として、メタルケーブルと比較して、落雷による故障耐性が高い特徴を有する。サービス開始から 15 年が経過した 2016 年現在において、FTTH サービスは 2660 万加入者を獲得し、国内におけるブロードバンドサービスインフラの主役として利用されるとともに、システム更改などを検討する時期に差し掛かっている。

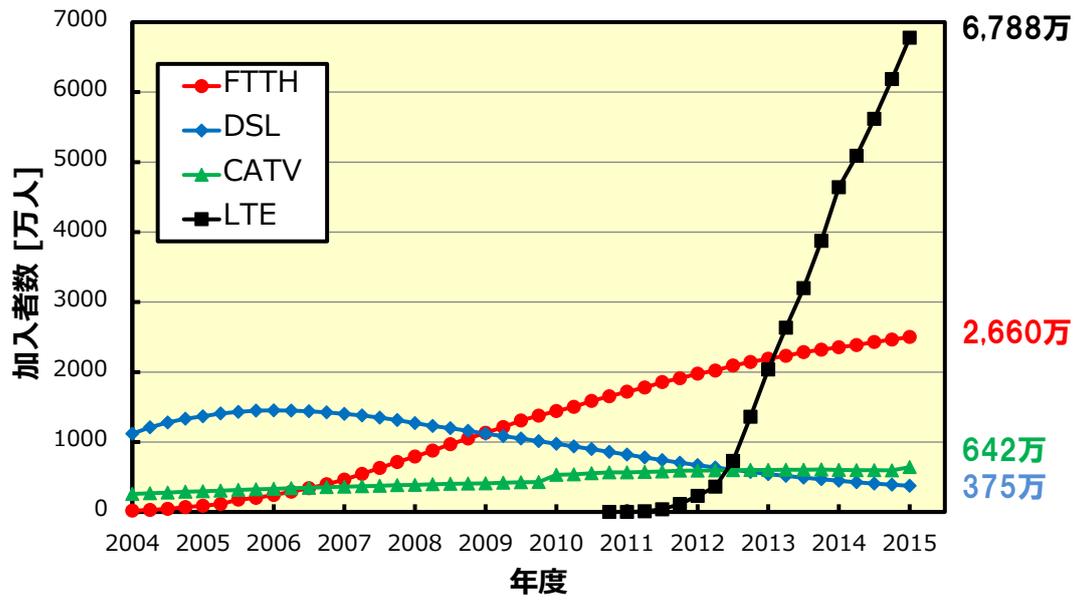


図 1-1 日本におけるブロードバンドサービスユーザ数の推移。

1-1-3 PON システム

現在、世界各国で導入が進められている TDM-PON (Time division multiplexing-passive optical network)システム、および次世代光アクセスシステムとして標準化が進められている TWDM-PON (Time and wavelength division multiplexing-PON)システムの構成について説明する。図 1-2 に TDM-PON システムの構成を示す。TDM-PON のコンセプトは 1987 年に BT より提案され、その後の PON システムの研究開発に発展した [20]。PON システムでは、収容局に設置された光加入者線端局装置 (OLT: Optical line terminal)と、複数の加入者宅内に設置された光加入者線終端装置 (ONU: Optical network unit)を、光ファイバ伝送路中に設置されたスプリッタを介して接続する。一般的なメトロ/コアネットワークで用いられている光中継伝送システムでは、双方向通信に別々の光ケーブルを用いるのに対し、PON システムでは光ファイバの敷設コスト削減のため、ONU から OLT に送信される上り信号、および OLT から ONU に送信される下り信号を一本の光ファイバを用いて双方向伝送する。このため、上り下り信号は異なる波長を用い、OLT および ONU に搭載される光トランシーバの入出力は、光送信器と光受信器を WDM フィルタと結合した構成により一心化される。これら一心双方向モジュールは、BOSA (Bidirectional optical sub-assembly)と呼ばれ、PON システムに広く使用されている。OLT から送信される下り信号は、スプリッタを介して全 ONU で受信される連続信号であり、各 ONU 宛てデータは下り連続信号を構成するタイムスロットに割り当てられ、各 ONU は自宛のデータを選別して受信する。一方、上り信号は、スプリッタで合波される際に、各 ONU から出力された上り信号が衝突しないよう、OLT によって発光タイミングを制御された、間欠的に送信されるバースト信号となる [21]。このため、ONU に用いる送信器には瞬時に発光および消光動作が可能な、バースト光送信器 (B-Tx: Burst-mode-transmitter)が採用される。さらに、各 ONU の収容位置が異なること、および ONU 送信器の送信パワーに個体差によるばらつきがあることから、OLT に用いる受信器にはこれらバースト信号に対応したバースト光受信器 (B-Rx: Burst-mode-receiver)が採用される。特に OLT 受信器には、高感度化はもとより、近距離 ONU の収容を可能とするため、強い光入力パワーにおける良好な受信特性、すなわち広いダイナミックレンジ受信特性が求められる。一般的に、連続信号受信である下り信号と比較して、バースト対応が求められる上りバースト送受信技術は難易度が高く、10G-EPON システムや XG-PON システムに代表される 10 Gbit/s 級 TDM-PON システムの研究開発においては、重要な要素技術として研究開発が進められてきた。なお、これらバースト送受信技術は PON システム特有の技術である [22-24]。

図 1-3 に TWDM-PON システムの構成を示す。OLT は、送受信波長がそれぞれ異なるバースト対応光トランシーバ(B-TRx: Burst-mode transceiver)を備えた 4 台の CT (Channel termination)、および動的波長帯域割当 (DWBA: Dynamic wavelength and

bandwidth allocation)コントローラから構成される。ONU は波長可変バースト対応光トランシーバ(Wavelength tunable B-TRx: λ -tunable B-TRx)を備え、送信および受信波長を上り信号 ($\lambda_{u1} \sim \lambda_{u4}$)、および下り信号($\lambda_{d1} \sim \lambda_{d4}$)の各 4 波長から選択して送受信を行う。これら ONU に波長可変送受信機能を備える点が、TDM-PON との大きな違いである。代表的な波長可変送信器として、TEC (Thermoelectric cooler)やヒータによる温度制御によって発振波長を制御するタイプ、送信波長の異なる EA-DFB (Electro-absorption modulator integrated distributed feedback laser diode)を集積したアレイデバイスと電気スイッチを組み合わせて発振波長を選択するタイプ、注入電流により半導体の屈折率を変化させることにより送信波長を制御する SSG-DBR (Superstructure grating distributed bragg reflector laser)タイプなどが提案されている [25, 26]。一方、波長可変受信部では、APD-TIA (Avalanche photo diode-transimpedance amplifier)を集積したアレイデバイスと電気スイッチを組み合わせて波長選択受信するタイプ、受信器前段に設置された誘電体多層膜フィルタの入射角を、温度によって変化させることで受信波長を制御するタイプなどが報告されている [27]。これら技術を用いて ONU をカラーレス化することにより、段階的なシステムのアップグレード(Pay as you grow)、波長切り替えによる局内装置の冗長化 (プロテクション)機能、および省電力化機能など、運用中の波長可変性の活用による、更なる PON システムの高度化を図ることができる [28, 29]。

標準化で規定される OLT 構成では、各 CT は WM (Wavelength multiplexer)と呼ばれる波長合分波部に接続される。これら WM と CT の形態は、標準化において規定されていないが、代表的な 3 種類の構成について図 1-4 に示す。図 1-4 (a)に示す WM にパワースプリッタを用いる構成では、4 波長分の上り信号が全 CT で受信される。このため、各 CT に搭載される光バーストトランシーバは、受信部に任意の波長を選択するバンドパスフィルタ (BPF: Band pass filter)を備える必要がある。一般的なトランシーバは、受信部にこのような BPF 機構を搭載していないが、近年では TWDM-PON システム向けに受信部に波長選択用 BPF フィルタ構造を有する BOSA を備えた、OLT 用光トランシーバが提案されている [30]。本構成は、既存 TDM-PON システムで用いられているパワースプリッタ設備に適用することが可能である。一方、TWDM-PON システムでは CT に搭載する光トランシーバの送受信特性は、WM の ODN (Optical distribution network)に接続されたポートで規定される。このため、WM にパワースプリッタを用いる本構成では、分岐損失分の過剰損を、光トランシーバの送信パワーおよび受信感度が受けるため、標準化で規定されている送受信仕様を満たすことが困難となる。図 1-4 (b)に示す WM に Cyclic AWG を用いる構成では、Cyclic AWG が光ルーティング素子として働くため、入力された上りおよび下り信号は各信号波長に応じた出力ポートに出力される [31]。このため、各 CT に一般的な光バーストトランシーバを搭載することができ、かつ Cyclic AWG により 5 dB 程度の挿入損失で対応波長数を拡大す

ることが可能となる。一方、現状の4波長程度の運用を想定している TWDM-PON システムでは、パワースプリッタ4分岐構成の分岐損失6 dBと比較して、大きな優位性を見出せない。図1-4(c)に示すWMに上り下り信号を合分離するC/Lフィルタを用いる構成では、CTを各波長に対応した光送信器と光受信器を分離した形態で構成する。本構成では、WM相当部分を、上り下り信号分離用のC/Lフィルタ、および各波長選択用のDWDM(Dense WDM)フィルタのみで構成できる。よって、WM部分の挿入損失の観点においては、本構成はこれら3構成の中で最も低損失にWM部を構成できる。しかし、本構成では、先に述べた波長可変性によって可能となる、局内装置の冗長化などのアクセスネットワーク高度化機能を実現できない。以降、本論文においてはTWDM-PONシステムのWM構成として、パワースプリッタ構成とCyclic AWG構成について述べる。

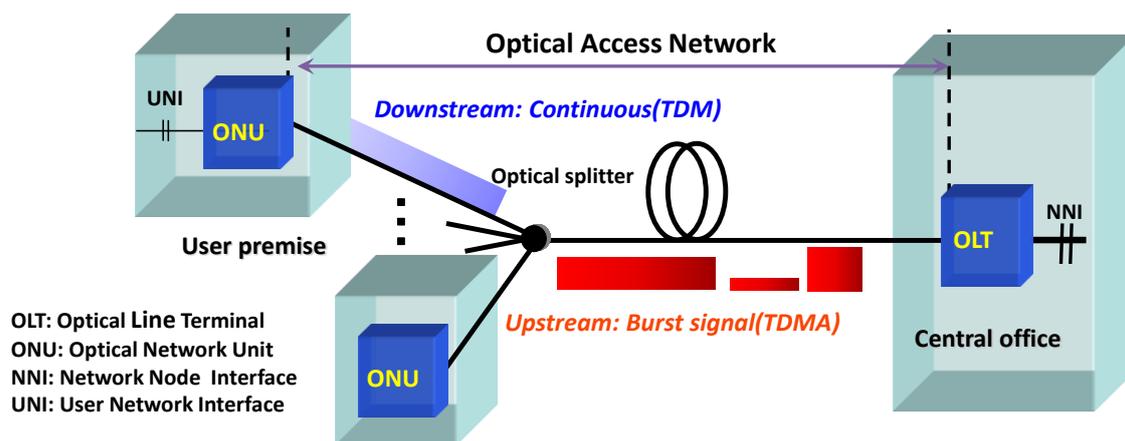


図 1-2 TDM-PON システムの構成.

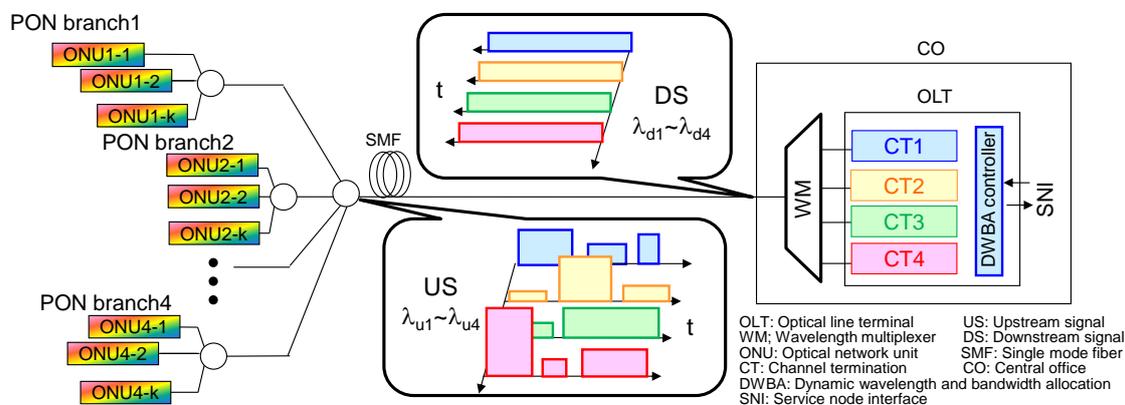


図 1-3 TWDM-PON システムの構成.

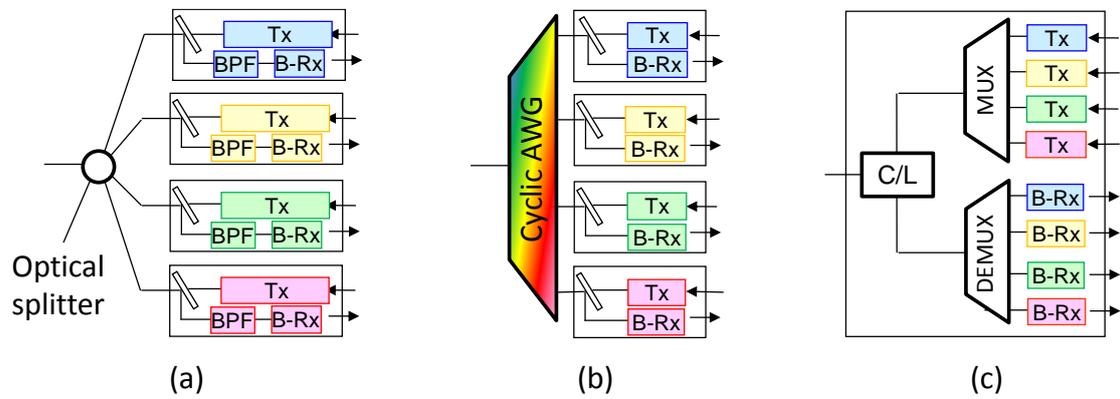


図 1-4 OLT の構成. (a) スプリッタ構成の場合. (b) Cyclic AWG 構成の場合. (c) 送受信器分離構成の場合.

1-1-4 PON システムの標準化動向

光アクセスシステムの標準化は IEEE (The institute of electrical and electronics engineers) 、 および ITU-T (International telecommunication union telecommunication standardization sector)によって進められている。図 1-5 に、IEEE [32, 33]と ITU-T における PON システムの標準化動向 [34-36]、および Ethernet の標準化動向を示す。Ethernet は LAN (Local area network)において最も普及している伝送プロトコルであり、PON システムに先行して標準化が進行している。IEEE においては、Ethernet フレーム上で通信を行う Ethernet-PON (E-PON)の標準化が行われている。一方、ITU-T においては、伝送プロトコルに依存しない PON システムの標準化が行われている。図 1-5 に示すように、PON システムの標準化は 1997 年の B-PON (Broadband-PON)システムの標準化を皮切りに、ビットレートの観点においては Ethernet 標準化から 7 年程度遅れて標準化がなされている。日本国内においては、2001 年から B-PON による FTTH サービスが商用導入され、続いて IEEE にて標準化された GE-PON が 2004 年に商用導入されている。近年の海外における FTTH サービス展開を鑑みると、中国をはじめとしたアジア各国において、GE-PON システムの導入が進められている。一方、ITU-T にて標準化された G-PON システムは、北米およびヨーロッパ各国への商用導入が積極的に進められ、世界的にユーザ数を拡大している。表 1-1 に、GE-PON システムおよび G-PON システムの標準化規格を示す [32, 34]。GE-PON システムの伝送速度は、上り下り共に 1.25 Gbit/s の対称構成のみ標準化されているのに対し、G-PON の伝送速度は、上り 1.25 Gbit/s、下り 2.5Gbit/s の非対称構成、および上り下り共に 2.5 Gbit/s の対称構成が標準化されている。また、最大伝送距離や最大分岐数は、ONU および OLT に使用する光トランシーバの性能に依存し、一般的な 32 分岐構成における最大伝送距離は 20 km に制限される。なお、表に記載されている G-PON の最大伝送距離 60 km、および収容 ONU 数 64 台は、物理的な制限ではなく、論理的な制限によるものである。

従来、インターネットの使用が主な目的であった FTTH サービスも、VOD (Video on demand)による映像配信や音楽配信などに代表されるブロードバンドサービスコンテンツの充実に対応するため、更なる高速化が求められるようになった。これらの期待に応えるべく、GE-PON システムおよび G-PON システムの後継として、10 Gbit/s 以上の伝送容量を有する次世代 PON システムの標準化が推進されてきた。表 1-2 に、次世代 PON システムの標準化規格を示す [33, 35, 36]。次世代 PON システムとして、IEEE では主に 10 Gbit/s 級の伝送容量を有する 10G-EPON システム、ITU-T では 10 Gbit/s 級の伝送容量を有する XG-PON システム、および 40 Gbit/s 級の伝送容量を有する NG-PON2 (Next generation PON stage 2)の標準化が進められてきた。10G-EPON システムの標準化においては、上り下りが共に 10 Gbit/s である対称構成、および上り 1.25 Gbit/s、下り 10 Gbit/s である非対称構成の標準化が 2009 年に完了した [33]。また、

2013 年には、複数ベンダ装置間の相互接続性向上を目指した、SIEPON (Service interoperability of EPON)の標準規格がまとめられた。一方、ITU-T では NG-PON 1 として、上り 2.5 Gbit/s、下り 10 Gbit/s の非対称構成の伝送速度を有する XG-PON システムの標準化が 2010 年に完了した [35]。また、これに引き続き 40 Gbit/s 級 PON システムとして NG-PON2 の標準化が 2010 年から開始され、高速 TDM-PON システム、WDM-PON システム、TWDM-PON システム、直交周波数多重技術を適用した OFDM-PON (Orthogonal frequency division multiplexing-PON)システム、符号分割多重技術を適用した CDM-PON (Code division multiplexing-PON)システムなどの候補技術の中から、経済的な高速化実現の観点から TWDM-PON システムが採択され、主な物理仕様などは 2015 年に標準化が完了した [34]。NG-PON2 は、一波長あたり上り 2.5 Gbit/s、下り 10 Gbit/s の非対称構成、および上り下り共に 10 bit/s の対称構成に対して、上り下り信号にそれぞれ 4 波長を割り当てた 40 Gbit/s 級の伝送容量を基本構成として標準化された [37-39]。

FTTH インフラ整備では、各家庭までの光回線の敷設に多額の設備投資や工事を必要とするため、サービスの追加やアップグレードに応じて、新たな光回線を各家庭まで敷設することが難しい。このため、FTTH インフラを支える PON システムの標準化においては、伝送速度の異なる各世代のシステムが一本の光ファイバ上で共存できるように、波長配置を工夫している。図 1-6 に、標準化で規格化された PON システムの波長配置を示す。GE-PON システムと 10G-EPON システムの上り信号波長が重なっているが、これは 10G-EPON システムの OLT で 1G/10G 信号を一括受信するデュアルレート TDM 受信技術を採用しているため、このような波長配置となっている。このほかの波長配置においては、GE-PON システム、10G-EPON システム、および TWDM-PON システムの各上り下り波長は、他システムの波長帯と重ならないように波長多重されており、各世代間の混在収容が実現されている。

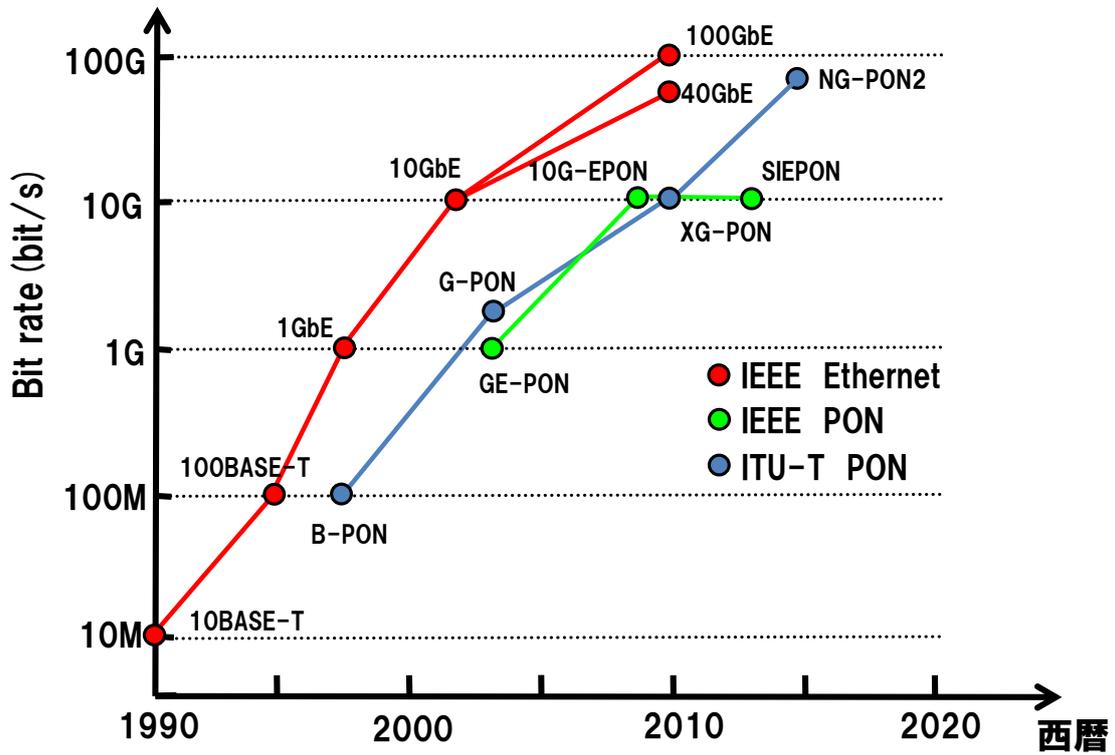


図 1-5 PON システムの標準化動向.

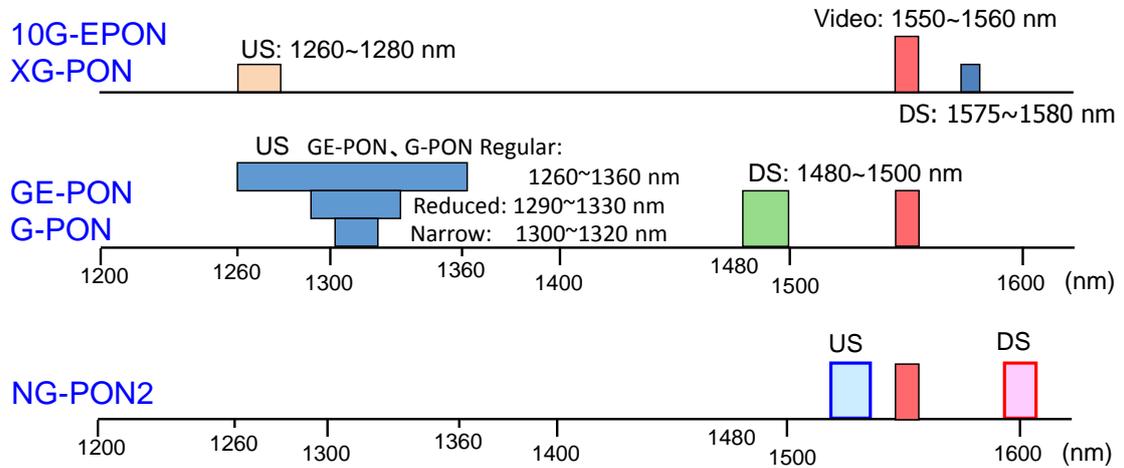


図 1-6 PON システムの波長配置.

表 1-1 GE-PON システムおよび G-PON システムの標準化規格.

システム名		GE-PON	G-PON
標準化規格		IEEE802.3ah	ITU-T G.984
標準化完了時期		2004 年 9 月	2004 年 9 月
伝送速度	上り	1.25 Gbit/s	2.5 Gbit/s
	下り	1.25 Gbit/s	1.25 / 2.5 Gbit/s
使用波長	上り	1260 – 1360 nm	1260 – 1360 nm 1290 – 1320 nm 1300 – 1320 nm
	下り	1480 – 1500 nm	1480 – 1500 nm
波長数	上り	1	1
	下り	1	1
伝送距離		10 / 20 km	60 km
光線路損失		5 – 20 dB (PX10) 10 – 24 dB (PX20)	5 – 20 dB (Class A) 10 – 25 dB (Class B) 13 – 25 dB (Class B+) 15 – 30 dB (Class C)
収容 ONU 数		16 / 32 台	64 台以上
フレーム		Ethernet	ATM, GEM, GTC

表 1-2 次世代 PON システムの標準化規格.

システム名		10E-PON	X-PON	NG-PON2 (TWDM-PON)
標準化規格		IEEE802.3av	ITU-T G.987	ITU-T G.989
標準化完了時期		2009 年 10 月	2010 年 6 月	2015 年
伝送 速度	上り	1.25 / 10.3125 Gbit/s	2.5 Gbit/s	2.5 / 10 Gbit/s
	下り	10.3125 Gbit/s	10 Gbit/s	10 Gbit/s
使用 波長	上り	1260 – 1280 nm	1260 – 1280 nm	1524 – 1544 nm
	下り	1575 – 1580 nm	1575 – 1580 nm	1596 – 1603 nm
波長 数	上り	1	1	4 – 8
	下り	1	1	4 – 8
伝送距離		10 / 20 km	60 km	40 km
光線路損失		5 – 20 dB (PR10) 10 – 24 dB (PR20) 15 – 29 dB (PR30)	29 dB (Nominal 1) 31 dB (Nominal 2)	29 dB (N1) 31 dB (N2) 33 dB (E1) 35 dB (E2)
収容 ONU 数		32 台以上	64 台以上	32 – 64 台以上
フレーム		Ethernet	XGTC, XGEM	議論中

1-2 本研究の目的、および意義

1-2-1 光アクセスシステムにおける長延化、および多分岐化の要求

PON システムのネットワーク構成は、光信号パワーを各 ONU へ分配する構成であるため、スプリッタの分岐数を大きくし収容 ONU 数を増やすことは、スプリッタの分岐損失の増大を意味する。このため、サービス提供エリア（伝送距離）、および収容 ONU 数（スプリッタの分岐数）のシステム構成比は、トレードオフの関係となる。現在、世界的に商用サービスで用いられている GE-PON システムにおいて、標準化で規定されている伝送距離および分岐数は、一般的にそれぞれ 20km、および 32 分岐となっている。一方、FTTH サービス利用者が増え、次第に PON システムによる光ブロードバンドサービスが、社会インフラとして成熟するにつれ、FTTH インフラが既に整備された都市部と、山間部など利益観点から都市部と比べ FTTH インフラ整備が遅れている地方部との間における、情報格差（デジタルデバイド）が社会問題として叫ばれるようになった。また、近年の地球温暖化や、東日本大震災に起因する電力供給問題などを踏まえ、通信設備が多くの電力を消費している通信事業者においても、使用電力の抑制が求められるようになってきた。これら、FTTH インフラにおいてデジタルデバイドの解消、および使用電力の抑制には、それぞれ広域化（サービスカバーエリアの拡大）および多分岐化（収容 ONU 数の拡大）による効率的なユーザ収容、および通信設備の集約が有効である。また、広域化を実現することで、カバーエリア内の収容ビルを統合することが可能となるため、保守運用コストも含めた PON システム全体の経済性を、飛躍的に高めることも期待できる。

光アクセスネットワークにおける広域・多分岐化技術の比較を図 1-7 に示す。これら各構成は、伝送路損失を補償するという共通課題を有する。①の PON システムを多段接続した方式では、中継局に OLT と ONU を設置し、スイッチ (SW: Switch) を介して接続することにより、広域化と多分岐化を実現する。構成としては簡易に見えるが、QoS (Quality of Service) の制御に PON 装置の改変を要する。②の SW を中継局まで張り出す方式は、SW 間のデータ伝送に長距離インターフェイスの光モジュールを用いて、収容局と中継局を結ぶ方式である。SW は装置コストが高く、消費電力も大きいため、ある程度のユーザ規模が見込める地域に適している方式である。③の O/E/O 中継器による方式は、CATV などの商用サービスに使用されている。しかし、PON システムへの適用を考えた場合、O/E/O 変換部で、3R 再生によるバースト信号間の同期を行う必要があるため、PON 装置を O/E/O 中継器と接続できるように改変する必要がある。④および⑤に示す光増幅中継器および局置光増幅器構成は、PON 装置の改変をすることなく、広域化と多分岐化を実現することができる。また、光領域で増幅を行うため、ビットレートやフレーム構成が異なるシステムが混在収容した状況においても、一括して広域・多分岐化することができる。また、ここには示していないが、OLT と ONU の送受信器の強化による、数 dB 程度のロスバジェット改善も検討されており、これらの方式

と組み合わせることにより、さらなる改善が期待できる。

以上を鑑み、本研究では PON 装置の変更が不要であること、また混在収容にも容易に対応可能であること、さらに低消費電力化が期待できることに着目し、光増幅器による PON システムの広域化、および多分岐化技術の検討を行うこととした。

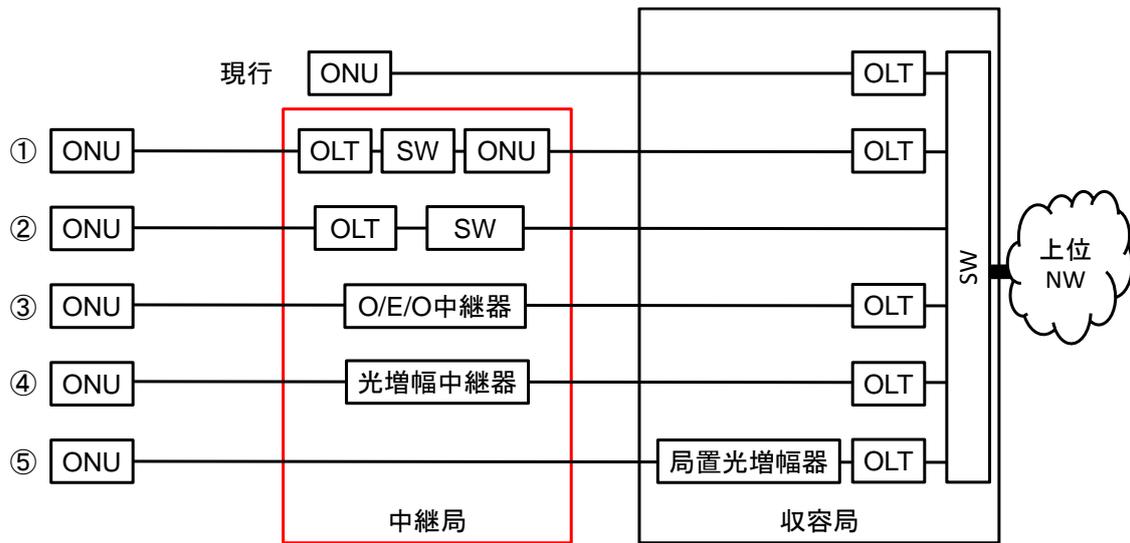


図 1-7 アクセスネットワークの広域・多分岐化技術.

1-2-2 光増幅 PON システムの研究開発動向

図 1-8 に光増幅器を用いた広域・多分岐化 PON システムの一般的な構成を示す。光増幅器を適用した広域・多分岐化 PON システムの研究開発の始まりは、1990 年代初頭に BT が提唱した Super PON 構想が始まりといわれる [40]。その後、2004 年に標準化が完了した GE-PON システム、および G-PON システムの世界的な普及を背景に、より経済性を高めるために伝送距離、および分岐数拡大への要求が高まり、光増幅器を適用した広域・多分岐化技術に関する研究が行われるようになった [41-43]。NTT では、2006 年頃から、中継光伝送システムなどで商用導入されている希土類添加ファイバ増幅器の動作信頼性に着目し、PON システムの上り信号にプラセオジウム (Pr) を添加した PDFA (Praseodymium DFA) を、下り信号にツリウム (Tm) を添加した T DFA (Thulium DFA) を用いた、光増幅 PON 中継器の研究開発を行ってきた [44]。一般的に希土類添加ファイバ増幅器は、バースト信号のフレーム長に相当する μs オーダの利得応答速度を有する。このため、PON システムにおいて上りバースト信号を増幅する際に、弱バースト信号から強バースト信号に光強度が瞬時に変化するポイントにおいて、図 1-9 に示す光サージを発生する。一方、連続信号である下り信号においては、これら光サージは発生しない。これまで、上り信号における、光サージを抑圧するために、利得クランプ (GC: Gain clamp) 技術や自動利得制御 (AGC: Auto gain control) 技術を PDFA に適用した光増幅 PON 中継器を提案し、GE-PON システムや 10G-EPON システムへ適用した広域・多分岐化システムを報告している [45]。

一方、BT や FT も同様に 2006 年頃から、半導体光増幅器 (SOA: Semiconductor optical amplifier) による PON システムの広域・多分岐化を検討してきた。BT は、地下設備に設置可能な光増幅 PON 中継器のプロトタイプを試作し、フィールドトライアルを行うなど、活発に研究開発を行っている [46]。また、FT は多段接続した SOA を用いた 10 Gbit/s 級 PON システムの分岐数を 1024 分岐まで拡大した報告も行っている [47]。これら、SOA を PON システムへ適用することの利点として、SOA の利得応答速度が数 100 ps オーダと、PON システムにおける上りバースト周期 (数 10 μs オーダ) と比較して非常に速いため、上り信号増幅において PDFA で問題となる光サージが発生しない点が挙げられる。しかし、SOA が有する、数 100 ps オーダの利得応答速度は、Gbit/s 級信号のビット周期と同程度であるため、強い光信号を増幅する A 飽和領域での光増幅動作において、1 ビットごとにパターン効果と呼ばれる光サージによる波形歪みを生じる。SOA におけるパターン効果の様子を図 1-9 (b) に示す。SOA におけるパターン効果は、バースト信号や連続信号に関係なく起こる。このため SOA においては、PDFA の場合と異なり、上り下りの両信号において、パターン効果の影響を考慮しなければならない。しかし、近年では線形増幅領域が広く、パターン効果が発生しにくい SOA が入手可能なこともあり、BT などの報告では、パターン効果の抑圧技術について特段の対処はなされていない。また、NTT は 2009 年頃から 10G-EPON システ

ムへの SOA 適用に向けた検討を開始し、パターン効果を抑圧し、かつシステムダイナミックレンジを拡大するために自動レベル制御 (ALC: Automatic level control) 技術を適用した SOA を提案し、システム検証結果を報告している [48]。更に近年では、ALC-SOA 技術を発展させ TWDM-PON システムへ適用した広域・多分岐化システムを報告している [49]。また上記以外にも、ファイバラマン増幅器の増幅帯域可変性に着目し、PON システムに適用した検討も、僅かながら大学を中心にされている [50]。

現在では、図 1-8 に示すような、光増幅器を屋外などの光ファイバ伝送路中に設置し、抜本的なロスバジェット拡大を狙った中継光増幅方式、および保守運用性の課題を克服するために OLT の収容ビルに光増幅器を設置する局置光増幅方式の 2 通りが検討されている。中継光増幅方式は、伝送距離および分岐数を劇的に拡大できる一方、伝送路中に光増幅器を設置する必要があるため、給電、耐環境性能、監視機能などといった保守運用上の課題を抱えている。一方、局置方式では、中継方式で課題となる保守・運用上の課題が解決できる一方で、上り信号の増幅に注目すると、前置増幅構成となるため中継方式と比較してロスバジェット改善効果が低い。よって、保守・運用上の課題解決、およびロスバジェット改善効果のどちらを選ぶかによって、最適な光増幅器設置構成が異なることになる。また、局置方式においては、ロスバジェット拡大効果の改善に向けて、前置光増幅器への最小入力パワー (最小受信感度) の改善、および最大入力パワー (ダイナミックレンジ) の拡大が課題となっている。

各光増幅器の特性を表 1-3 に示す。PON システムにおいては、上り信号と下り信号の波長帯が異なるため、各々に対応した増幅帯域を有する光増幅器を用いなければならない。希土類添加ファイバ増幅器は、増幅帯域が添加元素に依存するため、波長によっては適用できないシステムも存在する。例えば、上り信号波長帯を考えると、PDFA により GE-PON システムの波長である 1310 nm 帯は増幅できるが、10G-EPON システムの波長である 1270 nm 帯は増幅できない。一方、SOA は半導体の結晶組成により、ファイバラマン増幅器は励起波長により、自由に増幅帯域を選ぶことが可能である。また、アクセス装置への導入を考えた場合、光増幅器自体のサイズや消費電力も問題となる。ファイバラマン増幅器は増幅媒体である光ファイバにある程度の長さが必要である点、および励起光源に高出力特性が必要な点などから、小型化および低消費電力化が難しい。一方、SOA は小型かつ半導体デバイスとの集積化が容易であり、さらに低消費電力動作が可能である。

以上を鑑み、光増幅波長帯設計自由度の高さ、小型化、低消費電力動作が可能な点などの観点から、本研究では光増幅媒体として SOA を選定し、PON システムへの適用に向けた検討を行う。

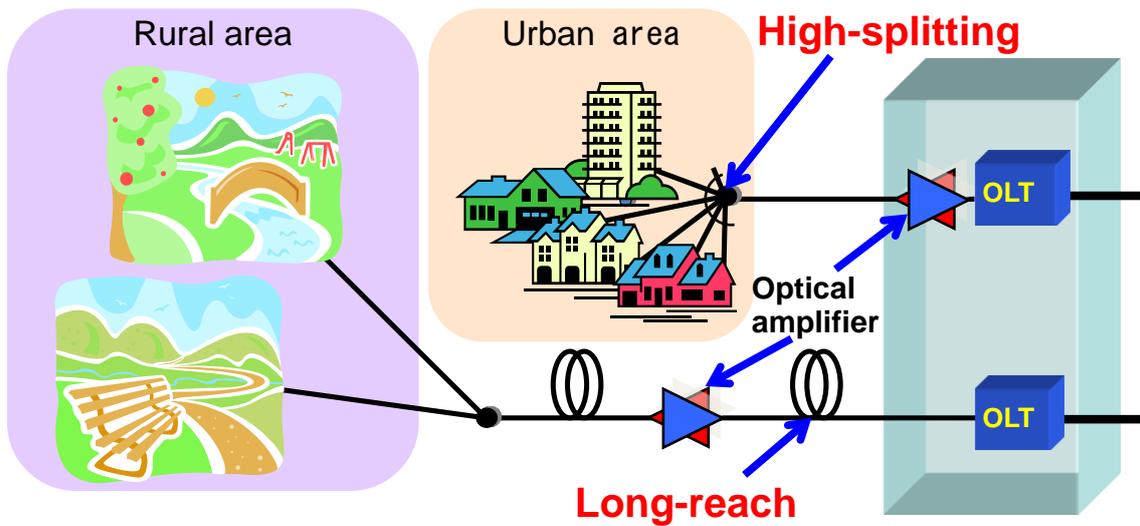


図 1-8 光増幅器を適用した広域・多分岐化 PON システム構成.

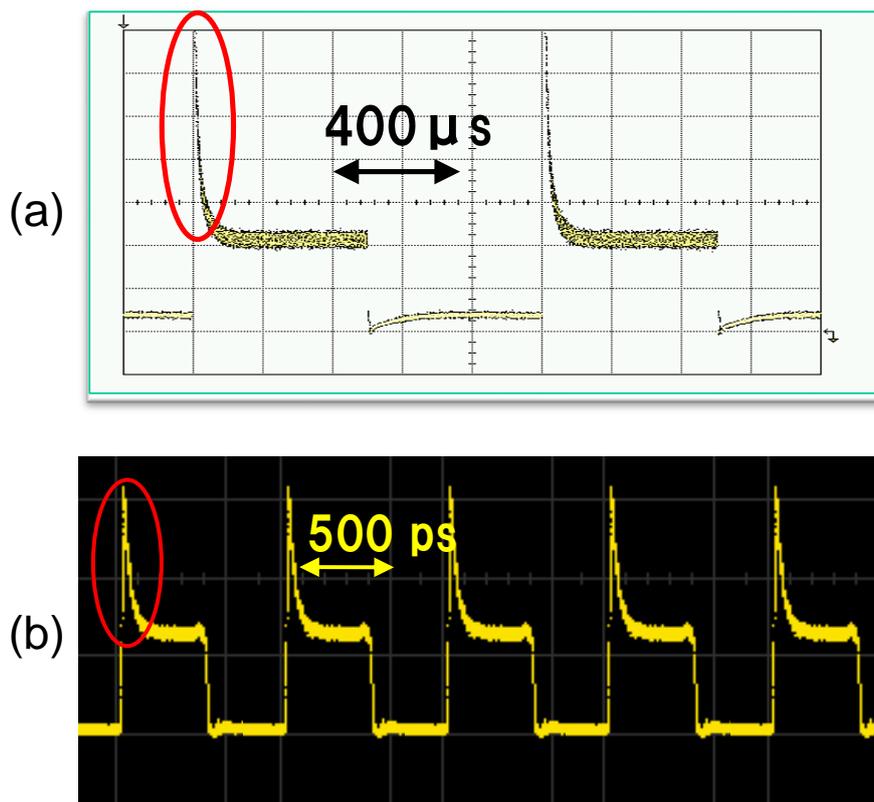


図 1-9 飽和効果による波形劣化. (a)ファイバンプ(PDFA)の場合. (b)SOA の場合.

表 1-3 光増幅器の PON システム適用における特性比較.

	希土類添加 ファイバ増幅器	半導体 光増幅器	ファイバ ラマン増幅器
増幅帯域自由度	×	○	○
サージ(上り信号)	○(AGC適用時)	△	○
サージ(下り信号)	○	△	○
高利得化	○	△	△
小型化	△	○	×
主な適用先	長距離基幹伝送	高速イーサ	長距離基幹伝送

1-2-3 PON システムへの SOA 適用に向けた課題

SOA を PON システムに適用する場合の課題について述べる。課題は、サービスを提供する通信事業者から見たアクセスネットワークに対する要求課題、および導入する光増幅 PON 中継器を開発する際の技術課題に分けて論じることができる。

要求課題は以下の通りである。

① 運用コスト削減

次世代 PON システムでは高速・大容量化に対応した一方、システムコストが上昇する。このため、システムコスト上昇分を、広域・多分岐化によるシステム収容効率を高めることで、吸収する必要がある。特に、都市部における抜本的な分岐数拡大は、システムコスト上昇分の吸収に加え、装置数の削減による設備のスリム化に大きく寄与する。

② 光サービス未提供エリアの解消

通信インフラには日本全国津々浦々にサービスを提供する、ユニバーサルサービスが求められ、生活基盤を支えるライフラインとし、FTTH サービスが重要な役割を担っていることを考慮して、PON システムの広域化によるデジタルデバイド解消に向けた検討がされている。光増幅器を適用した、広域・多分岐化 PON システムの検討は、実験室環境または、限られた条件の敷設光ファイバを用いた実験に限られており、より、実用化に向けた検討を進める必要がある。

③ 局置対応

光増幅 PON システムの運用において、光増幅器の設置場所を考慮する必要がある。これまでに、耐環境性能に優れ、電柱などの屋外に設置可能な、屋外設置型光増幅 PON 中継器が開発されている [51]。しかし、屋外に設置する構成では、電源供給をどのように解決するかが課題となる。また、雷などの影響による故障などを考慮し、屋外にアクティブ装置を設置するのは、好ましくない。このため、通信事業者の観点から、光増幅器の局置対応が求められる。

④ 低遅延サービスへの対応

TDM-PON システムでは、各 ONU から送信された上り信号は、OLT からの指示によって送信時間と送信帯域が制御される。このため、ONU は、OLT からの指示を受けるまでバッファによって送信データを待機する必要があり、上り信号に遅延を生じる。近年脚光を浴びている M2M、IoT (Internet of things)、さらにはモバイル基地局収容に向けたモバイルフロントホール対応などにおいて、システムの低遅延性が要求されており、これらに対応した DBA 技術などが提案されている [52]。

技術課題は以下の通りである。

① SOA の高入力ダイナミックレンジ化

前節で述べたとおり、PON システムの上り信号は短時間に強度が変化する、バースト信号である。このため、PON システムの上り信号増幅に光増幅器を適用した場合、SOA に限らず強バースト信号増幅時の利得飽和による、システムダイナミックレンジの劣化を招く。これら、システムダイナミックレンジ劣化を防止するため、SOA の光増幅出力信号強度を一定パワーに制御する、自動レベル制御機能の検討が必要である

② SOA のパターン効果抑圧

SOA に強いパワーの光信号を入力した場合、SOA のキャリアの緩和時間に依存するパターン効果と呼ばれる波形歪みが発生する。これら、パターン効果は受信器におけるペナルティを招き、PON システムにおいてはシステムロスバジェットを制限する恐れがある。特に、光増幅 PON システムの下り信号増幅においては、OLT-SOA 間に光増幅器のみが接続される構成となり、強いパワーの下り信号が SOA に入力される。これら、パターン効果による波形劣化抑圧技術の検討が必要である。

③ ブースタ SOA のバースト制御による ONU 送信器高性能化

PON システムの広域・多分岐化においては、ONU の出力パワーがシステムロスバジェットに大きな影響を与えるため、ONU 送信器の高出力化が求められている。特に、近年さらなる経済化を狙って検討されている、128 分岐を超える多分岐化 PON システムにおいては、高出力化に加えて、クロストークペナルティを緩和するために、低バーストオフレベル特性を兼ね備えた ONU 送信器が必要である。

1-2-4 本研究の目的、および意義

本研究では、前節で明らかにした SOA を適用した光増幅 PON システムの技術課題について、検討を行う。中継器構成、または局置構成対応技術として、上り信号増幅用 SOA への自動レベル制御技術の適用検討、および下り信号増幅用 SOA へのパターン効果抑圧技術の適用検討を行う。自動レベル制御技術の検討は、光増幅 GE-PON システム、および光増幅 10G-EPON システムへの適用を検討する。また、パターン効果抑圧技術については、光増幅 GE-PON システム、ブースタ SOA を備えた 10-Gbit/s 級 TDM-PON 用 ONU、および TWDM-PON 用 ONU への適用検討を行う。加えて、次世代 PON システムである TWDM-PON システムの多分岐化対応技術として、ONU 送信器に実装されたブースタ SOA のバースト制御技術の検討を行う。本研究で取り組んだ主な技術検討内容を以下に示す

- ① 自動レベル制御技術：相互利得変調による波長変換を用いた自動レベル制御
- ② パターン効果抑圧技術：同期ゲインクランプ光を用いたパターン効果抑圧
- ③ ブースタ SOA バースト制御技術：印加電圧制御によるバーストオフレベル改善

以上の取り組みは、前節で述べた PON システムへの SOA 適用に向けた技術課題解決へ向けたアプローチである。各技術に対する要求条件などについては、2 章で明らかにし、3 章以降で各要素技術に対する詳細検証について述べていく。

1-3 本論文の構成

本論文は全 7 章から構成される。本論文の構成を図 1-10 に示す。第 1 章では、本研究の背景および狙いを明らかにし、本研究の意義および目的を示す。第 2 章では、SOA を適用した PON システムの動作領域、および多分岐化 TWDM-PON システムにおける波長可変バースト光送信器に要求されるバーストオフレベル特性を数値計算により明らかにし、本論文で検討する技術課題について示す。第 3 章では、第 2 章で明らかにした、SOA を適用した光増幅 PON システムの上り動作領域の制限要因緩和を目的とし、相互利得変調による波長変換を活用した波長変換型 ALC 技術について提案し、評価結果について示す。第 4 章では、第 2 章で明らかにした、SOA を適用した光増幅 PON システムの下り動作領域の制限要因緩和、および ONU 用バースト光送信器高出力化に向けたブースタ SOA のパターン効果抑圧を目的とし、同期 GC (SGC: Synchronized GC) 光を活用した SOA のパターン効果抑圧技術について提案し、評価結果を示す。第 5 章では、第 2 章で明らかにした、多分岐化 TWDM-PON システムにおける ONU 用波長可変バースト光送信器のバーストオフレベル低減、および簡易なパターン効果抑圧を目的とし、それぞれブースタ SOA のバースト制御技術、およびブースタ SOA の利得ピーク離調技術について提案し、評価結果を示す。第 6 章では、本論文での検討結果を踏まえ、SOA を用いた光アクセスシステム広域・多分岐化技術の今後の展望について述べる。最後に、第 7 章で本論文の結論を述べる。

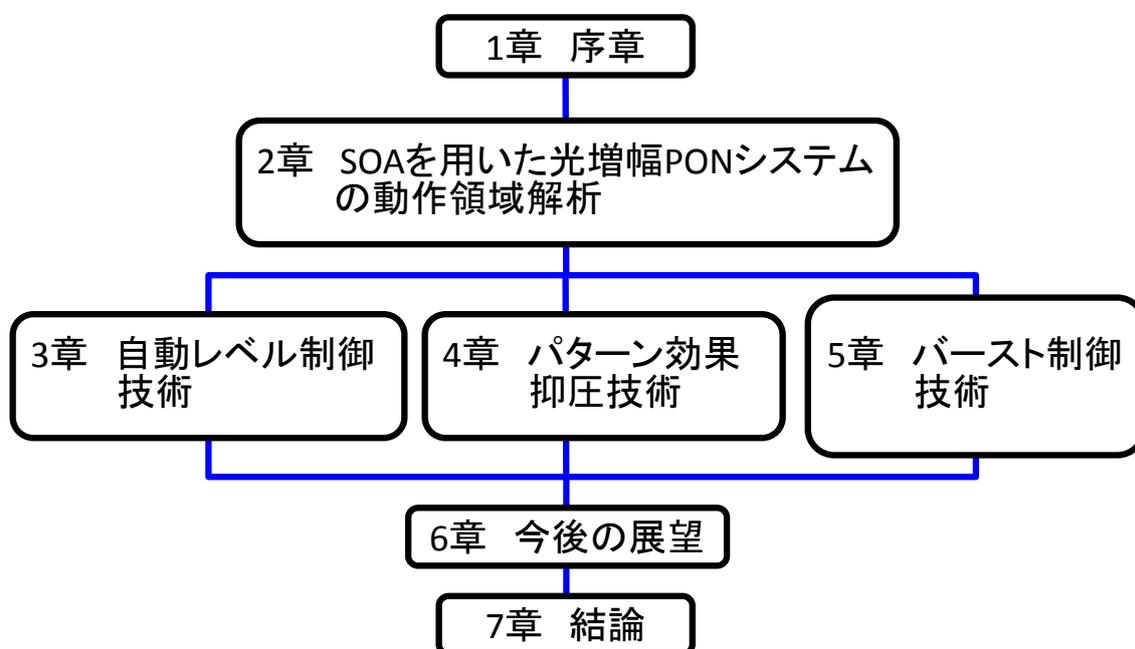


図 1-10 本論文の構成.

参考文献

- [1] K. C. Kao, and G. A. Hockham, "Dielectric-fiber surface waveguides for optical frequencies," *IET Electrical Engineers*, vol. 113, no. 7, pp. 1151-1158, 1966.
- [2] I. Hayashi, M. B. Panish, P. W. Foy, and S. Sumski, "Junction lasers which operate continuously at room temperature," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 17, pp. 109, 1970.
- [3] S. D. Personick, "Receiver design for digital fiber optic communication systems I," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 52, no. 52, pp. 843-875, 1973.
- [4] F. P. Kapron, D. B. Keck, and R. D. Maurer, "Radiation losses in glass optical waveguides," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 17, pp. 423, 1970.
- [5] T. Miya, Y. Terunuma, T. Hosaka, and T. Miyoshita, "Ultimate low-loss single-mode fiber at 1.55 μm ," *IET Electron. Lett.*, vol. 15, no. 4, pp. 106-109, 1979.
- [6] R. J. Mears, L. Reekie, I. M. Jauncey, and D. N. Payne, "Low-noise erbium-doped fiber amplifier operating at 1.54 μm ," *IET Electron. Lett.*, vol. 23, no. 19, pp. 1026-1028, 1987.
- [7] E. Desurvire, J. R. Simpson, and P. C. Becker, "High-gain erbium-doped traveling-wave fiber amplifier," *OSA Opt. Lett.*, vol. 12, no. 11, pp. 888-890, 1987.
- [8] M. Nakazawa, Y. Kimura, and K. Suzuki, "Efficient Er^{3+} -doped optical fiber amplifier pumped by a 1.48 μm InGaAsP laser diode," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 54, pp. 295, 1989.
- [9] K. Hagimoto, K. Iwatsuki, A. Takada, M. Nakazawa, M. Saruwatari, K. Aida, and K. Nakagawa, "250 km nonrepeated transmission experiment at 1.8 Gb/s using LD pumped Er^{3+} -doped fiber amplifiers in IM/direct detection system," *IET Electron. Lett.*, vol. 25, no. 10, pp. 662-664, 1989.
- [10] H. Takahashi, S. Suzuki, and I. Nishi, "Wavelength multiplexer based on SiO_2 - Ta_2O_5 arrayed-waveguide grating," *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 12, no. 6, pp. 989-995, 1994.
- [11] R. Noe, "Phase noise tolerant synchronous QPSK receiver concept with digital I&Q baseband processing," in *Proc. OECC'2004*, 16C2-5, 2004.
- [12] M. Taylor, "Coherent detection method using DSP for demodulation of signal and subsequent equalization of propagation impairments," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, no. 2, pp. 674-676, 2004.
- [13] S. Tsukamoto, D.-S. Ly-Gagnon, K. Katoh, and K. Kikuchi, "Coherent demodulation of 40-Gbit/s polarization-multiplexed QPSK signals with 16-GHz spacing after 200-km transmission," in *Proc. OFC'2005*, PDP29, 2005.
- [14] 鈴木扇太, 宮本裕, 富澤将人, 坂野寿和, 村田浩一, 美野真司, 柴山充文, 渋谷真,

- 福知清, 尾中寛, 星田剛司, 小牧浩輔, 水落隆司, 久保和夫, 宮田好邦, 神尾享秀, “光通信ネットワークの大容量化に向けたデジタルコヒーレント信号処理技術の研究開発” 電子情報通信学会誌, vol. 95, no. 12, pp. 1100-1116, 2012.
- [15] A. Sano, T. Kobayashi, S. Yamada, A. Matsuura, H. Kawakami, Y. Miyamoto, K. Ishihara, and H. Masuda, “102.3-Tb/s (224 x 548-Gb/s) C- and extended L-band all-raman transmission over 240 km using PDM-64QAM single carrier FDM with digital pilot tone,” in *Proc. OFC’2012*, PDP5C.3, 2012.
- [16] B. J. Puttnam, R. S. Luis, W. Klaus, J. Sakaguchi, J.-M. Delgado Mendinueta, Y. Awaji, N. Wada, Y. Tamura, T. Hayashi, M. Hirano, and J. Marciante, “2.15 Pb/s transmission using a 22 core homogeneous single-mode multi-core fiber and wideband optical comb,” in *Proc. ECOC’2015*, PDP3.1, 2015.
- [17] D. Soma, K. Igarashi, Y. Wakayama, K. Takeshima, Y. Kawaguchi, N. Yoshikane, T. Tsuritani, I. Morita, and M. Suzuki, “2.05 Peta-bit/s super-nyquist-WDM SDM transmission using 9.8-km 6-mode 19-core fiber in full C-band,” in *Proc. ECOC’2015*, PDP3.2, 2015.
- [18] H. Shinohara, “Broadband access in Japan: Rapidly growing FTTH market,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 43, no. 9, pp. 72-78, 2005.
- [19] 総務省通信統計データベース「ブロードバンド契約者数等の推移」,
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/field/data/gt010103.xls>
- [20] J. Stern, J. Balance, D. Faulkner, S. Hornung, D. Payne, and k. Oakley, “Passive optical local networks for telephony applications and beyond,” *IET Electron. Lett.*, vol. 23, no. 4, pp. 1255-1257, 19897
- [21] T. Tatsuta, N. Oota, N. Miki, and K. Kumozaki, “Design philosophy and performance of a GE-PON system for mass deployment,” *IEEE/OSA J. Opt. Netw.*, vol. 6, no. 6, pp. 689-700, 2007.
- [22] H. Nakamura, S. Kimura, K. Hara, N. Yoshimoto, M. Tsubokawa, M. Nakamura, K. Nishimura, A. Okada, and Y. Ohtomo, “AC-coupled burst-mode transmitter using baseline-wander common-mode-rejection technique for 10-Gbit/s-class PON systems,” *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 27, no. 3, pp. 336-342, 2009.
- [23] S. Nishihara, S. Kimura, T. Yoshida, M. Nakamura, J. Terada, K. Nishimura, K. Kishine, K. Kato, Y. Ohtomo, N. Yoshimoto, T. Imai, and M. Tsubokawa “A burst-mode 3R receiver for 10-Gbit/s PON systems with high sensitivity, wide dynamic range, and fast response,” *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 26, no. 1 pp. 99-107, 2008.
- [24] K. Hara, S. Kimura, H. Nakamura, N. Yoshimoto, and H. Hadama, “New AC-coupled burst-mode optical receiver using transient-phenomena cancellation

- techniques for 10 Gbit/s-class high-speed TDM-PON systems,” *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 18, no. 19, pp. 2775-2782, 2010.
- [25] N. Cheng, J. Gao, C. Xu, B. Gao, X. Wu, D. Liu, L. Wang, X. Zhou, H. Lin, and F. Effenberger, “World’s first demonstration of pluggable optical transceiver modules for flexible TWDM-PONs,” in *Proc. ECOC’2013*, PD4.F.4, 2013.
- [26] K. Asaka, “Consideration of tunable components for next-generation passive optical network stage 2,” *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 33, no. 5, pp. 1072-1076, 2015.
- [27] R. Murano, “Optical component technology options for NGPON2 systems,” in *Proc. OFC’2014*, M3L.1, 2014.
- [28] S. Kaneko, T. Yoshida, S. Furusawa, M. Sarashina, H. Tamai, A. Suzuki, T. Mukojima, S. Kimura, and N. Yoshimoto, “Demonstration of load-balancing operation based on hitless dynamic wavelength allocation on symmetric 40-Gbit/s λ -tunable WDM/TDM-PON,” *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 33, no. 3, pp. 645-652, 2015.
- [29] S. Kaneko, T. Yoshida, S. Kimura, K.-I. Suzuki, and A. Otaka, “ λ -tuning protection scheme achieving under 50-ms protection time based on MPCP and backup-wavelength pre-assignment on WDM/TDM-PONs,” in *Proc. OFC’2015*, Tu2E.6, 2015.
- [30] K. Asaka, K. Taguchi, Y. Sakaue, K.-I. Suzuki, S. Kimura, and A. Otaka, “High output power OLT/ONU transceivers for 40 Gbit/s symmetric-rate NG-PON2 systems,” in *Proc. ECOC’2015*, Mo.4.4.1, 2015.
- [31] H. Nakamura, K. Taguchi, S. Tamaki, T. Mizuno, Y. Hashizume, T. Yamada, M. Ito, H. Takahashi, S. Kimura, and N. Yoshimoto, “40Gbit/s-class- λ -tunable WDM/TDM-PON using λ -selectable B-Tx and 4 x M cyclic AWG router for flexible photonic aggregation networks,” *OSA Opt. Express*, vol. 21, no.1, pp-463-468, 2013.
- [32] IEEE 802.3ah.
- [33] IEEE 802.3av.
- [34] ITU-T recommendation G.984 series.
- [35] ITU-T recommendation G.987 series.
- [36] ITU-T recommendation G.989 series.
- [37] D. Nessel, “NG-PON2 technology and standards,” *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 33, no. 5, pp. 1136-1143, 2015.
- [38] J. S. Wey, D. Nessel, M. Valvo, K. Grobe, H. Roberts, Y. Luo, and J. Smith,

- “Physical layer aspects of NG-PON2 standards -part 1: optical link desing,” *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 8, no. 1, pp. 33-42, 2016.
- [39] Y. Luo, H. Roberts, K. Grobe, M. Valvo, D. Nettet, K. Asaka, H. Rohde, J. Smith, J. S. Wey, and F. Effenberger, “Physical layer aspects of NG-PON2 standards - part 2: system design and technology feasibility,” *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 8, no. 1, pp. 43-52, 2016.
- [40] I. Voorde, C. Martin, J. Vandewege, and X. Qiu, “The super PON demonstrator: an exploration of possible evolution paths for optical access networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 38, no. 2, pp. 74-82, 2000.
- [41] N. Suzuki, and J. Nakagawa, “First demonstration of full burst optical amplified GE-PON uplink with extended system budget of up to 128 split and 58 km reach,” in *Proc. ECOC’2005*, Tu1.3.3, 2005.
- [42] Z. Belfqih, F. Saliou, P. Chanclou, T. Soret, and N. Genay, “Bidirectional amplifier for standard PON architecture in burst mode configuration with class B+ attenuation range,” in *Proc. OFC/NFOEC’2007*, OWS1, 2007.
- [43] S. Appathurai, D. Nettet, and R. Davey, “Measurement of tolerance to non-uniform burst power in SOA amplified G-PON,” in *Proc. OFC/NFOEC’2007*, OWS2, 2007.
- [44] K. -I. Suzuki, Y. Fukada, D. Nettet, and R. Davey, “Amplified gigabit PON systems,” *IEEE/OSA J. Opt. Netw.*, vol. 6, no. 5, pp. 422-433, 2007.
- [45] K.-I. Suzuki, M. Fujiwara, K. Taguchi, T. Imai, H. Ishii, and N. Yoshimoto, “128 x 8 split and 80 km long-reach dual rate 10G-EPON transmission using ALC hybrid burst-mode optical fiber amplifier and SOA pre-amplifier,” in *Proc. ECOC’2011*, Mo.1.C3, 2011.
- [46] R. Davey, D. Grossman, M. Wiech, D. Payne, D. Nettet, A. Kelly, A. Rafel, S. Appathurai, and S. Yang, “Long-reach passive optical networks,” *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 27, no. 3, pp. 273-291, 2009.
- [47] D. P. Shea, and J. E. Mitchell, “A 10-Gb/s 1024-way-split 100-km long-reach optical-access network,” *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 25, no. 3, pp. 685-693, 2007.
- [48] M. Fujiwara, T. Imai, K. Taguchi, K.-I. Suzuki, H. Ishii, and N. Yoshimoto, “Field trial of 100-km reach symmetric-rate 10G-EPON system using automatic level controlled burst-mode SOAs,” *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 31, no. 4, pp. 634-640, 2013.
- [49] M. Fujiwara, R. Koma, and K. Taguchi, “High-splitting-ratio WDM/TDM-PONs using automatic gain controlled SOAs designed for central office use,” in *Proc.*

OFC'2015, Tu3E.4, 2015.

- [50] N. Kashima, "Feasibility study of hybrid-raman amplifier for passive optical networks," *IEICE Commun. Express*, Vol. 2, No. 3, pp. 118-122, 2013.
- [51] 今井健之, 藤原正満, 田口勝久, 鈴木謙一, "屋外設置型 PON 光増幅器" 電子情報通信学会技術研究報告, 通信方式, CS2011-14, pp. 23-27, 2011.
- [52] D. Murayama, N. Oota, K. -I. Suzuki, and N. Yoshimoto, "Low-latency dynamic bandwidth allocation for 100-km long-reach E-PONs," *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 5, no. 1, pp. 48-55, 2013.

第2章 PON システムへの SOA 適用に向けた技術課題

2-1 SOA を適用した光増幅 PON システム

IEEE にて標準化されている GE-PON システム、および ITU-T で標準化されている G-PON システムは、高いシステム経済性を実現し、多くの国で採用され、導入が進められている [1-3]。これら、PON システムの伝送距離（サービス提供エリア）および分岐数（収容 ONU 数）は、ONU および OLT に搭載される光トランシーバの送信パワー、および受信感度から導出される、システムロスバジェットによって決定する。伝送距離および分岐数はトレードオフの関係となるため、一般的な GE-PON システム、および G-PON システムの 32 分岐構成における伝送距離は 20 km と標準化で定められている。従って、地方部における収容エリアの拡大や、都市部における分岐数の拡大への要求に応え、抜本的なロスバジェット拡大を実現する広域・多分岐化技術として、PON システムへの光増幅器適用が盛んに検討され、特にデバイスの経済性や小型化などの観点から SOA への期待が高まっている [4]。これらを背景に、近年では GE-PON システム、10G-EPON システム、および TWDM-PON システムなどへ SOA を適用し、伝送距離および分岐数を、それぞれ 100 km および 1024 分岐以上に拡大した報告も多くされている [5-7]。

一方、PON システムにおいて OLT は、広いエリアに分布する ONU を効率的に収容する必要がある。このため、OLT および ONU に搭載される光トランシーバには、広い受信ダイナミックレンジ特性が要求される。一般的な 10G-EPON システムに搭載される光トランシーバは、Overload 受信パワーを -6 dBm、最小受信感度を -28 dBm に規定される標準化仕様を満足することで、近距離から遠距離まで広範囲に分布した ONU 収容を可能とする。第 1 章で述べたように、PON システムに SOA を適用することにより、システムロスバジェットを劇的に拡大することが可能である。一方、光トランシーバの Overload 受信特性に着目すると、SOA が放出する自然放出光 (ASE: Amplified spontaneous emission) 雑音光が光信号に重畳されることにより、Overload 受信特性が劣化し、PON システムのシステムダイナミックレンジが大きく制限される恐れがある。しかし、これまでの報告では伝送距離および分岐数の拡大に主眼が置かれ、これら光増幅 PON システムにおける、SOA の各種制限要因を考慮した動作領域についての詳細な解析は行われていない。加えて、PON システムへの光増幅器適用においては、上りバースト信号対応の技術難易度の高さから、波形歪み等を抑圧するバースト対応技術を中心に検討が行われてきたため、上りおよび下り信号に適用する SOA の動作領域を考慮した、システム動作領域の検討は十分なされていない。

また、設置場所や保守運用面などに課題を抱える光増幅器を用いずとも PON システムのロスバジェットを拡大する手法として、ONU、および OLT 用光トランシーバの高出力化も積極的に検討されている。このため、高出力化に向けた検討として、直接変調

型レーザ (DML: Directly-modulated laser)の駆動電流を増大する手法や、EA-DFB に代表される外部変調型レーザに集積される外部変調器の挿入損失を低減させる手法が検討されてきた。しかし、10 Gbit/s 級のより信号速度において、これら 10G-EPON システムや TWDM-PON システムで標準化されている ONU の最大出力パワー+9 dBm を実現するには、DML においては波長分散の影響による伝送距離の制限、および EA-DFB においては EA 自体の挿入損失の影響による出力パワーの低下の観点から、困難である [8-10]。そこで、レーザなどの半導体デバイスとの集積が容易な SOA を、EA-DFB にブースタ増幅器として集積した、高出力光トランシーバが報告されている [11, 12]。これら、SOA を集積した光トランシーバにおいては、出力が SOA の飽和出力パワーで決定するため、容易に+9 dBm 程度の高出力化が実現できる。一方、PON システムの多分岐化に着目すると、一台の OLT に接続される ONU が増えるため、発光状態の 1 台の ONU に対して、消光状態の ONU が放出するバーストオフレベル光パワーがクロストーク雑音の要因となり、OLT 用バースト受信器でパワーペナルティを誘発する恐れがある。近年、進められてきた TWDM-PON システムの標準化において、これら多分岐化におけるバーストオフレベル特性仕様の検討が行われたため、課題として認識される状況にはなったものの、本課題に対する技術検討は不十分な状況にある。

以上より、本章では光増幅中継 PON システムにおける SOA 動作領域の詳細解析、および ONU 光トランシーバ高出力化に向けたブースタ SOA 適用におけるバーストオフレベル要求条件を明らかにし、各検討結果から解決すべき課題を明らかにする。

2-2 SOA を適用した光増幅 PON システムの動作領域解析

2-2-1 動作領域の制限要因

SOA を適用した光増幅 PON システムにおける、動作領域の制限要因について説明する。なお、本論文で述べる「動作領域」とは、光増幅 PON システムの ONU 収容可能領域のことを意味する。SOA を用いた、光増幅 GE-PON システムの一般的な構成を図 2-1 に示す。一般的に、GE-PON システムは上り信号、および下り信号波長に、それぞれ 1260~1360 nm、1480~1500 nm を使用する。よって、1 台の SOA による上りおよび下り信号の一心双方向一括増幅は困難であるため、光増幅 PON 中継器は、上りおよび下り信号をそれぞれ個別増幅する SOA、それぞれの信号を合分波する WDM フィルタ、および BPF によって構成される。BPF は SOA から放出される ASE 雑音を除去するため、SOA 後段に挿入される。一般的な GE-PON システムでは、上り信号に 1260~1360 nm の 100 nm に渡る波長帯を割り当てることで、安価な Fabry-perot レーザ光源を歩留まりよく ONU に搭載することを可能とし、莫大な数量が導入される ONU のコスト低減による、PON システムの経済化に大きく貢献している。一方、本論文で論じる広域・多分岐化を前提とした PON システムにおいて、Fabry-perot レーザを搭載した ONU を用いた場合、直接変調された光信号が光ファイバの波長分散の影響を受ける。このため、最大伝送距離が制限され、SOA を適用しても十分な伝送距離拡大効果が得られない。これら課題を解決するため、SOA を用いた広域・多分岐化 GE-PON システムにおいては、上り信号波長帯を 1300~1320 nm に制限した DFB レーザを実装した、波長安定化 ONU を用いる。図 2-1 における上り信号増幅用 SOA 後段に挿入される BPF は 20 nm の透過帯域幅を有する。

SOA を適用した光増幅 PON システムにおける動作領域は、光信号に対する Loss (損失) 限界、ONU または OLT の光受信器に対する Overload (過負荷) 限界、および SOA 入力に対する Surge (サージ) 限界によって決定する [13]。図 2-2 に、光増幅 PON システムの上り信号方向における、各制限要因の概念図を示す。Loss 限界は、OLT から一番遠い位置に収容される ONU を規定し、理想的には ONU バースト光送信器の最小送信パワー、OLT バースト光受信器の最小受信感度、および SOA の利得で決定される。一方、Overload 限界は、OLT から一番近い位置に収容される ONU を規定し、理想的には ONU バースト光送信器の最大送信パワー、OLT バースト光受信器の最大受光パワー、および SOA の利得で決定される。また、Surge 限界は、OLT から一番近い位置に収容される ONU を規定し、SOA のパターン効果が発生する閾値である飽和入力パワーと、ONU バースト光送信器の最大送信パワーによって決定する。これら、各制限要因は上り、および下り信号に対して、同様に影響を与える。3 つの制限要因は、以下のように導出される。

① Loss 限界

Loss 限界は理想的には、

$$GL_AL_BTx_{out} = Rx_{in(min)} \quad (2-1)$$

と記述され、光増幅 PON システムの動作領域を表す図において、右肩下がりの直線で示される。ここで、 Tx_{out} 、 $Rx_{in(min)}$ 、 G 、 L_A 、および L_B は、それぞれ送信器の出力パワー、受信器の最小受信感度、SOA の利得、アクセス区間の損失、およびトランク区間の損失である。ただし、実際の光増幅 PON システムにおいては、信号に対して SOA から放出される ASE 雑音を重ねられることによる、受信器の最小受信感度劣化を考慮する必要がある。ASE 雑音の影響を考慮した、信号対雑音比 (SNR: Signal to noise ratio) は、

$$SNR = \frac{[2qGL_B(X_m - X_s)]^2}{(\sqrt{\sigma_m} + \sqrt{\sigma_s})^2} \quad (2-2)$$

と導出される。数式(2-2)において、 q は電荷素量、 X_m および X_s は、それぞれ SOA に入力される光信号のマークレベル、およびスペースレベルにおけるフォトン数である。また、分母における平方根で記述される σ_m 、および σ_s は、それぞれ光信号のマークレベル、およびスペースレベルにおけるトータルの雑音電力を意味する。各雑音成分は

$$\sigma_m = N_{sig, shot} + N_{ASE, shot} + N_{sig-ASE, beat} + N_{ASE-ASE, beat} + N_{th} \quad (2-3)$$

$$\sigma_s = N_{ASE, shot} + N_{ASE-ASE, beat} + N_{th} \quad (2-4)$$

と記述される。数式(2-3)、および(2-4)において、 $N_{sig, shot}$ 、 $N_{ASE, shot}$ 、 $N_{sig-ASE, beat}$ 、 $N_{ASE-ASE, beat}$ 、および N_{th} は、それぞれ信号光のショット雑音、ASE 雑音のショット雑音、信号光と ASE 雑音間のビート雑音、ASE 雑音間のビート雑音、および受信器の熱雑音である。また、式(2-3)および(2-4)におけるマークおよびスペースレベルにおける各雑音量は、

$$N_{sig, shot} = 2q^2GL_BX_{m, s} \quad (2-5)$$

$$N_{ASE, shot} = 4q^2(G-1)L_Bn_{sp}\Delta f \quad (2-6)$$

$$N_{sig-ASE, beat} = 4q^2G(G-1)L_B^2n_{sp}X_{m, s} \quad (2-7)$$

$$N_{ASE-ASE, beat} = 4q^2(G-1)^2L_B^2n_{sp}^2\Delta f \quad (2-8)$$

$$N_{th} = \left(\frac{2kT}{R}\right)^2 Be \quad (2-9)$$

と記述される。式(2-5)から式(2-9)において、 n_{sp} 、 Δf 、 k 、 T 、 R 、および Be は、それぞれ SOA の反転分布パラメータ、SOA 後段に挿入する BPF の透過帯域幅、ボルツマン係数、絶対温度、受信器の抵抗、および信号のビットレートである。また、式(2-2)におけるマークレベル、およびスペースレベルにおけるフォトン数は、光信号の消光比 r および、プランク定数 h 、光信号の周波数 ν を用いて、

$$X_m = \frac{2rL_A T x_{out}}{(1+r)h\nu} \quad (2-10)$$

$$X_s = \frac{2L_A T x_{out}}{(1+r)h\nu} \quad (2-11)$$

と記述される。以上より、ASE 雑音を考慮した Loss 限界は、式(2-2)に式(2-3)から式(2-11)を代入し、所望のビットエラーレートに対応する SNR を、 L_A および L_B の値をパラメータとして導出する。ASE 雑音の影響は、SOA への光信号入力強度が低下する領域で大きくなり、理想的な直線からの乖離が大きくなる。

② Overload 限界

Overload 限界は理想的には

$$GL_A L_B T x_{out} = R x_{in(max)} \quad (2-12)$$

と記述され、光増幅 PON システムの動作領域を表す図において、Loss 限界と並行した右肩下がりの直線で示される。ここで、 $R x_{in(max)}$ は、受信器の最大受光パワーである。ただし、Overload 限界も Loss 限界と同様に SOA の放出する ASE 雑音の影響を受けるため、

$$GL_A L_B T x_{out} + G n_{sp} \Delta f L_B = R x_{in(max)} \quad (2-13)$$

と記述される。式(2-13)左辺における第二項が、ASE 雑音の影響を意味する。ASE 雑音強度は、SOA への光信号入力強度が低下する領域において相対的に大きくなるため、理想的な Overload 限界を示す直線との乖離が大きくなる。

③ Surge 限界

Surge 限界は SOA のパターン効果による波形歪み（光サージ）を抑圧するために規定される。パターン効果による波形歪みを抑えられる SOA の入力パワー閾値を P_{surge} とすると、Surge 限界は、

$$L_{AT_{xout}} = P_{surge} \quad (2-14)$$

と記述される。一般的に、 P_{surge} は SOA を線形増幅領域で使用するために、SOA の利得が線形光増幅領域から 1 dB 低下する、光信号入力パワーで定義される。

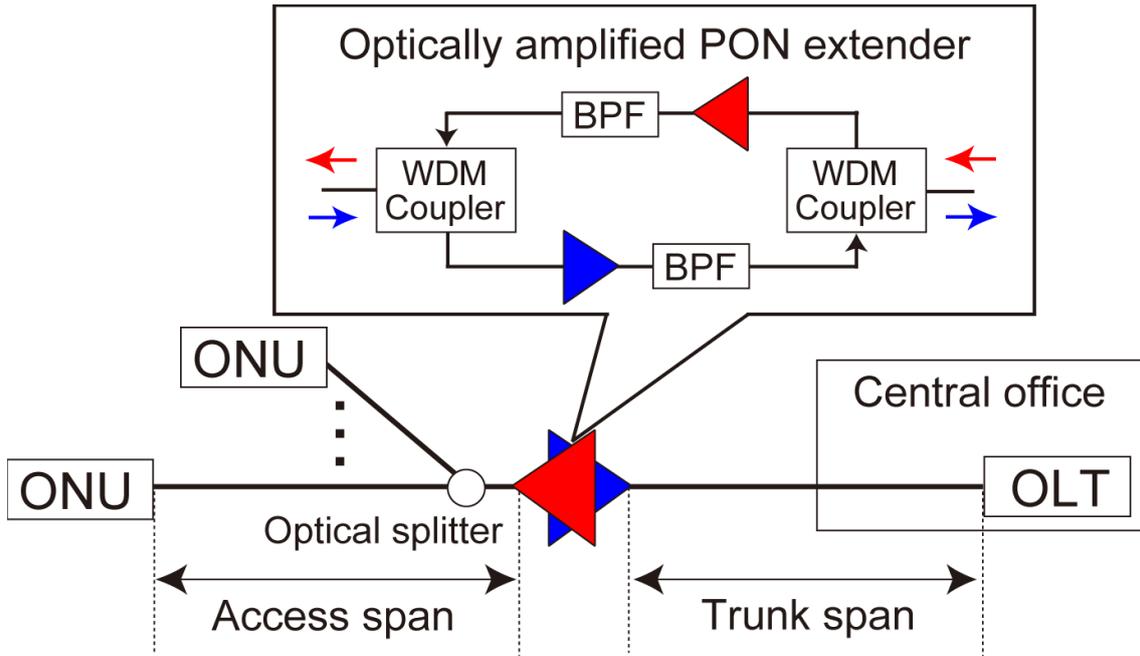


図 2-1 光増幅 PON システムの動作領域解析モデル。

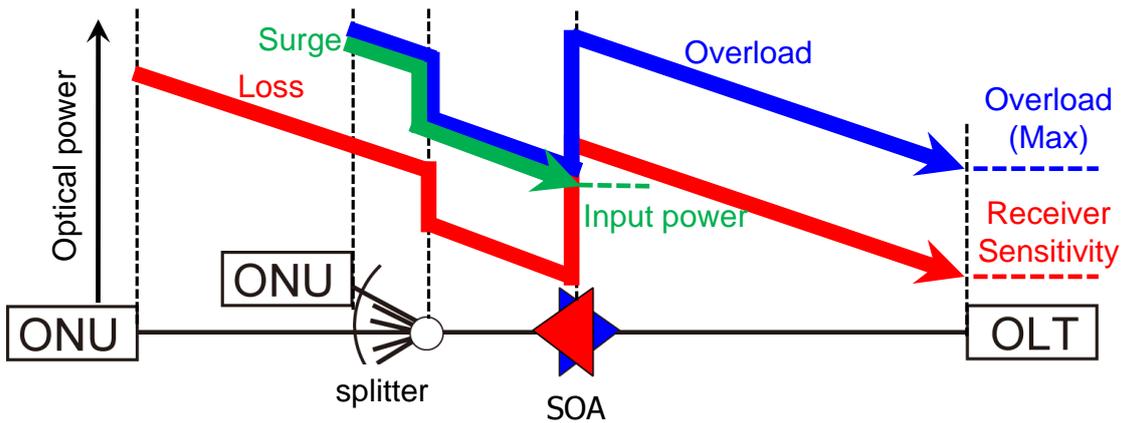


図 2-2 SOA 動作領域の制限要因。

2-2-2 SOA を適用した光増幅 PON システムの動作領域

一例として、10G-EPON システムの上り、および下り信号に、SOA を適用した光増幅 PON システムの動作領域解析結果を、図 2-3 に示す。上り信号、および下り信号における各制限要因を、それぞれ実線、および点線で表しており、上りおよび下り信号の各制限要因に囲まれた領域が、光増幅 PON システムの動作領域となる [13]。解析に用いた、SOA の各波長における増幅特性、10G-EPON システムの ONU および OLT の送受信特性、および光伝送路とスプリッタの分岐損失値を、それぞれ表 2-1、表 2-2、および表 2-3 にそれぞれ示す。表 2-1 に示す、各信号波長における SOA の増幅特性は、市販されている一般的な SOA の測定値を用いた。なお、下り信号増幅用 SOA においては、上りおよび下り信号波長の伝送損失の違いに起因する、上りおよび下り信号における動作領域の乖離を避けるため、双方の動作領域の重なりが最大となるように、SOA の駆動電流最適化による利得調整を行った。また、表 2-2 に示す、OLT および ONU の送受信特性は、IEEE 802.3ah にて標準化されている規格を使用した [8]。

まず、上り信号増幅における光増幅 PON システムの動作領域（実線）について説明する。Loss 限界と Overload 限界は、前節で導出した式を用いて導出され、図 2-3 に示される。ここで、各制限要因は SOA が放出する ASE 雑音の影響を受けるため、特に上り信号のアクセス区間（横軸）が長い領域において、理想的な直線から乖離する。また、Surge 限界は ONU バースト光送信器の最大出力パワー、および SOA の飽和入力パワー P_{surge} より導出し、表 2-3 に示す上り波長の光ファイバ伝送路損失を用いて距離に変換する。導出結果より、解析に用いたモデルでは、上り信号増幅用 SOA におけるパターン効果による波形歪みを抑圧するために、アクセス区間に 23.8 km 分の光ファイバ伝送路が必要になる。以上、実線で示される 3 つの制限要因によって囲まれた領域が、SOA を適用した光増幅 PON システムの上り方向の動作領域である。上り信号増幅における動作領域に着目すると、システムダイナミックレンジが Overload 限界と Surge 限界の影響により、トランク区間の値によって大きく変動する。また、例えば保守運用面を考慮して、OLT 近傍（トランク区間の短い領域）に SOA を設置する構成は、Overload 限界の制限を受けるため、困難であることが分かる。

次に、下り信号増幅における光増幅 PON システムの動作領域（破線）について説明する。下り信号の動作領域においても、上り信号に対する動作領域と同様に 3 つの制限要因で囲まれた領域が、動作領域と定義される。ただし、下り信号増幅においては、図 2-1 に示すネットワークモデルより、トランク区間には光ファイバのみが接続されるため、強い光強度の下り信号が SOA に入力される。このため、下り信号の適用領域においては、上り信号と比較して Surge 限界が大きな値を示す。OLT 光送信器の最大出力パワー、および下り信号増幅用 SOA の飽和入力パワー P_{surge} により導出される Surge 限界は、72 km となる。このため、下り信号増幅用 SOA の動作領域は、Surge 限界によって支配的に制限され、下り方向における動作領域は、Loss 限界、Overload 限界、

および Surge 限界に囲まれた非常に限られた領域に制限される。ここで、光増幅 PON システムの動作領域は、上りおよび下り信号に適用する SOA の動作領域に囲まれた領域を意味する。このため、図 2-3 においては、上りおよび下り信号増幅用 SOA の動作領域が重ならず、光増幅 PON システムに SOA が適用できないことがわかる。ここで、一例として下り信号増幅用 SOA の飽和入力パワー P_{surge} を -5.0 dBm まで改善した場合を考える。このような場合では、下り信号増幅における光サージ限界が 40 km まで緩和されるため、双方向を考慮した光増幅 PON システムの動作領域は図 2-3 中における、斜線で表された領域に拡大できる。

以上より、SOA を適用した光増幅 PON システムの動作領域は、主に Overload 限界および Surge 限界の影響を強く受け、SOA の設置場所が著しく制限される課題が存在する。

表 2-1 SOA の増幅特性.

	Upstream signal	Downstream signal
Wavelength [nm]	1270	1570
Gain [dB]	20.4	11.9 (Optimized)
NF [dB]	7.7	7.7
P_{surge} [dBm]	-18.0	-13.0
B_{opt} [nm]	20	20

表 2-2 解析に用いた 10G-EPON システムの OLT および ONU 特性.

		OLT	ONU
Tx	Average launch power (max) [dBm]	5	9
	Average launch power (min) [dBm]	2	4
	Extinction ratio (min) [dB]	6	6
Rx	Average receive power (max) [dBm]	-6	-10
	Receiver sensitivity (min) [dBm]	-28	-28.5

表 2-3 10G-EPON システムの上り下り信号における伝送路損失および分岐損失.

	Upstream signal	Downstream signal
Wavelength [nm]	1270	1570
Transmission loss [dB]	0.40	0.25
1:32 splitter loss [dB]	17.5	

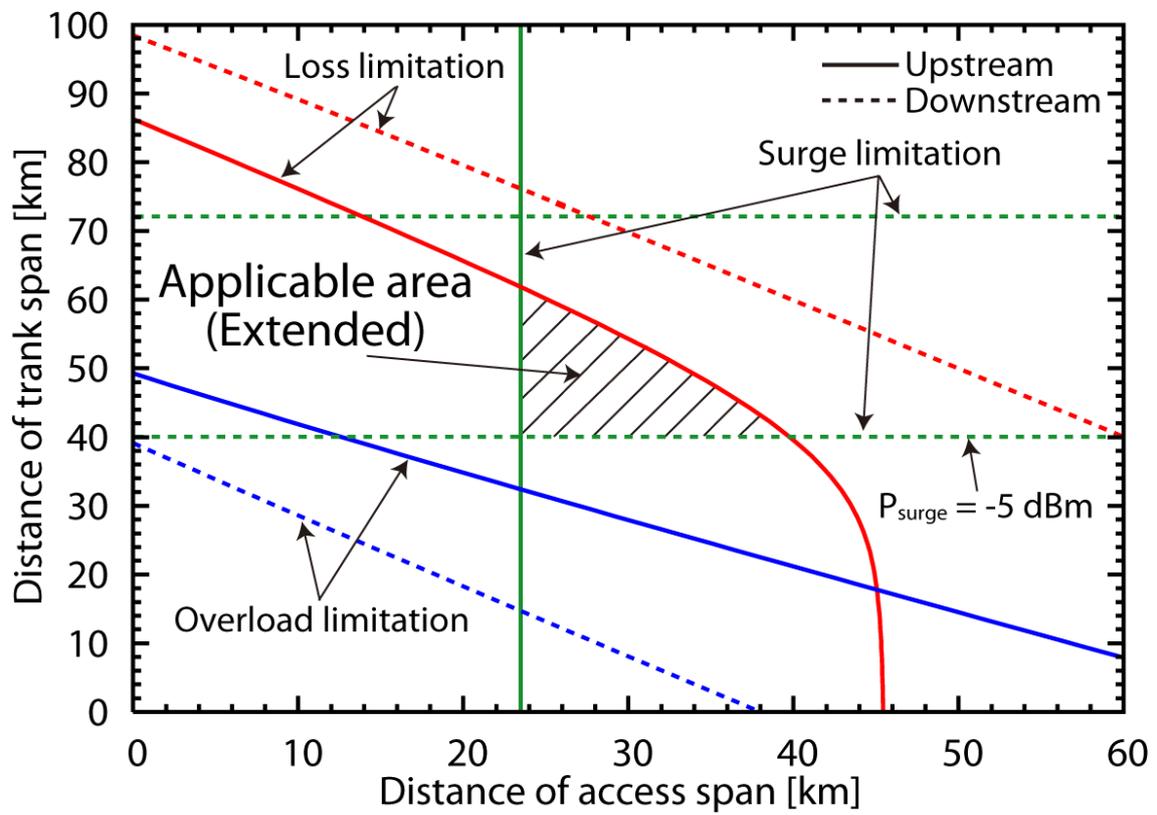


図 2-3 上り下りに SOA を適用した光増幅 PON システムの動作領域計算結果.

2-3 ONU バースト光送信器への要求性能解析

2-3-1 広域・多分岐化に向けた ONU バースト光送信器への要求

PON システムにおける広域・多分岐化への要求が高まるにつれて、OLT および ONU に搭載される光トランシーバの高出力化が検討されてきた。近年では、XG-PON 向け OLT 用光トランシーバとして、光源とブースタ SOA を一体集積した光トランシーバも登場している [12]。これら、光トランシーバへのブースタ SOA の適用においては、光出力信号に対してパターン効果による波形歪みが発生するため、抑圧手法を検討する必要がある。一方、TWDM-PON システムのような、従来の GE-PON システム、および 10G-EPON システムなどと比較して、抜本的な収容 ONU 数（分岐数）の拡大を狙う次世代 PON システムも検討されている。このような多分岐化を実現する PON システムにおいては、OLT に接続される ONU が数倍に増えることにより、発光状態の 1 台の ONU が送信するバースト光信号に対して、消光状態の ONU が放出するバーストオフレベル光パワーが、クロストーク成分としてバースト信号に重畳される。このため、これらクロストーク成分が OLT の最小受信感度に影響を与え、パワーペナルティが発生する恐れがある。図 2-4 に多分岐化 PON システムにおいて、ONU のバースト光送信器が放出するバーストオフレベルパワーに起因するクロストーク成分が、OLT のバースト光受信器に与える影響の概念図を示す。PON システムの抜本的な多分岐を実現するには、ONU 用バースト光送信器は、高出力化に加えて、バーストオフレベル特性の低減を実現しなければならない。

クロストーク成分が受信器の最小受信感度へ与える影響は、これまでに数多く検討されており、数値計算によって分岐数に対するバーストオフレベルの要求条件を見積もることができる [14]。OLT のバースト光受信器に平均値検出型受信器を用いた場合における、クロストーク成分に起因するパワーペナルティは、

$$Penalty(dB) = -5 \log \left[1 - 4\epsilon Q^2 \frac{1+r}{(1-r)^2} \right] \quad (2-15)$$

と記述される。式(2-15)において、 Q 、 r 、および ϵ は、それぞれ所望する Q 値、受信器で受信される光信号の劣化した消光比、およびクロストークパワー比である。ここで、クロストークパワー比は、平均クロストークパワーと平均光信号間の比で定義される。以上より、得られた ϵ を、

$$BOL = Tx_{min} - \epsilon - \Delta ODN - 10 \log(N - 1) - PR \quad (2-16)$$

に代入し、バーストオフレベル(BOL)に対するクロストークペナルティを導出する。式(2-16)において Tx_{min} 、 ΔODN 、 N 、 PR は、それぞれ ONU バースト光送信器の最小出

カパワー、ODN のダイナミックレンジ、分岐数、および偏波緩和パラメータである。

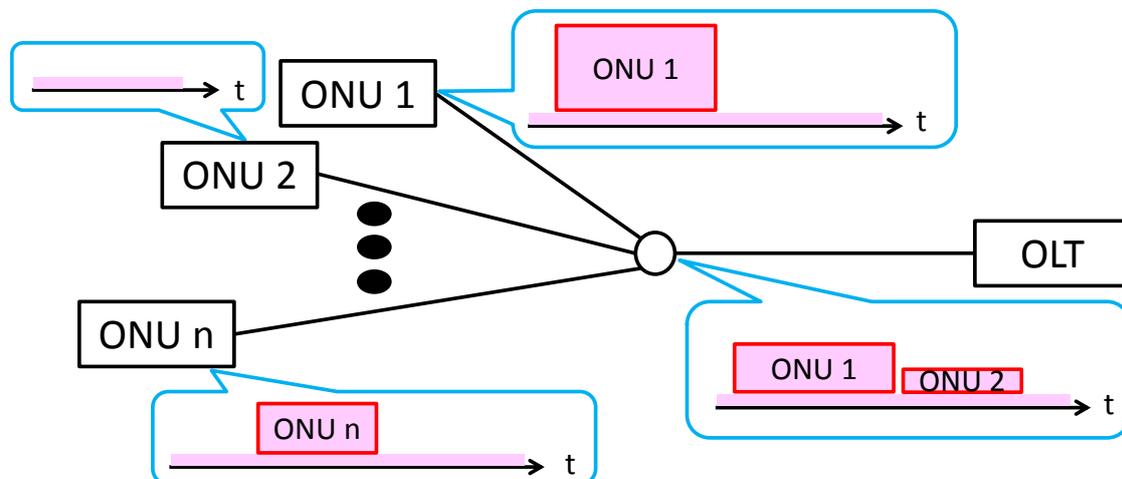


図 2-4 多分岐化 PON システムにおけるクロストークが OLT 受信器に与える影響。

2-3-2 多分岐化におけるバーストオフレベル特性の要求性能

TWDM-PON システムの多分岐化において、ONU に搭載する波長可変バースト光トランシーバに求められる、バーストオフレベル特性の要求条件を図 2-5 に示す。本計算に用いた各種パラメータを表 2-4 に示す。TWDM-PON システムの標準化規格である ITU-T G.989.2 においては、クロストーク成分によるパワーペナルティの許容値は、0.1 dB 以下と規定されている [10]。このため図 2-5 より、多分岐化構成において、0.1 dB 以下のパワーペナルティを満足するためには、波長可変バースト光トランシーバのバーストオフレベルを、128 分岐、および 256 分岐において、それぞれ -60.2 dBm、および -63.2 dBm 以下に低減しなければならない。これら、高出力かつ低バーストオフレベル特性を兼ね備えた ONU 用波長可変バースト光送信器の実現が、TWDM-PON システムの抜本的な多分岐化実現に向けた、大きな課題となる。

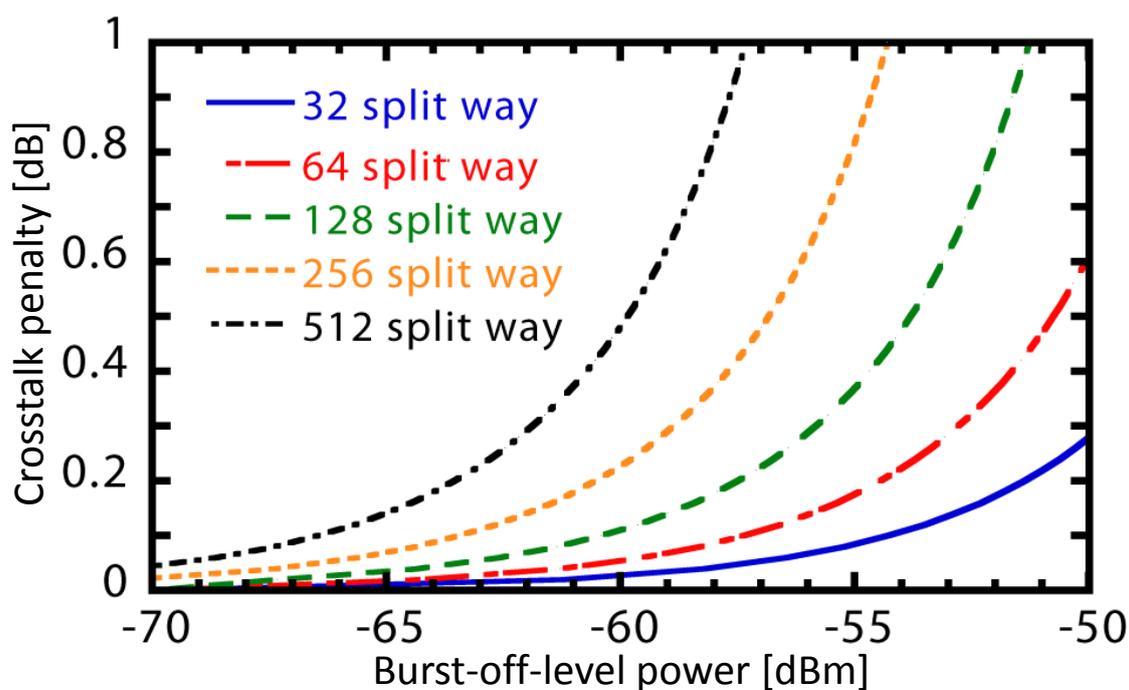


図 2-5 多分岐化 TWDM-PON における ONU 送信器のバーストオフレベル要求条件.

表 2-4 計算パラメータ.

	Value
Q	2.88
$Degraded\ r$ [dB]	4.11
Tx_{min} [dBm]	+9.0
PR [dB]	1.0

2-4 まとめ

本章では、SOA を用いた光アクセスシステムの広域・多分岐化において、解決すべき技術課題についてまとめた。まず、SOA を適用した光増幅 PON システムにおいては、数値解析により SOA 動作領域の制限要因を明らかにし、詳細な動作領域を明らかにした。その結果、上り信号増幅に適用する SOA においては、SOA が放出する ASE 雑音の影響、および強バースト光信号入力時におけるパターン効果による波形歪みの影響により、システムダイナミックレンジが大きく制限されることを明らかにした。また、これら制限要因により、ダイナミックレンジ特性がトランク区間に大きく依存することも明らかにした。さらに、下り信号増幅へ適用する SOA においては、ネットワーク構成上、下り信号増幅用 SOA に強い光強度の下り信号が入力されるため、パターン効果に起因する Surge 限界の制限が支配的であることを明らかにした。これら、制限要因は光増幅 PON システムにおける SOA の動作領域を著しく劣化させ、SOA の設置場所の自由度を制限する。

これら、SOA を適用した光増幅 PON システムにおける動作領域制限の克服を目的とし、本論文ではこれら制限要因の緩和技術について検討する。一例として、上り信号増幅における技術的な検討内容を図 2-6 に示す。上り信号増幅への SOA 適用においては、Overload 限界と Surge 限界による動作領域の制限を緩和するため、SOA による光波長変換を用いた ALC 機能の検討を行う。また、下り信号増幅への SOA 適用においては、Surge 限界により著しく動作領域が制限されることを考慮し、SGC 光を用いた、SOA のパターン効果抑圧技術について検討を行う。これら技術により、図 2-6 に示すように SOA の動作領域の拡大効果を検証する。

また、TWDM-PON システムの抜本的な多分岐化の実現に向けた、ブースタ SOA を用いた ONU 向け波長可変光バースト送信器の高性能化においては、数値解析により多分岐化構成において要求される、バーストオフレベル特性を明らかにした。多分岐化に求められる高出力化はもとより、これまで GE-PON システムや 10G-EPON システムで規格化されている標準化仕様よりも、20 dB 以上低いバーストオフレベル特性が求められるため、波長可変バースト光送信器は非常に厳しい要求に応えなければならない。TWDM-PON システムの多分岐化に向けた、ONU 用波長可変バースト光送信器の技術課題を図 2-7 に示す。これら、波長可変バースト光送信器の高性能化を目指し、高出力かつ、低バーストオフレベル特性を兼ね備えた波長可変バースト光送信器の検討を行う。具体的には、高出力化時において発生するパターン効果の緩和手法として、SOA 利得ピークの離調設計を検討する。また、消光時におけるバーストオフレベル低減に対しては、ブースタ SOA に対して駆動電流、および印加バイアス電圧方向のバースト制御による改善を検討する。以上、波長可変バースト光送信器の高性能化を目指し、TWDM-PON システム多分岐化に向けた分岐数拡大効果を検証する。

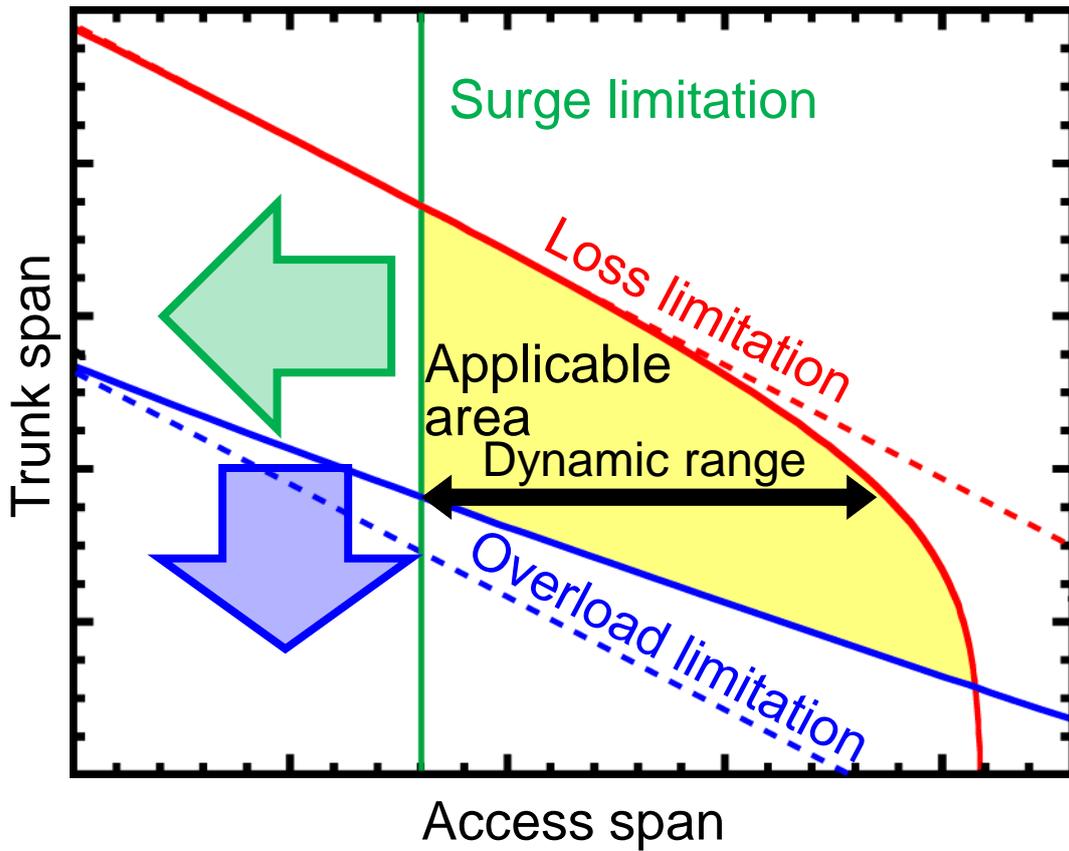


図 2-6 光増幅 PON システムへの SOA 適用における技術課題.

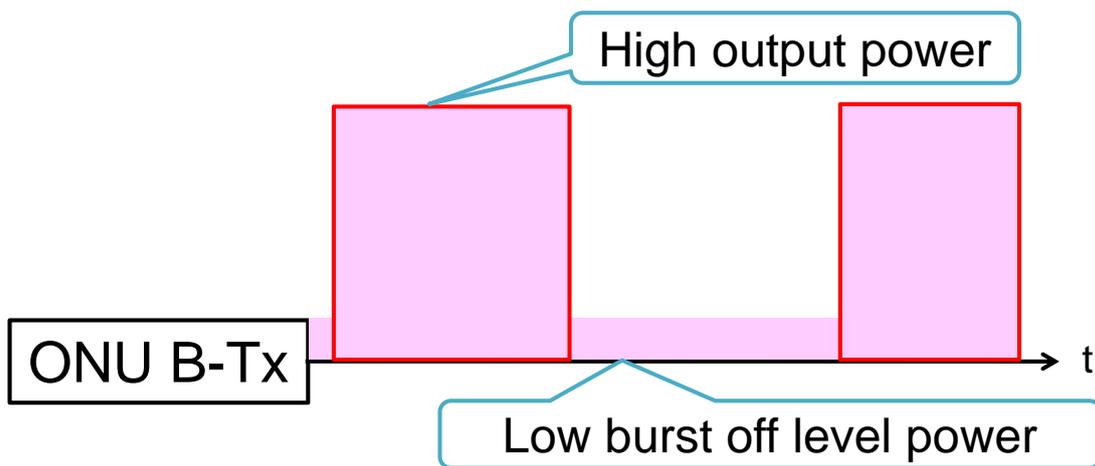


図 2-7 多分岐化 TWDM-PON における波長可変 ONU 送信器の技術課題.

参考文献

- [1] H. Shinohara, "Broadband access in Japan: Rapidly growing FTTH market," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 43, no. 9, pp. 72-78, 2005.
- [2] IEEE 802.3av.
- [3] ITU-T recommendation G.984 series.
- [4] R. Davey, D. Grossman, M. Wiech, D. Payne, D. Nasset, A. Kelly, A. Rafel, S. Appathurai, and S. Yang, "Long-reach passive optical networks," *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 27, no. 3, pp. 273-291, 2009.
- [5] D. P. Shea, and J. E. Mitchell, "A 10-Gb/s 1024-way-split 100-km long-reach optical-access network," *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 25, no. 3, pp. 685-693, 2007.
- [6] M. Fujiwara, T. Imai, K. Taguchi, K. -I. Suzuki, H. Ishii, and N. Yoshimoto, "Field trial of 100-km reach symmetric-rate 10G-EPON system using automatic level controlled burst-mode SOAs," *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 31, no. 4, pp. 634-640, 2013.
- [7] K. Taguchi, K. Asaka, M. Fujiwara, S. Kaneko, T. Yoshida, Y. Fujita, H. Iwamura, M. Kashima, S. Furusawa, M. Sarashina, H. Tamai, A. Suzuki, T. Mukojima, S. Kimura, K.-I. Suzuki, and A. Otaka, "Field trial of long-reach and high-splitting λ -tunable TWDM-PON," *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 34, no. 1, pp. 213-221, Jan. 2016.
- [8] IEEE 802.3ah.
- [9] ITU-T recommendation G.987 series.
- [10] ITU-T recommendation G.989 series.
- [11] R. Bonk, H. Schmuck, W. Poehlmann, and T. Pfeiffer, "Beneficial OLT transmitter and receiver concepts for NG-PON2 using semiconductor optical amplifier," *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 7, no. 3, pp. A467-A473, 2015.
- [12] K. Asaka, K. Taguchi, Y. Sakaue, K.-I. Suzuki, S. Kimura, and A. Otaka, "High output power OLT/ONU transceivers for 40 Gbit/s symmetric-rate NG-PON2 systems," in *Proc. ECOC'2015*, Mo.4.4.1, 2015.
- [13] K. Taguchi, M. Fujiwara, T. Imai, K.-I. Suzuki, H. Ishii, N. Yoshimoto, and H. Hadama, "Applicable area estimation of bidirectional optical amplifiers to 10-Gb/s class long-reach PON systems," in *Proc. COIN'2010*, MoA1-3, 2010.
- [14] F. Liu, C. J. Ramussen, and R. J. S. Pedersen, "Experimental verification of a new model describing the influence of incomplete signal extinction ratio on the

sensitivity degradation due to multiple interferometric” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 1, pp. 137-139, 1999.

第3章 光波長変換型 ALC による動作領域拡大技術

3-1 上り信号増幅用 SOA の動作領域拡大

第2章において、SOA を光増幅 PON システムに適用した場合における Loss 限界、Overload 限界、Surge 限界を考慮した、システム動作領域の解析を行い、上り信号増幅に用いる SOA の Overload 限界と Surge 限界によって、システム動作領域が大きく制限されることを明らかにした。また、Overload 限界の影響により、システムダイナミックレンジ性能がトランク区間の数値に大きく依存することも示した [1]。これら、動作領域の制限は、収容 ONU エリア、または光増幅 PON 中継器の設置場所の制約につながり、システムの構築や運用に影響を与える。これまでに、これら光増幅 PON システムの上り増幅用 SOA における、Overload 限界および Surge 限界の緩和を目的とし、上り信号のバースト信号ごとに光レベルを制御する ALC 技術が提案されている [2-4]。これら ALC 技術は、光増幅した上り信号に制御を施す方式、および上り信号を増幅する SOA に制御を施す方式の2方式に大別される。前者は、増幅した上りバースト信号のパワーレベルに対して、バーストフレーム周期である μ 秒オーダーで制御可能な高速可変減衰器 (VOA; Variable optical attenuator)を用いて、損失を制御することで、バースト信号パワーを一定制御する方式である。これまでに、音響光学素子 (AOM: Acousto-optic modulator)を用いたものが報告されている [2]。また、後者は、増幅する上りバースト信号に対して、SOA の利得をバーストフレームごとに制御して、増幅信号を一定レベルに制御する方式である [3, 4]。これら、両方式を適用した広域・多分岐化 PON システムの報告は多く、10-Gbit/s 級 PON システムへの適用報告もされている。従来の ALC 方式においては、上りバースト信号強度を常にモニタし、VOA の損失値や SOA の駆動電流にフィードフォワードまたはフィードバック制御をかける必要があり、制御する電子回路が複雑かつ不安定といった課題があった。本章では、これら従来の電子制御回路を応用した ALC 技術の課題を解決すべく、相互利得変調 (XGM: Cross gain modulation)を用いた SOA による波長変換を利用した、全光波長変換型の ALC 技術を提案する。

3-2 相互利得変調を用いた ALC 効果

本節では、XGM を用いた波長変換型 ALC 技術の原理について説明する。SOA の XGM を用いた ALC 効果と波長変換の原理を図 3-1 に示す [5-7]。なお、SOA の非線形性を適用した波長変換方法として、相互位相変調 (XPM: Cross phase modulation)、および四光波混合 (FWM: Four wave mixing)なども候補として挙げられるが、構成の簡易さ、および必要な入力信号パワーのダイナミックレンジを考慮し、本論文では XGM 方式について検討する。図 3-1 に示すように、SOA は強い光信号パワーの入力に対して、出力が飽和する特性を持つ。このため、強バースト信号は SOA の飽和領域に入力されるため、出力パワーは圧縮されることによる ALC 効果を受ける。一方、SOA において飽和領域に入力される強バースト信号は、ALC 効果とともにパターン効果による波形劣化を起こす。これら、パターン効果による波形劣化を緩和するため、提案構成では SOA で XGM による波長変換を行い、信号光を別波長のプローブ光に変換する。これにより、波長変換光はパターン効果による波形劣化が抑圧され、さらには、ALC 効果も反映される。一方、弱バースト信号は SOA の線形領域で増幅されるため、波形歪みなく増幅および波長変換され、増幅された強バースト信号パワーと同等の出力パワーとなる。以上、これら XGM を用いた波長変換による ALC 効果により、Overload および Surge 限界の緩和が期待できる。

また、本検討では、SOA を伝送路中に設置する中継方式に加えて、保守・運用上の課題を解決できる局置方式（上り信号増幅用 SOA に対しては前置増幅）についても、検討を行う。中継方式構成においては、光増幅信号の SNR が著しく劣化しないよう、光増幅器を配置する。このため、光増幅器後段に設置される波長変換型 ALC は、良好な光増幅信号に対して ALC 動作を行うことができる。一方、局置方式（前置増幅構成）においては、弱パワーの光信号が入力されることとなり、光増幅信号の SNR が劣化する。このため、局置方式においては SNR が劣化した光増幅信号に対する ALC 動作を担保する必要がある。また、入力ダイナミックレンジ拡大の観点から、前置光増幅用の波長変換型 ALC には、最小受信感度（最小入力パワー）、および最大受信感度（最大入力パワー）の拡大が求められる。

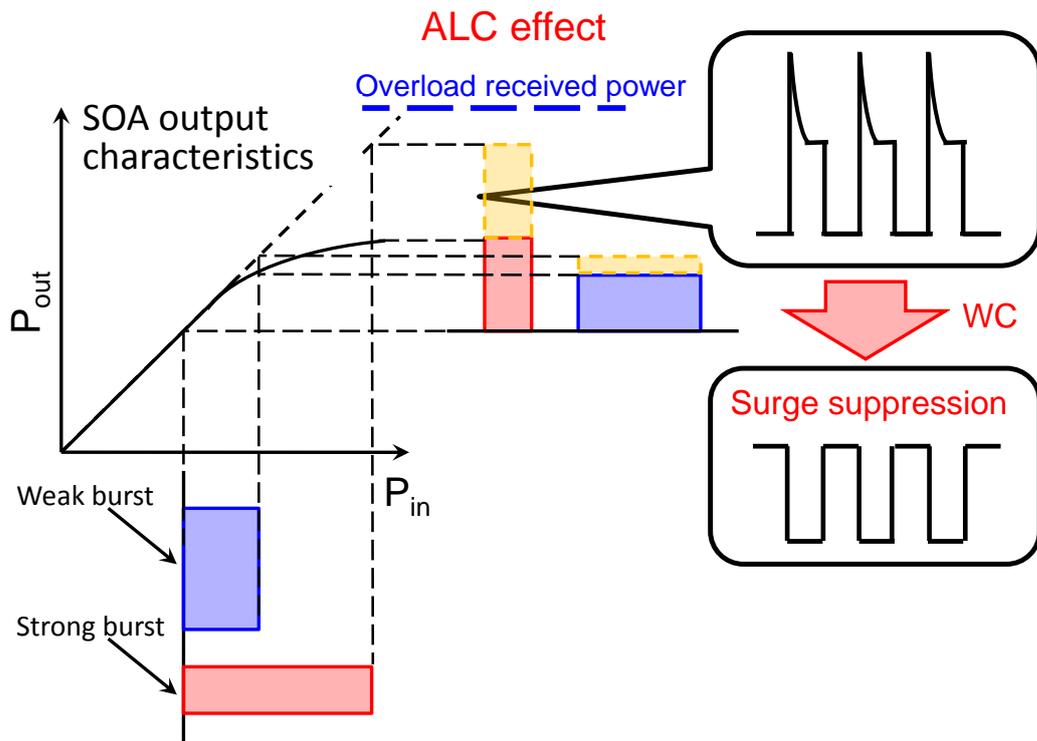


図 3-1 相互利得変調型全光波長変換を用いた自動レベル制御の原理.

3-3 中継光増幅 GE-PON システムにおける有効性検証

3-3-1 波長変換型 ALC の構成

提案する XGM を利用した波長変換型 ALC の構成、および中継光増幅 GE-PON システムの動作領域評価系を図 3-2 に示す。なお、GE-PON システムにおける上り信号波長帯は 1260 nm～1360 nm であるが、本評価では使用する SOA の増幅波長の都合により、1550 nm 帯の波長で評価を行う。実際の GE-PON システムの上り信号波長帯である 1300 nm 帯 (O 帯) に増幅特性を持つ SOA を適用することで、本評価結果と同様の効果を得ることができる。図 3-2 に示す、システム動作領域の評価系は、ONU、波長変換型 ALC 部を備えた中継光増幅器、および OLT から構成される。なお、本評価においては、ONU-波長変換型 ALC 間、および波長変換型 ALC-OLT 間を、それぞれアクセス区間、およびトランク区間と定義する。実際の GE-PON システムで導入されている ONU は、光源の歩留まりを緩和するために、1260 nm～1360 nm の波長ばらつきが許容された、無温調光源を採用している。一方、一般的に、光増幅 PON システムに用いる ONU は、光増幅器の増幅帯域や ASE 雑音の影響を低減するために、波長安定化 ONU と呼ばれる 1300～1320 nm 内で発振する無温調光源を搭載する [8, 9]。このため、検証系において ONU は、これら光源自体の個体差や温度による波長ばらつきを再現するために、波長可変光源 (TLD: Tunable distributed-feedback laser diode) および LN (LiNbO₃) 変調器から構成される。評価実験において、上り信号波長である TDL 出力波長は、1572～1596 nm とした。LN 変調器はビットレート、および擬似ランダムシーケンス (PRBS: Pseudo random bit sequence) が、それぞれ 1.25 Gbit/s、2³¹-1 段で光信号を変調する。ONU の出力パワー、および消光比は、それぞれ 0.0 dBm、および 10.2 dB である。光増幅部は、2 台直列に接続した L 帯対応 EDFA、C/L 帯合分波フィルタ、XGM による波長変換を行う SOA、および波長変換波長を決定するプローブ光を出力するレーザから構成される [10]。2 台直列に接続した EDFA の利得および雑音指数 (NF: Noise figure) は、それぞれ 28.5 dB、および 5.5 dB である。ONU から出力された上り信号は、これら EDFA で増幅され、C/L フィルタを介して SOA に入力される。一方、連続 (CW: Continuous wave) 光であるプローブ光は、増幅された上り信号に対して逆方向の向きで SOA に入射される。このとき、SOA 内部において CW 光であるプローブ光は、XGM 効果により上り信号に対して論理反転したビットパターンで変調される。波長変換 ALC に用いる SOA の、駆動電流および利得のピーク波長は、それぞれ 300 mA および 1584～1598 nm 付近である。また、プローブ光の SOA 入力パワーおよび波長は、各上り波長における SOA の ALC 効果が最大となるように調整し、それぞれ 4.2 dBm および 1565 nm とした。上り信号の波長帯、EDFA のスペクトル、およびプローブ光波長の関係を図 3-3 に示す。波長変換された上り信号は、C/L フィルタを介してトランク区間に出力される。OLT は 1.25 Gbit/s のビットレートにおいて -33.5 dBm の最小受信感度特性を有する APD で構成される。本評価では、アクセス

区間およびトランク区間に設置した、VOA1およびVOA2を用いて、それぞれの区間のロスバジェットを模擬し、ダイナミックレンジ特性の評価を行う。

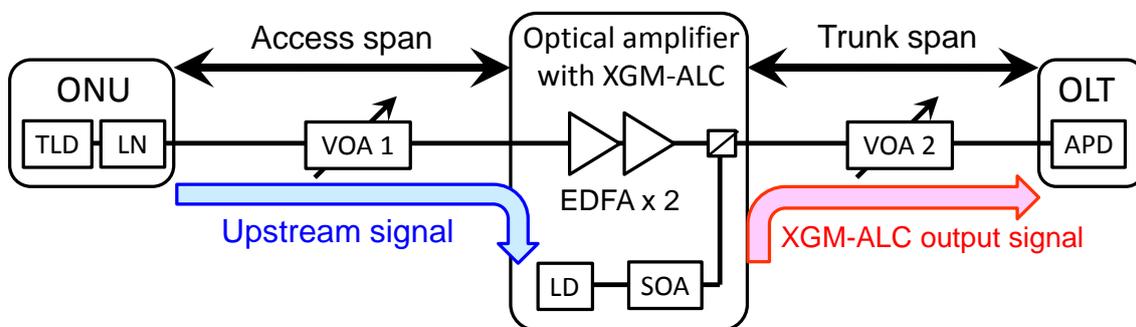


図 3-2 波長変換型 ALC の構成.

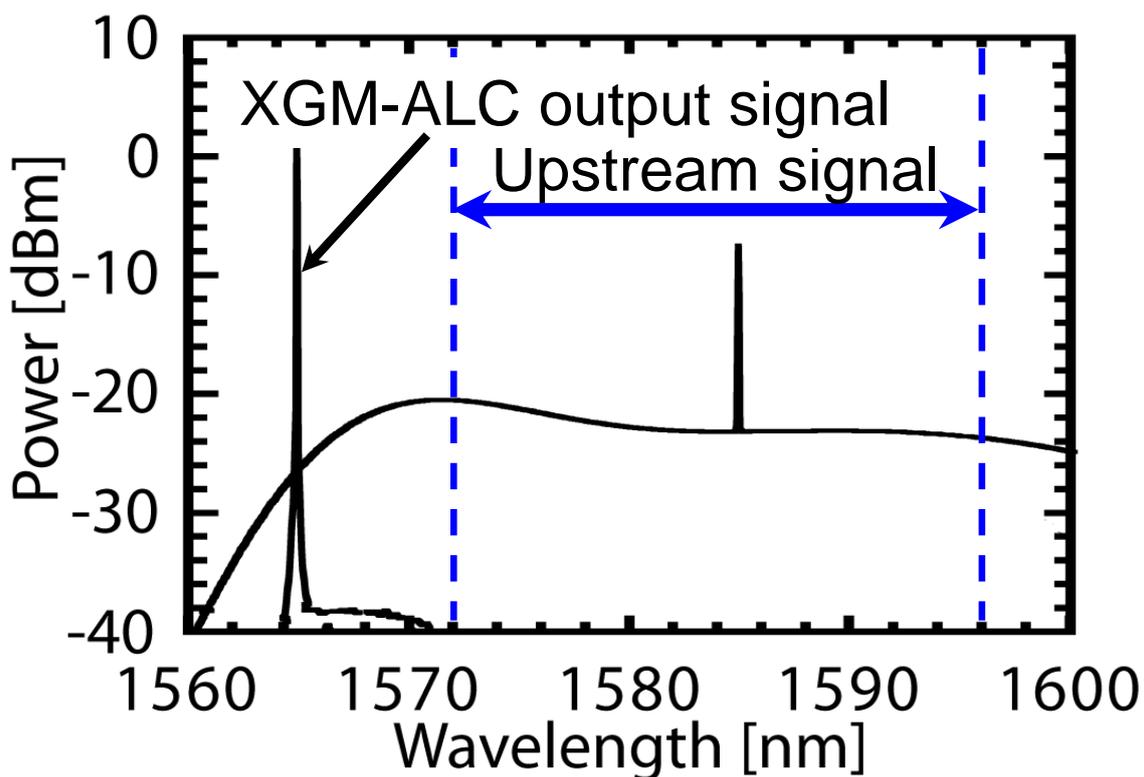


図 3-3 上り信号と波長変換光（波長変換型 ALC 出力）波長の関係.

3-3-2 波長変換型 ALC の出力特性

波長変換型 ALC を適用した光増幅 PON システムにおいて、拡大されるロスバジェットは、波長変換型 ALC 出力特性に大きく依存する。はじめに、波長変換型 ALC 入力波長に対する、波長変換 (プローブ光) 波長依存性を明らかにする。実験系で使用する、信号波長の長波長帯に位置する 1595.0 nm の入力信号に対して、プローブ光波長を変化させたときに、受信器で発生する B-B 受信感度に対するパワーペナルティを評価した。波長変換光のプローブ波長依存性を図 3-4 に示す。プローブ波長が 1560 nm から 1565 nm の領域において、パワーペナルティを 0.1 dB 以下に抑圧できる。同じく、信号波長の短波長側に位置する 1575 nm の入力信号に対しても、同様の傾向が得られた。このため、本検討においては波長変換 (プローブ光) 波長を、パワーペナルティが最小となる 1565 nm に設定した。波長変換型 ALC に 20 nm の波長ばらつきを模擬した上り信号波長を入力し、固定波長に波長変換した際のプローブ光出力および消光比を図 3-5 (a) に示す。ここで、EDFA への入力パワーを P_m と定義する。本評価において、EDFA への弱バースト、および強バースト信号パワーは、それぞれ -25.0 dBm および -8.0 dBm とした。弱バースト信号の場合では、波長変換型 ALC の出力パワー、および消光比は一定に制御されており、両特性の波長依存性は 2 dB 以内に抑圧されている。また、強バースト信号の場合では、出力パワーは弱バースト信号と同様に波長依存性が抑圧される。一方、波長変換用 SOA の利得ピークが 1584~1598 nm 付近に存在するため、利得ピーク付近での波長変換効率が向上することにより、消光比は上り信号波長に対して依存性を生じる。

ここで、光中継増幅 PON システムのシステムロスバジェットを簡易に正確に推定するため、光強度変調度 (OMA: Optical modulation amplitude) をパラメータとして用いる [11]。OMA は光信号のマークレベルとスペースレベルのエネルギー差を意味し、

$$OMA = 10 \log_{10} \left(2P_{out} \frac{r_{out} - 1}{r_{out} + 1} \right) \quad (3-1)$$

と記述される。ここで、 P_{out} および r_{out} は、それぞれ波長変換型 ALC から出力された波長変換光の平均出力パワー、および消光比である。図 3-5 (a) に示す測定値から導出した、波長変換型 ALC の OMA 出力特性を図 3-5 (b) に示す。波長変換型 ALC の OMA 出力は、1572~1596 nm の 24 nm に渡る波長範囲において、強バースト信号である -8 dBm、および弱バースト信号である -25 dBm 入力の場合において、それぞれ +4.5 dBm、および +2.5 dBm に一定制御されていることが確認できる。

光中継増幅 PON システムのシステムロスバジェットは、アクセス区間およびトランク区間のロスバジェットの和で導くことができる。本検討においては、アクセス区間のロスバジェットは ONU 出力パワーおよび ALC 入力パワーから導くことができる。一

方、トランク区間のロスバジェットは、波長変換型 ALC の OMA 出力特性、および OLT の最小受信感度によって導出することができる。アクセス区間のロスバジェット導出式は、

$$Trunk\ span[dB] = (OMA - 3) - 10\log_{10}\left(P_{sen}(r_{in})\frac{r_{in} - 1}{r_{in} + 1}\right) \quad (3 - 2)$$

と記述できる。ここで、 P_{sen} および r_{out} は、それぞれ OLT 受信器の最小受信感度、および OLT 受信信号の消光比である。式(3-2)の第一項は、波長変換型 ALC の OMA 出力を平均光パワーへ変換する。また、第二項は、理想的な消光比が無限大の光信号を受信した場合における、OLT の最小受信感度を意味する。これら、式(3-2)を用いて、トランク区間のロスバジェットを推定すると、波長変換型 ALC への入力条件が強バースト信号である -8 dBm、および弱バースト信号である -25 dBm において、それぞれ 35.8 dB および 33.8 dB となる。

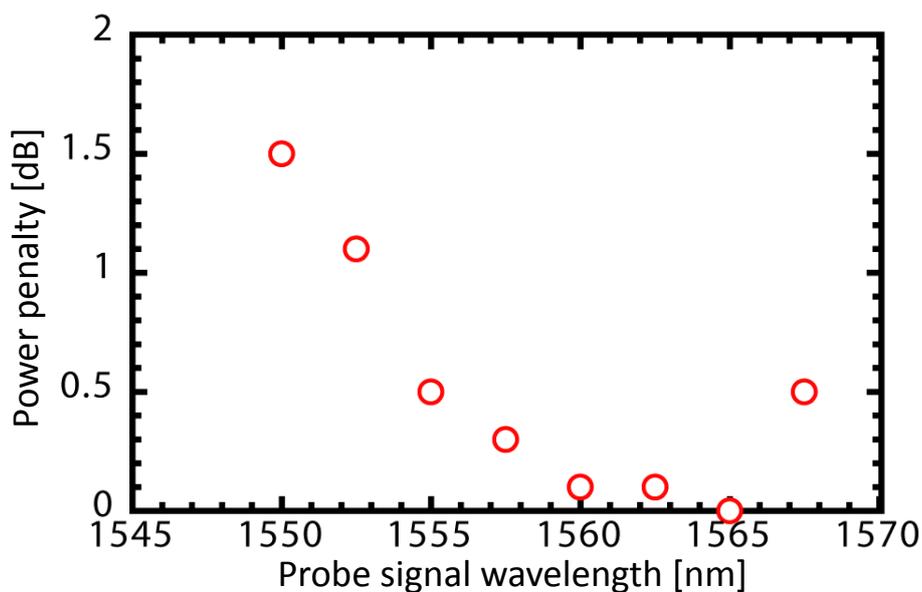


図 3-4 波長変換元信号波長 1595 nm に対する、波長変換光 (プローブ信号波長)依存性.

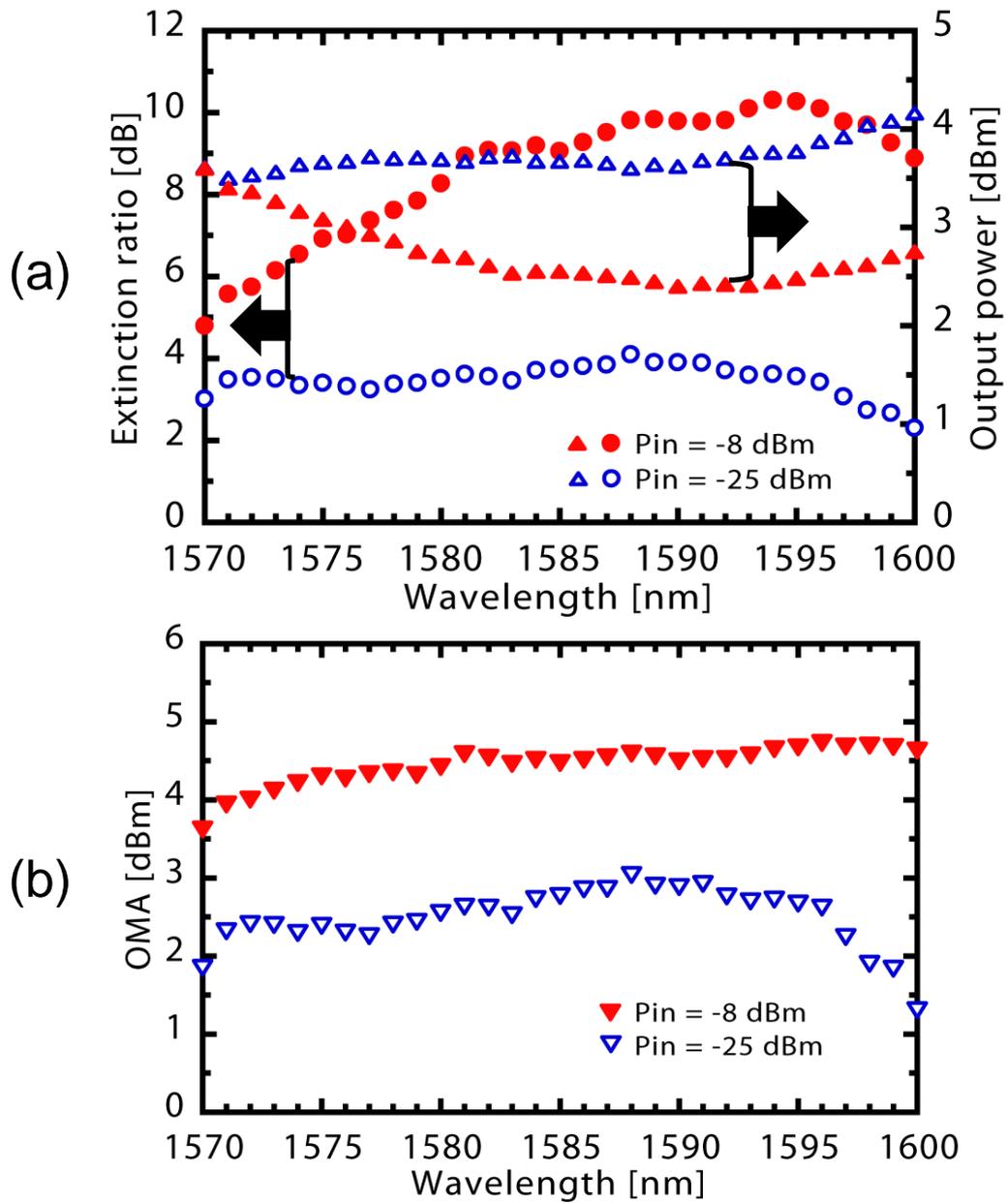


図 3-5 波頭変換が ALC 出力の波長依存性. (a) 出力および消光比特性. (b) OMA 特性.

3-3-3 ロスバジェット評価

波長変換型 ALC を適用した、光中継増幅 PON システムに対する、OMA を用いたロスバジェット推定手法の妥当性を検証するため、実験によりシステムロスバジェット、およびダイナミックレンジ特性を測定した。測定では、図 3-2 に示す実験構成において、アクセス区間、およびトランク区間のロスバジェットを模擬する、VOA1 および VOA2 の値を変化させた条件において、BER (Bit error rate)特性を測定し、光中継増幅 PON システムの動作領域を評価した。図 3-6 に、波長変換型 ALC を適用した光中継増幅 PON システム動作領域の評価結果を示す。動作領域は、各上り信号波長に対して、BER=10⁻¹²のエラーフリー特性が得られたトランク区間をプロットした各ポイントを結んだ、点線で囲まれた領域で示される。波長変換型 ALC に対して強バースト信号 (-8 dBm)入力となる、アクセス区間が 8 dB において、上り信号波長がそれぞれ 1572 nm、1584 nm、1596 nm における、トランク区間の最大ロスバジェットは、それぞれ 35.8 dB (◇)、33.0 dB (○)、33.5 dB (△)である。強バースト信号入力では、上り信号が 1584 nm および 1596 nm において、ロスバジェット測定値が、推定値よりも劣化することが確認できる。各上り信号波長において、強バースト信号を波長変換型 ALC に入力した場合における、波長変換光のアイパターンを図 3-7 に示す。図 3-7 (b)および (c)に示すアイパターンは、図 3-7 (a)と比較して、SOA のパターン効果によって波形が歪んでいることが確認できる。これは、SOA の利得ピークが 1584 nm~1598 nm 付近であるため、上り信号波長の長波長側でパターン効果が発生しやすい条件となったことが原因と考えられる。一方、波長変換 ALC に対して弱バースト信号 (-25 dBm)入力となる、アクセス区間が 25 dB においては、上り信号波長がそれぞれ 1572 nm、1584 nm、1596 nm における、トランク区間の最大ロスバジェットは、それぞれ 31.8 dB (◇)、30.0 dB (○)、33.0 dB (△)である。弱バースト信号入力では、全ての上り信号波長において、ロスバジェット測定値が、推定値よりも劣化することが確認できる。これは、光増幅用に用いている EDFA の ASE 雑音が、OLT 受信器の受信感度劣化を引き起こしたことが原因であると考えられる。また、図 3-6 より、トランク区間におけるダイナミックレンジにおいては、アクセス区間 (横軸)が 8.0 dB から 20.0 dB の領域において、トランク間ダイナミックレンジを 18.5 dB に拡大した。また、トランク区間のダイナミックレンジを 14.5 dB から 30.0 dB までの、15.5 dB に抑えることで、アクセス区間のダイナミックレンジを 8.0 dB から 25.0 dB までの、17.0 dB に拡大できることも確認できる。以上、各区間における最大ロスバジェットは、トランク区間、およびアクセス区間において、それぞれ 33.0 dB、および 25.0 dB を達成した。また、提案システムはアクセス区間が 25.0 dB の位置において、最大ロスバジェット 55.0 dB、およびシステムダイナミックレンジ 17.0 dB を得る。

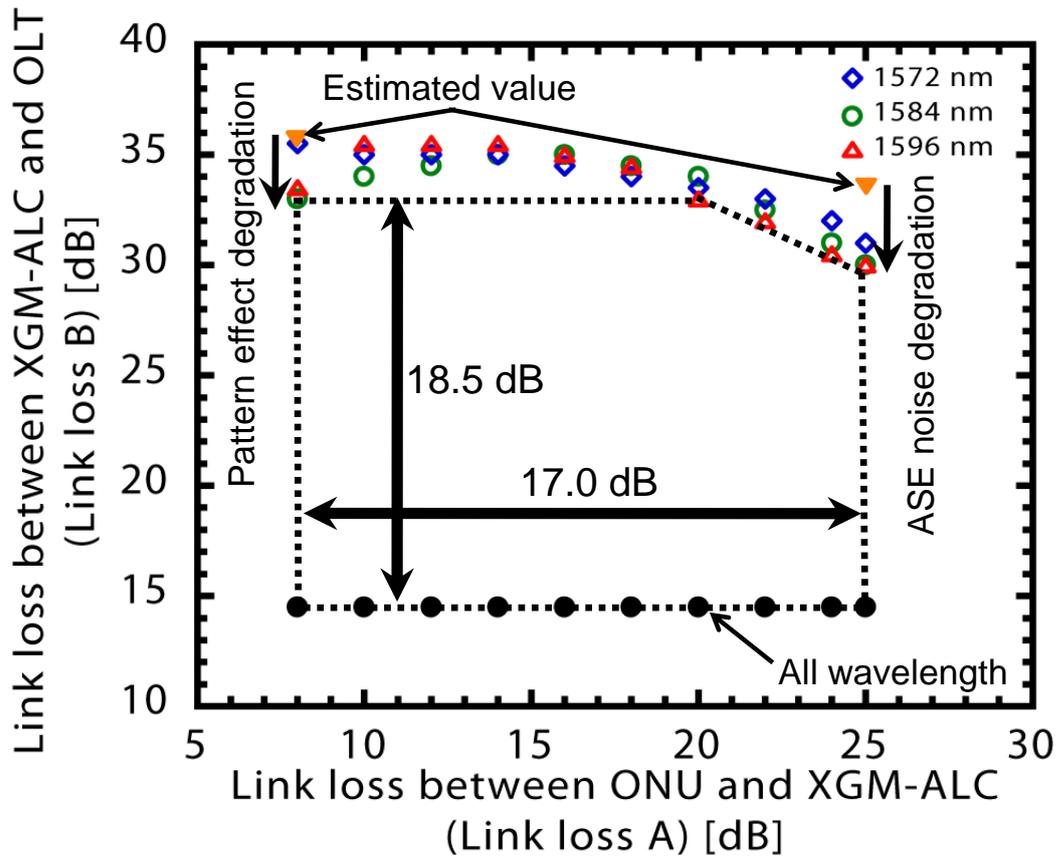


図 3-6 波長変換型 ALC を適用した光中継増幅 PON システムの動作領域.

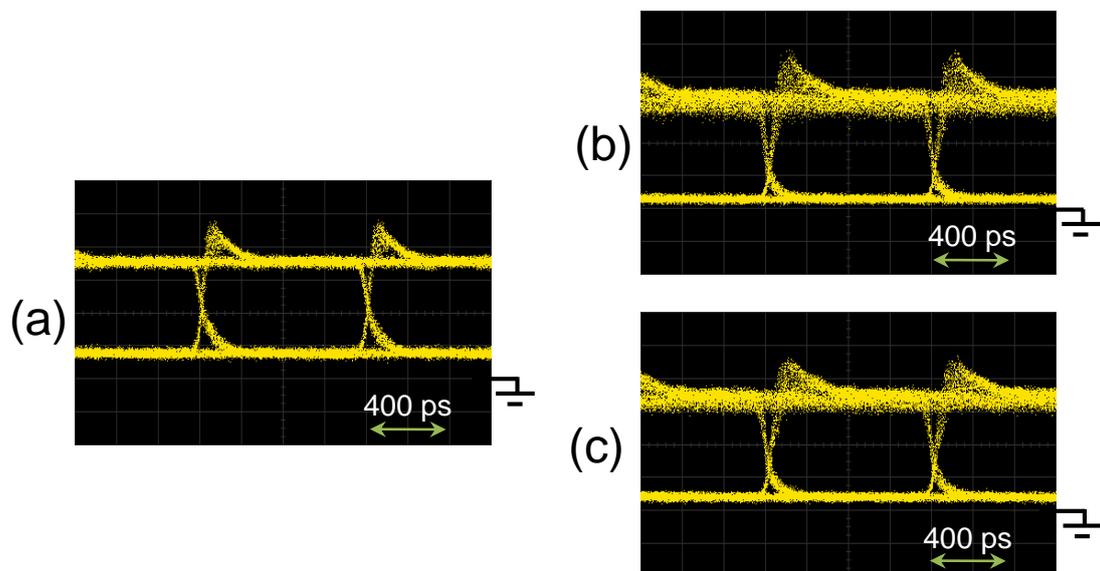


図 3-7 各上り信号波長入力に対する波長変換型 ALC 出力のアイパターン. (a) 1572 nm, (b) 1584 nm, (c) 1596 nm.

3-4 局置光増幅 GE-PON システムにおける有効性検証

本節では、OLT 設置ビルに光増幅器を設置する、局置設置構成における波長変換型 ALC の有効性検証について述べる。図 3-2 の実験系において、トランク区間を削減し、光増幅器および波長変換 ALC を OLT と直結する構成として、BER 測定を行った。信号光の波長が 1583 nm の場合における BER 測定結果、および光信号波形を図 3-8 に示す。なお、BER=10⁻¹²のエラーフリーを達成する受信器の受信感度は-27.0 dBm である。波長変換を行うことにより、-10 dBm の強バースト信号に対してエラーフリーを達成した。また、波長変換を行わない場合、光増幅器を前置増幅器として用いることにより、OLT 受信器の受信感度が 9.1 dB 改善し-36.1 dBm となる。さらに、波長変換を行うことにより、受信感度が 1.9 dB 改善し-38.0 dBm となる。図 3-8 に示す波長変換前の光信号波形は、主にマーク側に EDFA の ASE 雑音成分が重畳されている。一方、波長変換型 ALC から出力された波長変換光は、信号光に対して論理反転されるため、スペース側にこの ASE 雑音成分が移行する。ここで提案構成においては、SOA の飽和領域で波長変換を行うため、信号光のマーク側に重畳している ASE 雑音成分が論理反転され、更に飽和領域で波長変換されることにより圧縮される。これら、SOA の波長変換と飽和効果を組み合わせた、ASE 雑音圧縮効果により、受信感度が改善したと考えられる。

受信感度の波長依存性を図 3-9 に示す。図の横軸は上り信号波長、縦軸は受信感度である。EDFA の出力パワー、およびプローブ光パワーは、各波長で受信感度が最も改善されるように調整した。1575 nm から 1600 nm までの全波長において、-10 dBm の強バースト信号に対してエラーフリーを達成した。また、弱バースト信号では、受信感度が-35.0 dBm となり、受信器の受信感度に対して 8.0 dB 改善した。また、25 nm の波長範囲にわたって、25.0 dB 以上のダイナミックレンジが確保されている。この値は、GE-PON システムのダイナミックレンジ 21 dB より 6 dB 改善された値である。

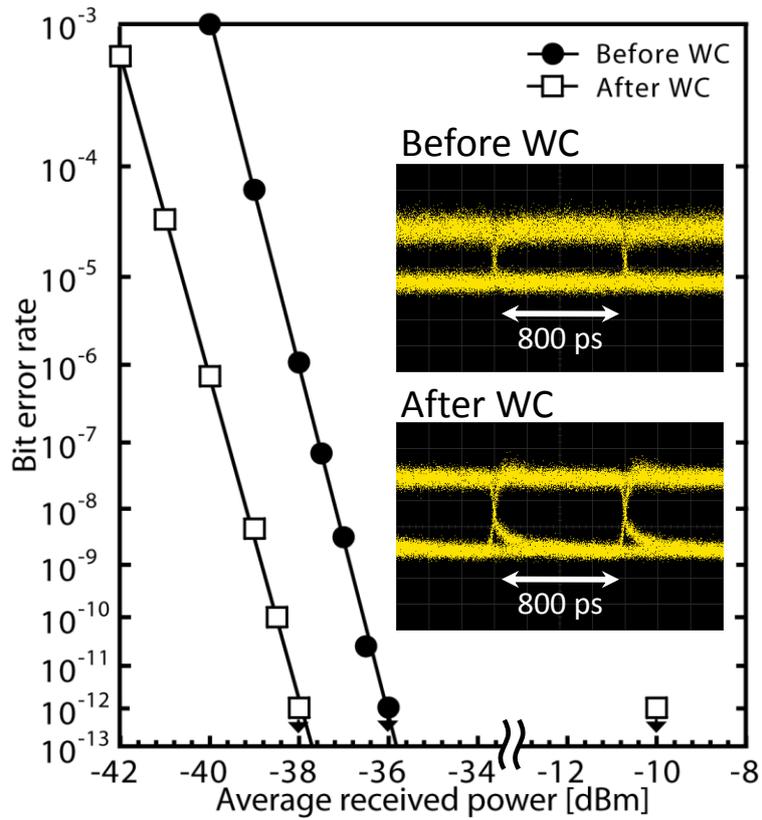


図 3-8 上り信号波長 1983 nm における波長変換型 ALC 出力の BER 特性.

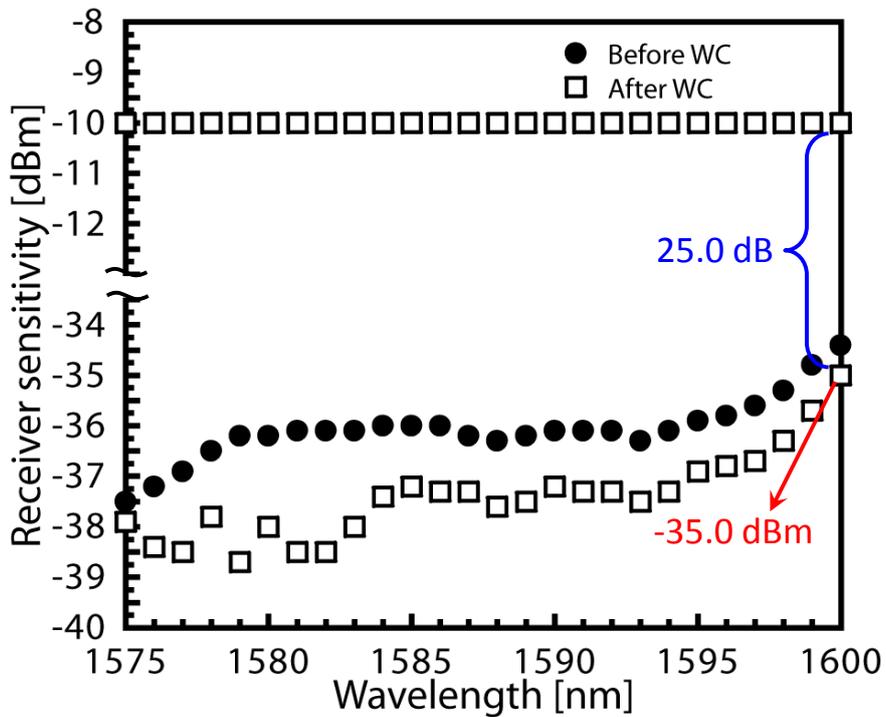


図 3-9 受信感度の波長依存性.

3-5 中継光増幅 10-Gbit/s 級 PON システムにおける有効性検証

本節では、中継光増幅 10-Gbit/s 級 PON システムに対する波長変換型 ALC の有効性について述べる。波長変換型 ALC の構成、および実験構成は、図 3-2 に示す構成と同じ構成とした。また、10-Gbit/s 級光信号の波長変換に対応するため、波長変換型 ALC に用いる SOA を、20 ps 程度のキャリア回復時間を有する、高速信号の波長変換に対応可能なデバイスに変更した。実験に用いた EDFA の利得、および NF は、それぞれ 26.5 dB、および 6.5 dB である。また、駆動電流 250 mA における、SOA の利得および偏波依存性利得 (PDG: Polarization dependent gain) は、それぞれ、30.5 dB、および 0.8 dB である。信号光のビットレート、波長、および消光比は、それぞれ 10.3125 Gbit/s (PRBS=2³¹-1)、1550.00 nm、および 6.7 dB である。また、波長変換光であるプローブ光の波長、およびパワーは、波長変換効率が最大となるよう、それぞれ 1537.00 nm、および 1.5 dBm に設定した。EDFA の入力信号 (P_{in}) を -8 dBm の強バースト信号とした時における、波長変換型 ALC の入出力信号を図 3-10 に示す。波長変換型 ALC 出力(図 3-10 (b))は、波長変換されることにより、波長変換型 ALC 入力(図 3-10 (a))と比較して、消光比が 1.1 dB 劣化する。一方、XGM によりビットパターンが論理反転することにより、パターン効果による波形劣化が抑圧される。

P_{in} を -8 dBm (近距離 ONU)、および -25 dBm (遠距離 ONU) に設定し、17 dB のアクセス区間における入力ダイナミックレンジを想定した場合における、トランク区間のロスバジェットを BER により評価した。本評価においても、ONU に実装されるレーザの波長ばらつきを考慮し、1542~1558 nm の 16nm に渡る波長範囲で上り信号波長を変化させる。上り信号波長が 1542 nm および 1558 nm における、トランク区間ロスバジェットと BER の関係を図 3-11 に示す。10-Gbit/s 級 PON への適用を前提とするため、誤り符号訂正 (FEC: Forward error correction) を採用することとし、トランク区間におけるロスバジェットは BER=10⁻³ で評価する。図 3-11 より、トランク区間の最大ロスバジェットは、上り信号波長が 1542 nm の条件における遠距離 ONU で規定され、30.0 dB となる。また、トランク区間ロスバジェットは、全波長における弱バーストおよび強バースト信号入力において、ALC 効果が確認でき、15.0 dB まで低減することが可能となり、さらに、トランク区間において 15.0 dB のダイナミックレンジを達成する。図 3-11 より、波長変換型 ALC に用いた SOA は 1555.0 nm 付近に利得ピーク波長を有するため、短波長側 (1542 nm) の入力信号に対して波長変換効率が低下すると考えられる。このため、P_{in} が -25 dB における波長変換光品質が劣化したことにより、トランク区間ロスバジェット特性に入力信号波長依存性が生じた。

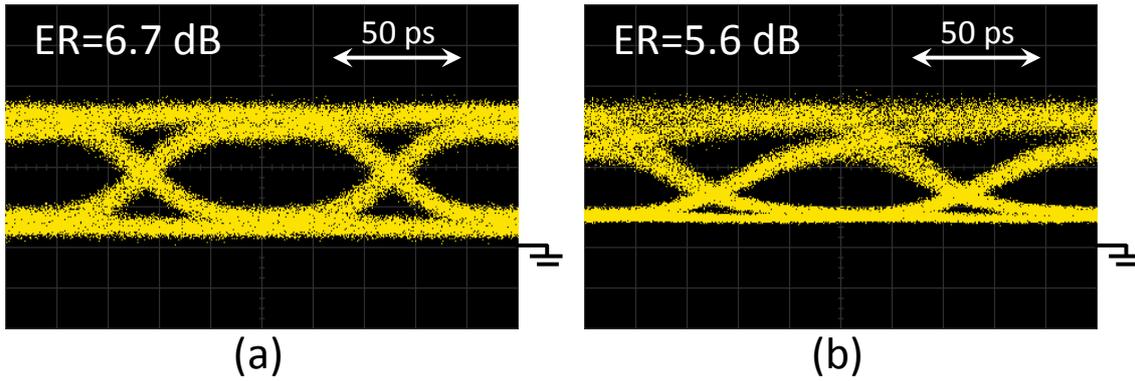


図 3-10 波長変換型 ALC への(a)入力信号, および(b)出力信号のアイパターン.

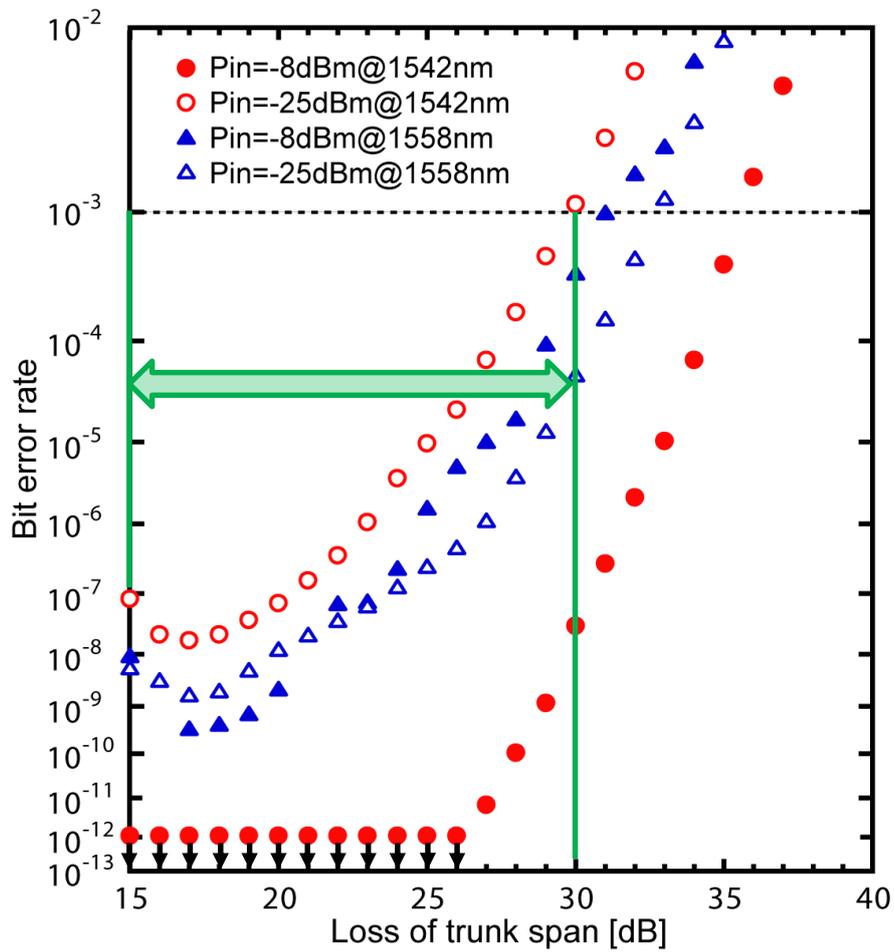


図 3-11 各信号波長におけるトランク区間と BER の関係.

3-6 まとめ

本章では、SOA を適用した光増幅 PON システムにおいて、Overload、および Surge 限界によって制限される、上り方向のシステム動作領域の拡大に向けて、SOA の XGM を活用した波長変換型 ALC 技術を提案した。中継増幅構成の光増幅 GE-PON システムにおいては、伝送路中に設置される光増幅器に波長変換型 ALC 機能を具備することにより、15 dB のパワー差を有するバースト入力信号に対して、パワー差を 2 dB 以内に制御できることを示した。提案した、波長変換型 ALC を中継光増幅 GE-PON システムに適用することで、システムロスバジェットを最大 55.0 dB まで拡大しつつ、17.0 dB のシステムダイナミックレンジを確保できることを明らかにした。また、局置構成の光増幅 GE-PON システムへの適用においては、25 nm の信号波長範囲に対して、最小受信感度を -35.0 dB まで拡大しつつ、25.0 dB の入力信号パワーダイナミックレンジを達成した。10-Gbit/s 級光増幅 PON システムへの適用においては、16 nm の信号波長範囲に対して、トランク区間損失を 30.0 dB まで拡大しつつ、15.0 dB のトランク区間ダイナミックレンジを確保できることを明らかにした。

参考文献

- [53] K. Taguchi, M. Fujiwara, T. Imai, K.-I. Suzuki, H. Ishii, N. Yoshimoto, and H. Hadama, "Applicable area estimation of bidirectional optical amplifiers to 10-Gb/s class long-reach PON systems," in *Proc. COIN'2010*, MoA1-3, 2010.
- [54] M. Fujiwara, K.-I. Suzuki, K. Hara, T. Imai, K. Taguchi, H. Ishii, N. Yoshimoto, and H. Hadama, "Burst-mode compound optical amplifier with automatic level control circuit that offers enhanced setting flexibility in a 10 Gb/s-class PON," in *Proc. ECOC'2010*, PDP3.2, 2010.
- [55] Y. Kai, S. Yoshida, K. Sone, G. Nakagawa, and S. Kinoshita, "MSA compatible package size, dual-channel fast automatic level controlled SOA subsystems for optical packet and PON signals," in *Proc. ECOC'2011*, Mo.2.A.2, 2011.
- [56] M. Fujiwara, R. Koma, and K. Taguchi, "High-splitting-ratio WDM/TDM-PONs using automatic gain controlled SOAs designed for central office use," in *Proc. OFC'2015*, Tu3E.4, 2015.
- [57] T. Durhuus, B. Mikkelsen, C. Joergensen, S. L. Danielsen, and K. E. Stubkjaer, "All-optical wavelength conversion by semiconductor optical amplifier," *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 14, no. 6, pp. 942-954, 1996.
- [58] J. Y. Emery, B. Lavigne, C. Porcheron, C. Janz, F. Dorgeuille, F. Pommereau, F. Gaborit, I. G. Neubauer, and M. Renaud, "Increased input power dynamic range of Mach-Zehnder wavelength converter using a semiconductor optical amplifier power equalizer with 8 dBm output saturation," *IET Electron. Lett.*, vol. 35, pp. 955-956, 1999.
- [59] R. Sato, T. Ito, Y. Shibata, A. Ohki, and Y. Akatsu, "40-Gb/s burst-mode optical 2R regenerator," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, pp. 2194-2196, 2005.
- [60] D. P. Shea and J. E. Mitchell, "Architecture to integrate multiple PONs with long reach DWDM backhaul," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 27, pp. 126-133, 2009.
- [61] T. Tsutsumi, T. Sakamoto, Y. Sakai, T. Fujiwara, H. Ou, Y. Kimura, and K. -I. Suzuki, "Long-reach and high-splitting-ratio 10G-EPON system with semiconductor optical amplifier and N:1 OSU protection," *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 33, no. 8, pp. 1660-1665, 2015.
- [62] K. Taguchi, M. Fujiwara, T. Imai, K.-I. Suzuki, H. Ishii, and N. Yoshimoto, "Optically-amplified PON system using XGM-based ALC technique," *IEICE Electron. Express*, vol. 8, no. 21, pp. 1836-1841, 2011.
- [63] IEEE Std 802.3 ah, "Part 3: Carrier sense multiple access with collision

detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications,”

第4章 SGC 光を用いたパターン効果抑圧技術

4-1 下り信号増幅用 SOA の動作領域拡大

第2章において、図 4-1 に示す光増幅 PON システムに SOA を適用した場合における、Loss 限界、Overload 限界、Surge 限界を考慮した、システム動作領域の解析を行った。光増幅 PON システムは、トランク区間に光ファイバのみが接続されるネットワーク構成となるため、下り信号増幅用 SOA には、OLT から出力された下り信号が、強い光強度の状態を入力される。このため、上り下り両方向に用いる SOA の動作領域を重ね合わせた、総合的なシステム動作領域において、下り信号増幅に用いる SOA のパターン効果に起因する波形歪みの発生閾値を意味する、Surge 限界によってシステム動作領域が大きく制限されることを明らかにした [1]。よって、第3章で検討を行った、波長変換型 ALC 技術の適用による、上り信号増幅に用いる SOA の動作領域拡大技術に加え、下り信号増幅に用いる SOA に対しては、パターン効果による波形歪み抑圧技術を適用することで、SOA を用いた光増幅 PON システムの動作領域を大幅に拡大することができる。

これまでに、パターン効果による波形歪みが、飽和増幅動作時における SOA 内部のキャリア変動の影響によって発生する点に着目し、信号光波長と異なる波長の CW 光を GC 光として SOA に注入することで、飽和領域における増幅特性の改善を狙った報告がされている [2, 3]。本構成は、CW 光源から構成される GC 光源を追加するのみの、非常に簡易な構成でパターン効果抑圧が実現可能である。一方、GC 光によって SOA のキャリアが消費されるため、増幅信号光波長における利得が低下することによる、出力低下を招いてしまう課題がある。これら、CW 光源を用いた GC 光方式の課題を解決する手段として、GC 光を信号光に対して論理反転したビットパターンによって変調した、SGC 光を注入するパターン効果抑圧手法が、全光信号処理などの分野への適用を狙って報告されている [4-7]。本手法は、信号光に対して論理反転した SGC 光を注入することで、信号がスペースレベル時に SOA 内に蓄積されパターン効果の要因となるキャリアを、マークレベルの SGC 光によって消費することで、パターン効果を抑圧する。更には、信号光がマークレベル時においては、SGC 光はスペースレベルとなるため、信号光のマークレベルは SOA の線形利得によって高効率で増幅される。本構成では、マークレベルは増幅され、一方スペースレベルは SOA 内部のキャリアが消費され低減されるため、出力信号は光信号再生効果による、消光比改善効果が得られる。しかし、これまでに報告されている SGC 光方式は、波長変換素子などとの組み合わせられた複雑な構成となっている。本章では、下り増幅用 SOA への SGC 光方式の適用を狙い、経済的かつ簡易な構成である O/E/O 変換器を用いた、SGC 光によるパターン効果抑圧 SOA を提案する。

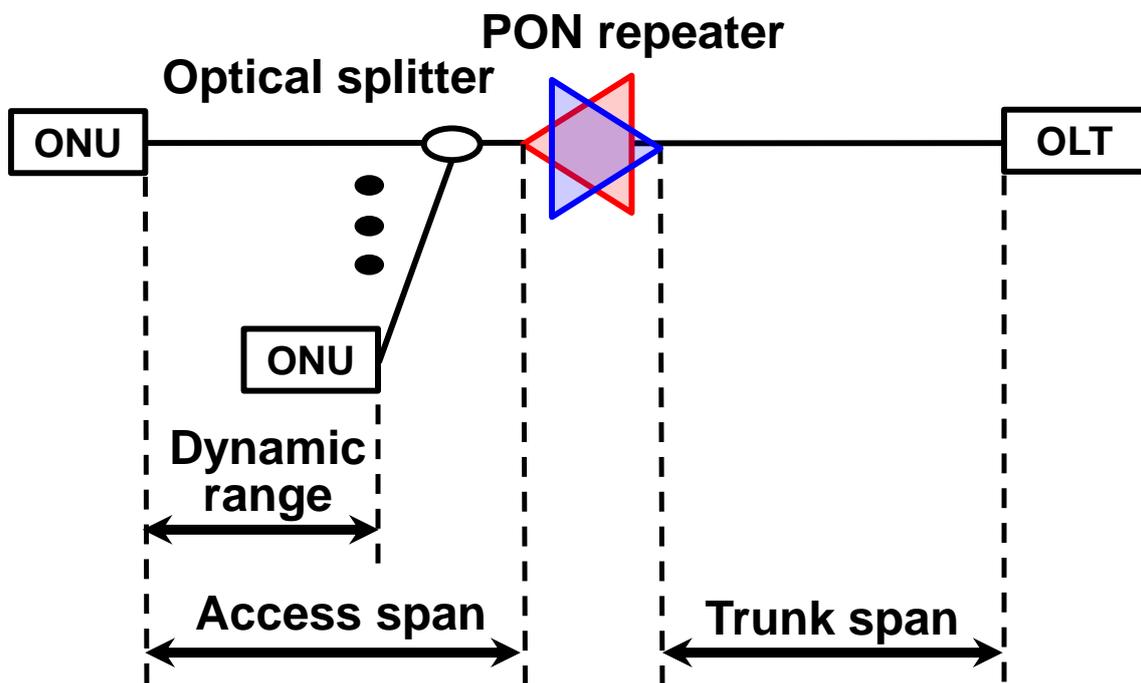


図 4-1 光中継増幅 PON システムの構成.

4-2 O/E/O 変換器型 SGC 光生成部を備えたパターン効果抑圧 SOA

提案する O/E/O 変換器による SGC 光生成部を備えた、パターン効果抑圧 SOA の構成を図 4-2 に示す。提案構成は、信号波長が 1490 nm である GE-PON システムの下り信号を増幅する SOA、および SOA 内部のキャリアを制御する SGC 光を生成する、O/E/O 変換器型 SGC 光生成部から構成される。SGC 光生成部は、1.25-Gbit/s モニタ PD、LD ドライバ、および 1.25-Gbit/s DML 光源の必要最低限のデバイスから構成され、経済化および簡易化が図られている。SGC 光生成部の特性を決定する重要なデバイスである、モニタ PD の BER が 10^{-12} を満足する最小受信感度、および最大受光パワーは、それぞれ -19.5 dBm、および +3.0 dBm である。OLT から出力され、パターン効果抑圧 SOA に入力された下り信号は、3 dB カプラによって、SOA に入力される主信号と、モニタ PD に入力されるモニタ信号に分岐される。モニタ PD はモニタ信号を電気信号へと変換し、それら電気信号を LD ドライバに入力する。DML は LD ドライバによってモニタ信号の電気信号を元に変調され、図 4-3 に示す信号光のビットパターンに対して論理反転した SGC 光を生成する。信号光と SGC 光は、SOA 前段の CWDM (Coarse WDM) フィルタによって合波される。この時、信号光経路に光ファイバによる遅延線を挿入することで、SGC 光と信号光が同期状態を確保する。同期された状態で SOA に入力される信号光、および SGC 光は、信号光がスペースレベル時には SOA 内部に蓄積されるキャリアを、マークレベル状態にある SGC 光によって低減することで、増幅信号のパターン効果が抑圧される。さらに、SOA の利得は SGC 光によって、信号光がマークレベル時には高く、スペースレベル時には低く制御されるため、増幅信号の消光比が改善される光信号再生効果が得られる。SOA から出力された増幅信号は、CWDM フィルタによって信号光と SGC 光に分波され、信号光はアクセス区間に出力される。一方、SGC 光は終端器によって終端される。

SGC 光生成部において、SGC 光出力パワーのモニタ PD 受信パワー依存性を図 4-4 に示す。モニタ PD の受信パワーが -5.0 dBm 以上の領域においては、SGC 光は、+2.1 dBm の平均光パワーを得る。さらには、SGC 光出力が一定となっているため、1.25 Gbit/s のビットレートで変調がされている。一方、モニタ PD の受信パワーが -5.0 dBm 以下の領域においては、1.25 Gbit/s のビットレートでの変調が困難となり、SGC 光が CW 光として出力される。このため、モニタ PD の受信パワーが低くなるにつれて、SGC 光の平均光パワーが徐々に大きくなる。また、GE-PON システムの下り信号増幅への適用を狙った本構成においては、ロスバジェット拡大の観点から高利得特性を有する SOA の適用が望ましい。このため、実験に用いた SOA の駆動電流 300 mA における、利得ピーク波長、信号波長 1490 nm の小信号利得、NF、および飽和出力パワーは、それぞれ、1500 nm、26.5 dB、6.8 dB、および +13.1 dBm である。また、SOA の利得が線形領域から 1 dB 低下し、パターン効果が発生する閾値となる入力パワーは、-12.5 dBm である。

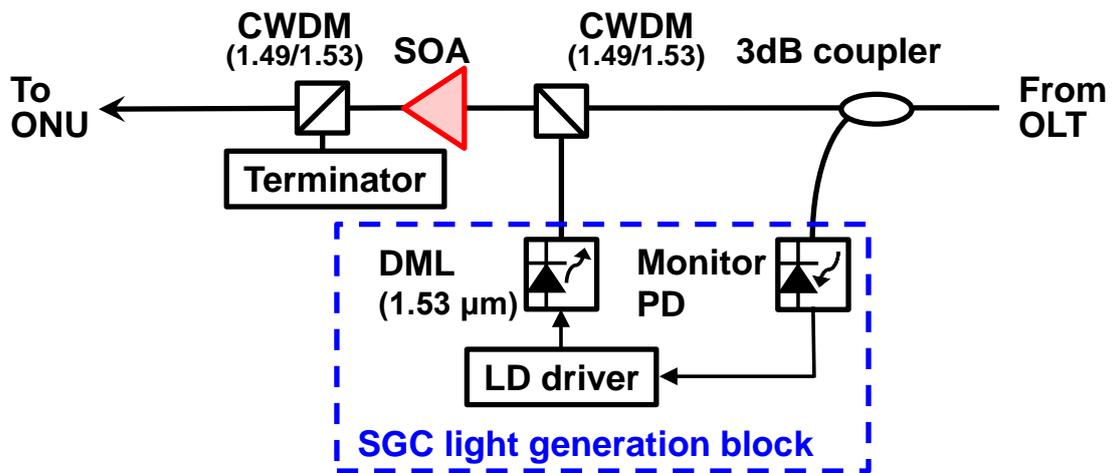


図 4-2 O/E/O 変換器型 SGC 光生成部を備えたパターン効果抑圧 SOA の構成.

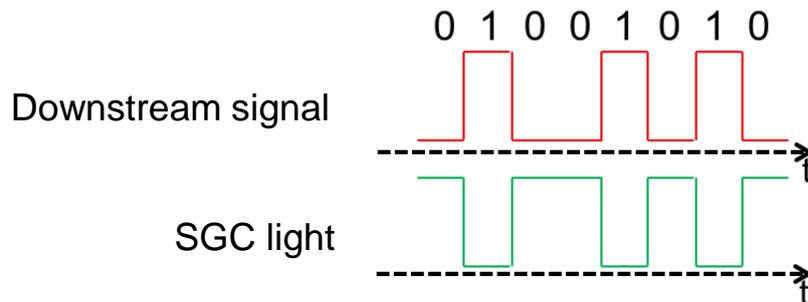


図 4-3 信号光と SGC 光の関係.

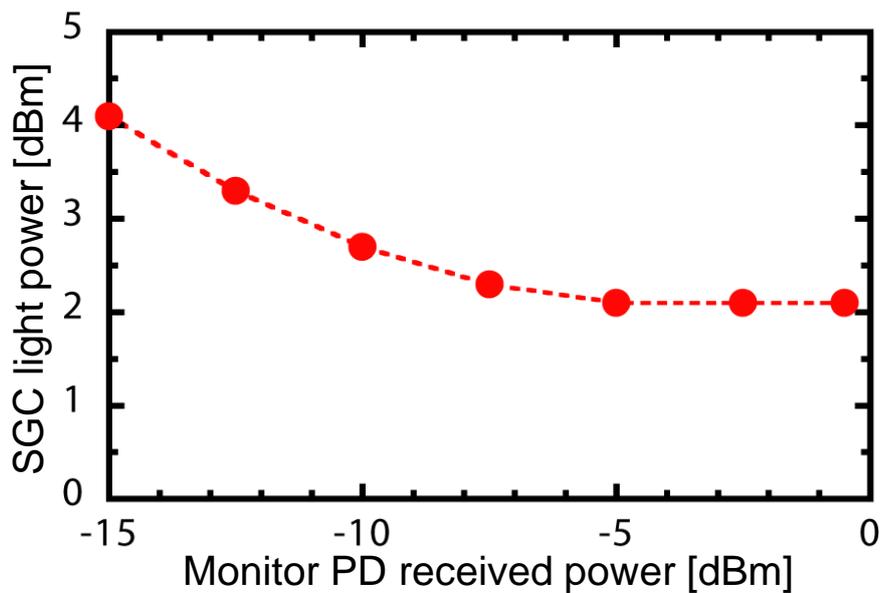


図 4-4 SGC 光パワーのモニタ PD 受信パワー依存性.

4-3 光増幅 GE-PON システムにおける有効性検証

4-3-1 基本増幅特性

提案した O/E/O 変換器型 SGC 光生成部を用いた、パターン効果抑圧 SOA の効果を検証するため、パターン効果が発生する -5.0 dBm の光信号を入力した状態において、増幅信号のアイパターン、および BER 測定を行った。また、SGC 光の効果を比較するため、GC 光無し、CW-GC 光有り、SGC 光有りの 3 パターンについて、評価を行った。なお、CW-GC と SGC 光パワーは、+2.1 dBm とし、同一条件の下で評価を行った。各条件における SOA への入出力信号のアイパターンを、図 4-5 に示す。図 4-5 (a)より、SOA 入力信号の消光比は 10.2 dB である。GC 光無しの場合は図 4-5 (b)より、波形の立ち上がりおよび立ち下がり、パターン効果によるオーバーシュート、およびダウンシュートが発生し、消光比が 4.4 dB に劣化する。一方、CW-GC 光および SGC 光有りの場合は、図 4-5 (c)および(d)より、パターン効果が抑圧され、良好なアイ開口が得られる。さらに、SGC 光有りの場合においては、前節で説明した光信号再生効果により、入力信号に対して消光比が 7.4 dB 改善し、17.6 dB となることが確認できた。

B-B、SGC 光無しおよび有りの場合における、増幅信号の BER 特性を図 4-6 に示す。図 4-6 より、B-B において、BER がエラーフリーである 10^{-12} を満足する最小受信感度は、-34.0 dBm である。SGC 光無しの条件においては、パターン効果による波形歪みの影響により、最小受信感度が B-B の場合と比較して 5.0 dB 劣化する。一方、SGC 光有りの条件においては、光信号再生効果による消光比改善の影響により、最小受信感度が B-B の場合と比較して 0.8 dB 改善し、-34.8 dBm となる。パターン効果抑圧、および消光比改善による最小受信感度改善度は、それぞれ 5.0 dB、および 0.8 dB と見積もることができる。

パターン効果抑圧効果の SGC 光パワー依存性を明らかにするため、パワーペナルティの SGC 光パワー依存性を評価した。これらパワーペナルティと SGC 光パワーの関係を図 4-7 に示す。図 4-7 より、SGC 光パワーが -5.0 dBm 以上の領域では、SGC 光による SOA 内のキャリア制御が行え、パターン効果をほぼ完全に抑圧できるため、パワーペナルティが確認されない。一方、SGC 光パワーが低下すると、パターン効果抑圧効果が弱くなるため、パワーペナルティが増大し、SGC 光パワーが -7.2 dBm のポイントで、1.0 dB のパワーペナルティが確認できる。よって、提案したパターン効果抑圧 SOA においては、SGC 光パワーを -5.2 dBm 以上に設定した条件で、次節以降の評価を行う。

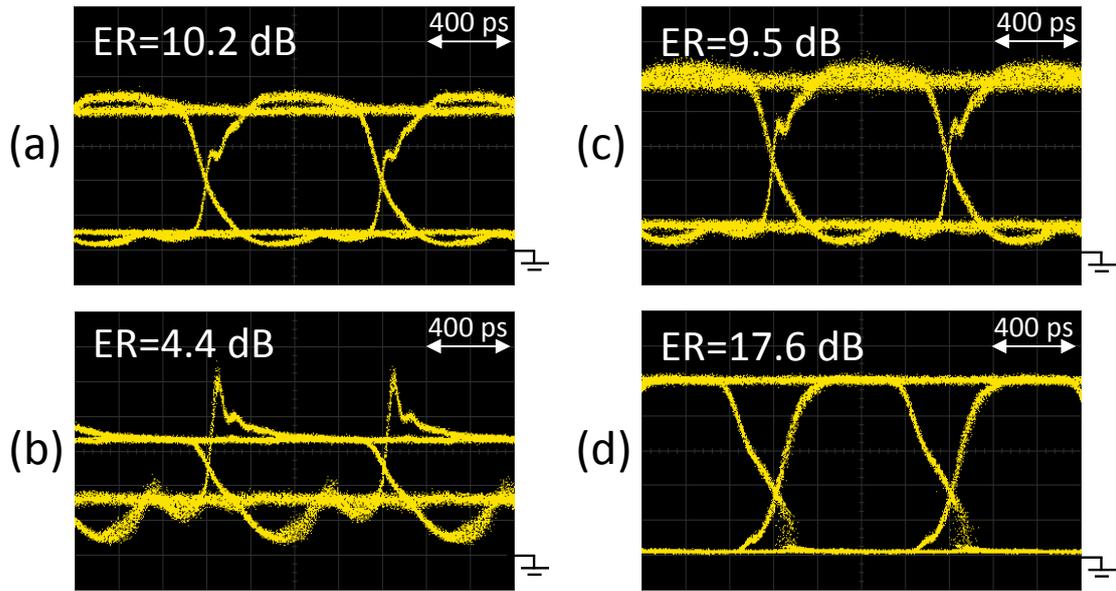


図 4-5 SOA 入力信号パワーが-5.0 dBm の場合における, (a)SOA 入力信号, (b)SGC 光無しの場合における SOA 出力信号, (c)CW-GC 光入力の場合における SOA 出力信号, (d)SGC 光入力の場合における SOA 出力信号のアイパターン。

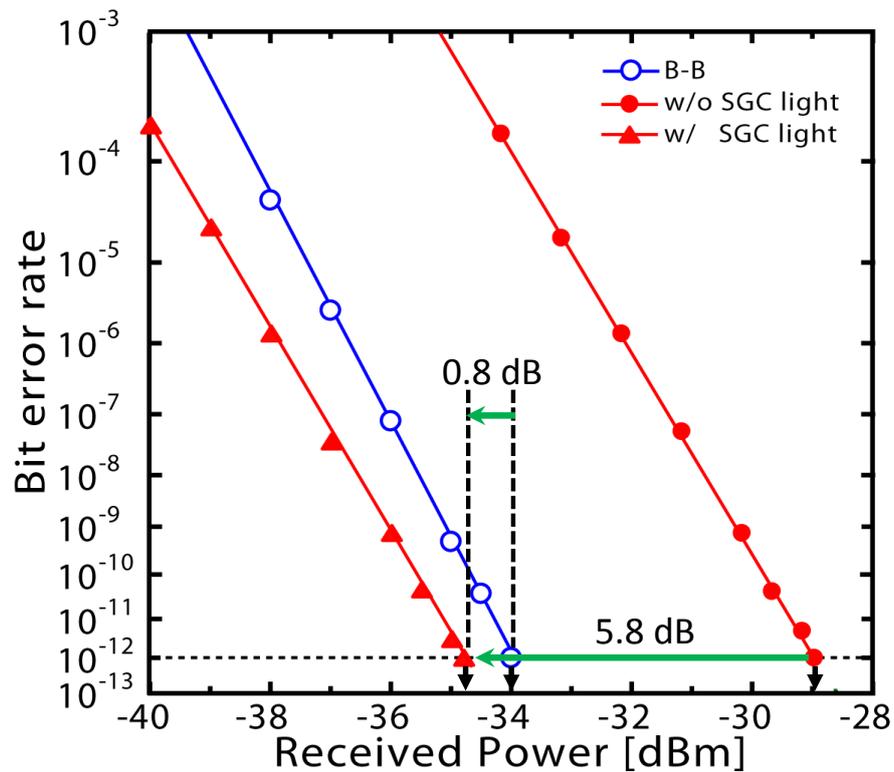


図 4-6 SOA 入力パワーが-5.0 dBm の条件における, B-B, SGC 無し, および SGC 有りの場合の BER 特性。

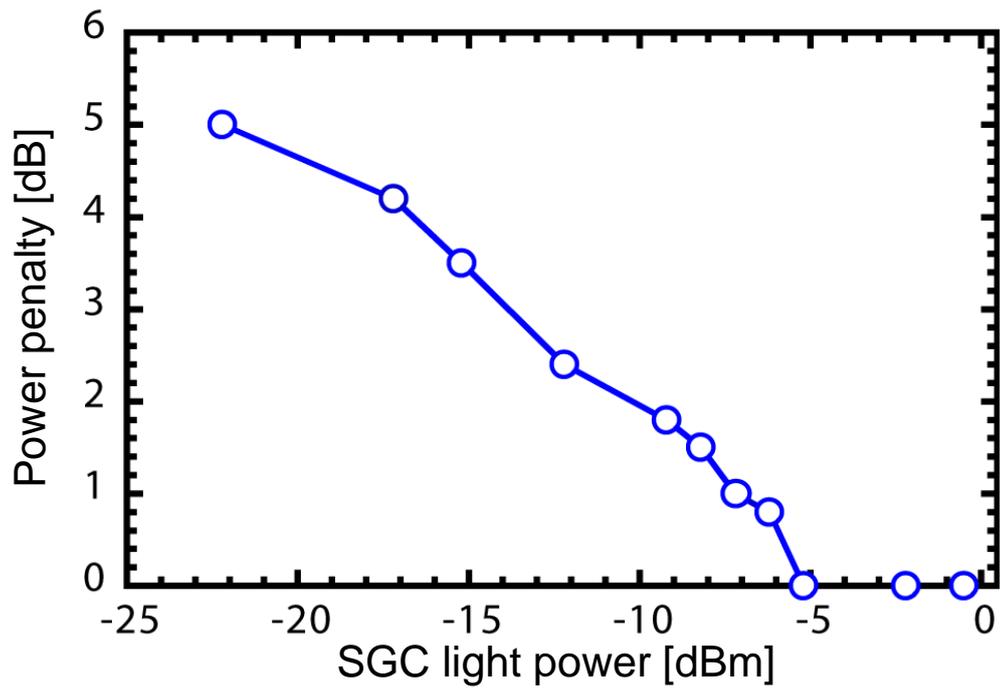


図 4-7 受信感度パワーペナルティの SGC 光パワー依存性.

4-3-2 下り信号におけるアクセス区間ロスバジェット評価

実際の光増幅 GE-PON システムを模擬した実験系において、提案したパターン効果抑圧 SOA の有効性評価を行った。光増幅 GE-PON システムにおける、下りアクセス区間ロスバジェットの評価系を、図 4-8 に示す。評価系は、GE-PON システム用 ONU、パターン効果抑圧 SOA、および GE-PON システム用 OLT から構成される。なお、本評価においては、OLT-SOA 間および SOA-ONU 間を、それぞれトランク区間、およびアクセス区間と定義する。OLT の送信器は実際に導入されている GE-PON システムと同じ DML 光源を採用し、下り信号は 1.25 Gbit/s のビットレートで変調される。OLT 送信器の出力パワー、信号波長、および消光比は、それぞれ+2.5 dBm、1490.0 nm、および 10.2 dB である。OLT 送信器出力のアイパターンは、図 4-6 (a) に示したものと同一である。一方、ONU の受信器は APD、およびクロック識別再生回路 (CDR: Clock and data recovery) から構成される。なお、パターン効果抑圧 SOA は下り信号入力信号に対して、最も利得が確保でき、かつパターン効果を抑圧できる条件に設定した。このため、SOA の駆動電流、その場合における信号波長 1490 nm における小信号利得、および SOA に入力される SGC 光パワーは、それぞれ 300 mA、26.5 dB、および -5.2 dBm に設定した。BER=10⁻¹² で定義されるエラーフリーを満たす、APD の最小受信感度は -34.0 dBm である。パターン効果抑圧 SOA で増幅された下り信号は、ONU 受信器で受信され、エラーディテクタによって BER 特性を評価される。BER 特性評価において、トランク区間およびアクセス区間におけるロスバジェットは、それぞれの区間に配置された VOA 1 および VOA 2 によって模擬し、これらの設定値を変化させながら BER 特性のアクセス区間ロスバジェット依存性を測定する。

パターン効果抑圧 SOA の PRBS 依存性を明らかにするため、PRBS の条件を変えた 2 種類の下り信号を増幅した場合における BER 特性を、図 4-9 に示す。パターン効果抑圧 SOA への下り信号入力パワーが -5.0 dBm の条件において、アクセス区間のロスバジェットは PRBS が 7 段、および 31 段の両条件において -43.9 dB となった。よって、パターン効果抑圧 SOA に採用する、SGC 光方式によるパターン効果抑圧効果には、PRBS 段数依存性がないことが確認できた。

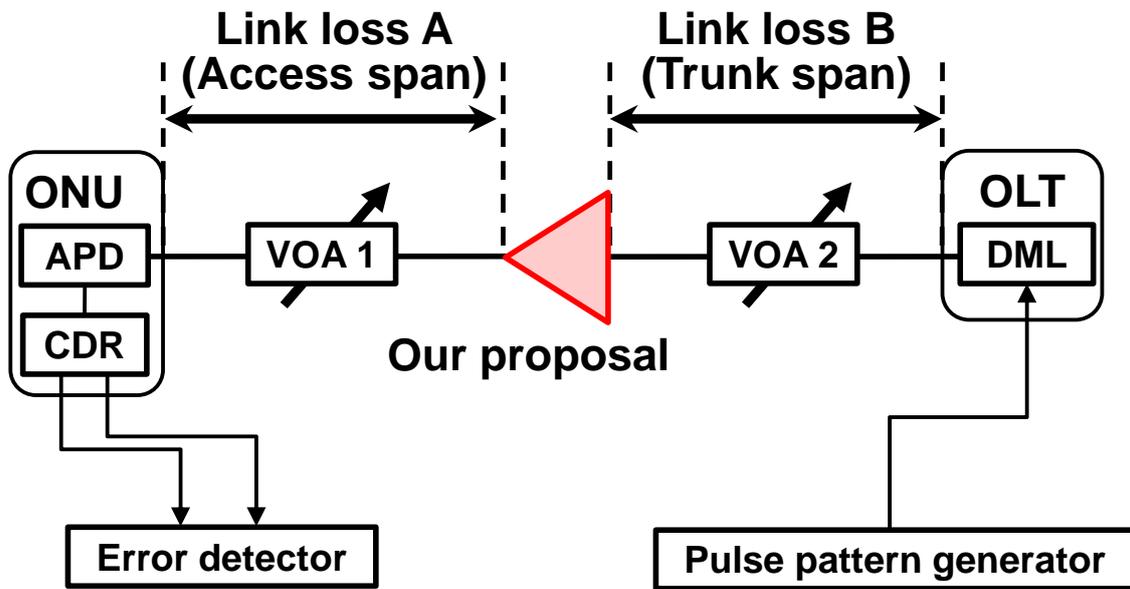


図 4-8 光増幅 GE-PON システムにおける下り許容ロスバジェット評価系.

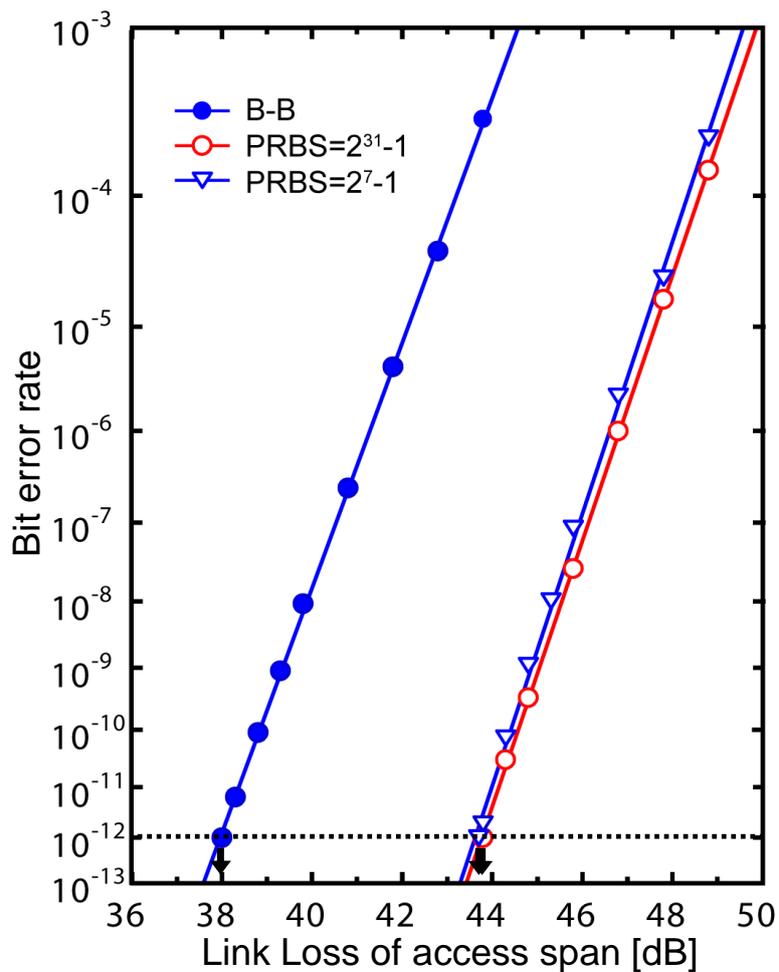


図 4-9 アクセス区間ロスバジェットの段数依存性評価.

4-3-3 OMA を用いたアクセス区間ロスバジェット推定

第2章で述べたように、光増幅器の出力信号および消光比から導出できる OMA を用いて、光増幅 PON システムのロスバジェットを容易に推定することができる [8, 9]。SGC 光を採用したパターン効果抑圧 SOA においても、同様に数式(3-1)、および(3-2)を用いて OMA からアクセス区間のロスバジェット推定が可能である。SOA への入力パワーを変化させた場合における増幅信号の出力パワー測定値、消光比測定値、および OMA 計算値を図 4-10 に示す。なお、SGC 光注入によるパターン効果抑圧、および光信号再生効果を比較するために、SGC 光無し、および CW-GC 光有りの測定値も示す。また、横軸を距離で表示しているが、下り信号波長である 1490.0 nm における一般的な SMF の損失値である 0.25 dB/km を用い、VOA 2 の損失値から換算した。図 4-10 (a)に示す出力パワーにおいては、SGC 光の有無に関わらず、同等の特性が得られている。また、トランク間の距離が長くなるほど、SOA への入力信号パワーが低下するため、出力パワーも低下することが確認できる。一方、CW-GC 光方式においては、SOA のキャリアが CW-GC 光によって消費されるため、他の条件と比較して著しく出力パワーが低下する。図 4-10 (b)に示す消光比においては、SGC 光有りの条件が前節で述べたパターン効果抑圧効果と光信号再生効果によって、トランク区間の距離に関係なく、入力信号の消光比である 10.2 dB から 5 dB 以上改善した特性を実現している。一方、CW-GC 光においても、パターン効果抑圧効果は得られるため、入力信号と同程度の消光比特性を得る。以上より、図 4-10 (c)に示す、各条件の OMA 計算値を比較すると、トランク区間の距離が短い領域において、光信号再生効果により消光比が大幅に改善したことにより、SGC 光有りの場合が CW-GC 光有りの場合よりも、優れた特性を実現している。よって、SGC 光方式を採用したパターン効果抑圧 SOA によって、下り信号を高品質な信号状態で高利得に増幅可能となる。

ここで、式(3-2)を用いて、パターン効果抑圧 SOA から出力される増幅信号の OMA、および ONU 受信器の最小受信感度を用いて、アクセス区間のロスバジェットを推定する。ONU の最小受信感度は、実験に用いる受信器の感度である -34.0 dBm とする。各条件のアクセス区間におけるロスバジェットについて、図 4-8 に示す実験系によって評価した測定値、および式(3-2)より導出した推定値を図 4-11 に示す。図 4-11 (a)に示す、SGC 光無しの場合においては、トランク区間が 0 km のポイントにおいて、推定値と測定値の間に 3.0 dB のパターン効果による波形歪みに起因する乖離が確認できる。一方、図 4-11 (b)、および(c)に示す、SGC 光、および CW-GC 光有りの場合においては、パターン効果による波形歪みが抑圧されたことにより、トランク区間の数値に依らず、推定値と測定値が良く一致していることが確認できる。また、CW-GC 光有りの場合においては、トランク区間の距離に応じて SOA の利得が低下するため、トランク間が長距離となる領域において、アクセス区間のロスバジェットが線形的に低下する。一方、SGC 光有りの場合は、トランク区間が長距離となる領域における SOA 利得の低下

が抑えられるため、CW-GC 光有りの場合と比較して、アクセス区間において高いロスバジェットを確保できる。提案した SGC 光を採用したパターン効果抑圧 SOA を、GE-PON システムの下り信号増幅に適用することにより、トランク区間を 51.8 km まで拡大したとしても、アクセス区間において 40.0 dB 以上のシステムロスバジェットを確保可能である。

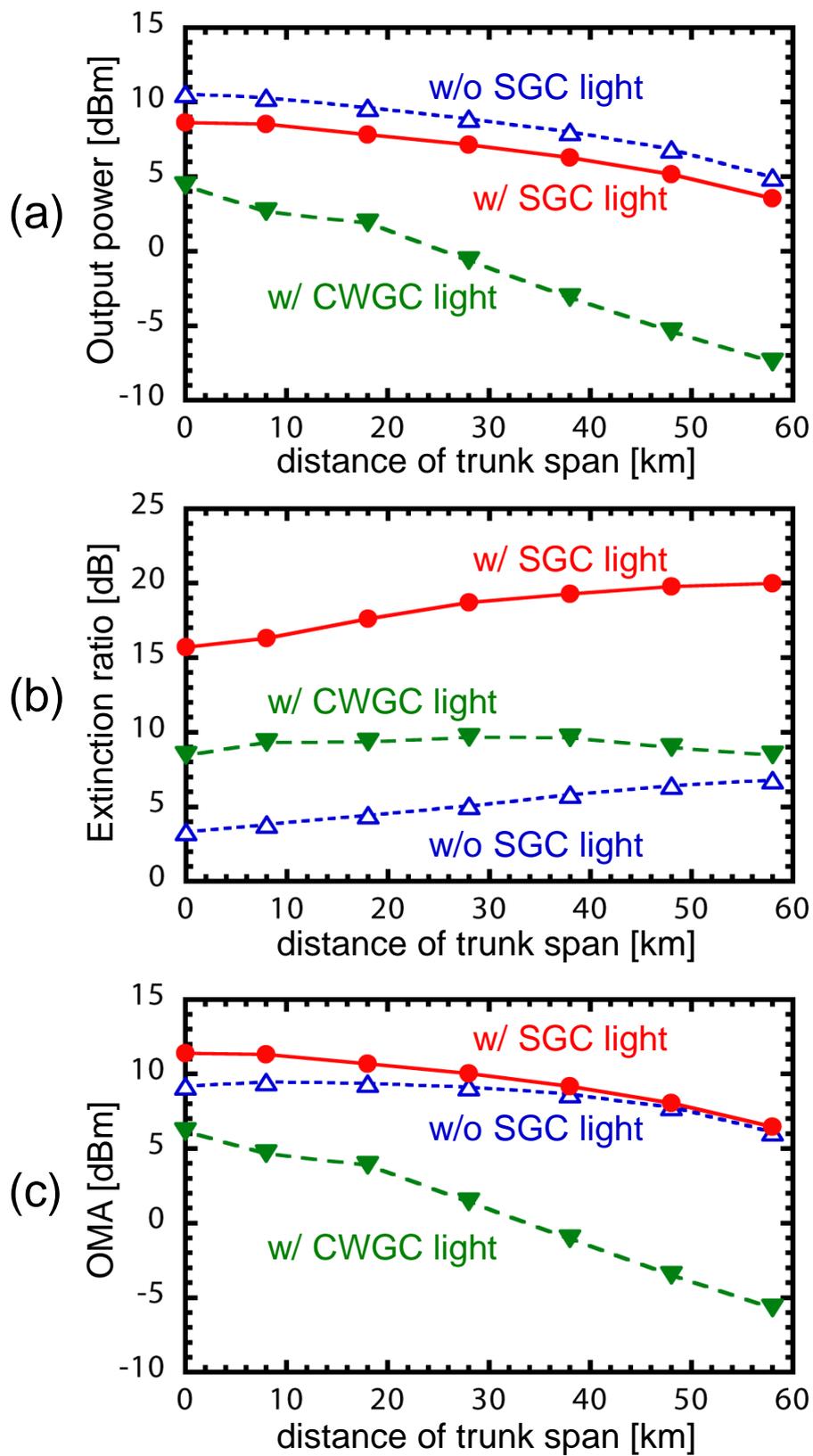


図 4-10 各条件における SOA 増幅信号の(a)出力パワー, (b)消光比, および(c)OMA 特性.

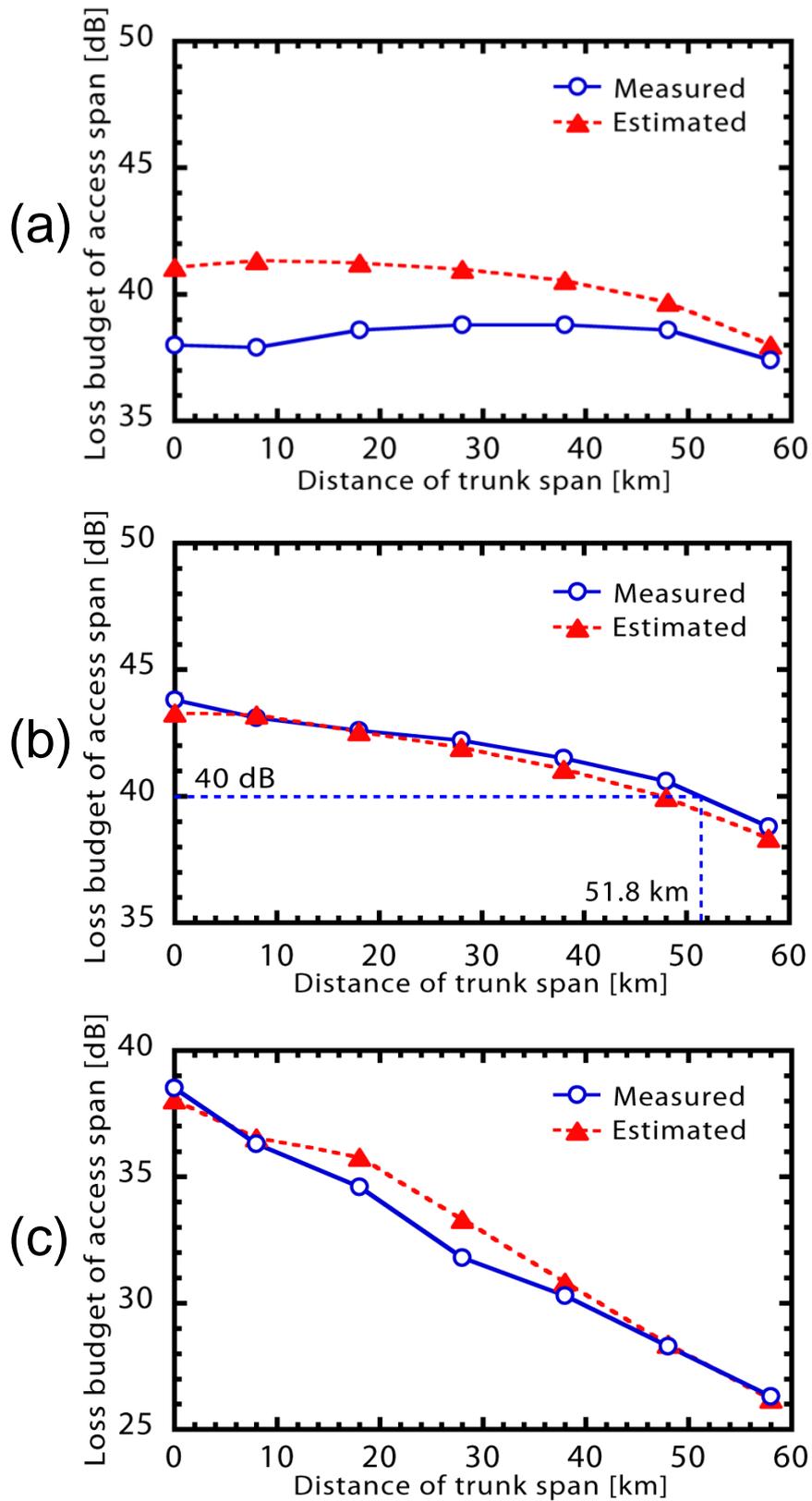


図 4-11 (a) SG 光無し, (b) SG 光有り, および(c) CW-GC 光有りの場合におけるアクセス区間ロスバジェットの推定値および測定値.

4-4 10-Gbit/s 級 PON 向けバースト光送信器に対する有効性検証

4-4-1 パターン効果抑圧 SOA を適用した 10-Gbit/s バースト光送信器

GE-PON システム、および G-PON システムの後継システムとして、IEEE では 10G-EPON システム、および ITU-T では XG-PON システムの標準化が既に完了し、海外では既にこれらシステムの導入が始まっている [10-12]。特に、次世代光アクセスシステムにおいては、広域・多分岐が強く求められていることもあり、ONU 用バースト光送信器の高出力化が強く望まれている。例えば 10G-EPON システムに用いる ONU の送信パワーは、+4.0 dBm~+9.0 dBm と標準化で規定されている。このような背景を鑑み、本節ではこれまでに提案した、SGC 光を採用したパターン効果抑圧 SOA 技術の適用領域を広げるべく、10 Gbit/s 級 PON 向け ONU 用バースト光送信器への適用を検討する。

パターン効果抑圧ブースタ SOA を備えた、10-Gbit/s バースト光送信器の構成を図 4-12 に示す。提案するバースト光送信器は、10-Gbit/s 級バースト送信器、SGC 光用送信器、3 dB カプラ、ブースタ SOA、および BPF によって構成される。バースト光送信器から出力される上りバースト信号は、制御信号である `Burst_enable` 信号によって、発光、および消光状態を制御する。本構成では、バースト光送信器が出力する上り信号のビットパターンに対して、論理反転したパターンによって SGC 光送信器を駆動させることにより、SGC 光を生成する。バースト送信器、および SGC 光用送信器から出力された、上りバースト信号、および SGC 光は、3 dB カプラによって同期された状態でブースタ SOA に入力される。上りバースト信号、および SGC 光のフレームおよびビットパターンの関係を、図 4-12 の挿入図に示す。本構成における、パターン効果抑圧原理は、前節で説明した原理と同じである。SOA から出力された SGC 光は BPF によって除去され、上りバースト信号のみが ONU から出力される。バースト光送信器が出力する上り信号波長、出力パワー、および消光比は、それぞれ 1271.2 nm、+1.3 dBm、および 6.3 dB であり、出力パワー特性は、標準化の仕様である +4~+9 dBm を満たしていない。また、上り信号のビットレートは 10.3125 Gbit/s (PRBS31 段)である。前節と同様に、上り信号波長である 1270 nm において、パターン効果が抑圧された +10.0 dBm 以上の高出力信号が得られるよう、SOA および SGC 光の設定を最適化した。駆動電流 300 mA における、SOA の 1270 nm における小信号利得、NF、飽和出力パワーは、それぞれ 20.5 dB、6.7 dB、および +12.0 dBm である。また、上記条件を満たすように最適化した SGC 光送信器が出力する SGC 光の波長、および光信号パワーは、それぞれ 1311.0 nm、および -2.0 dBm である。SGC 光パワーは、10-Gbit/s 級信号に対するパターン効果抑圧効果の SGC 光パワー依存性を評価し、安定的にパターン効果抑圧が実現できる最小値とした。

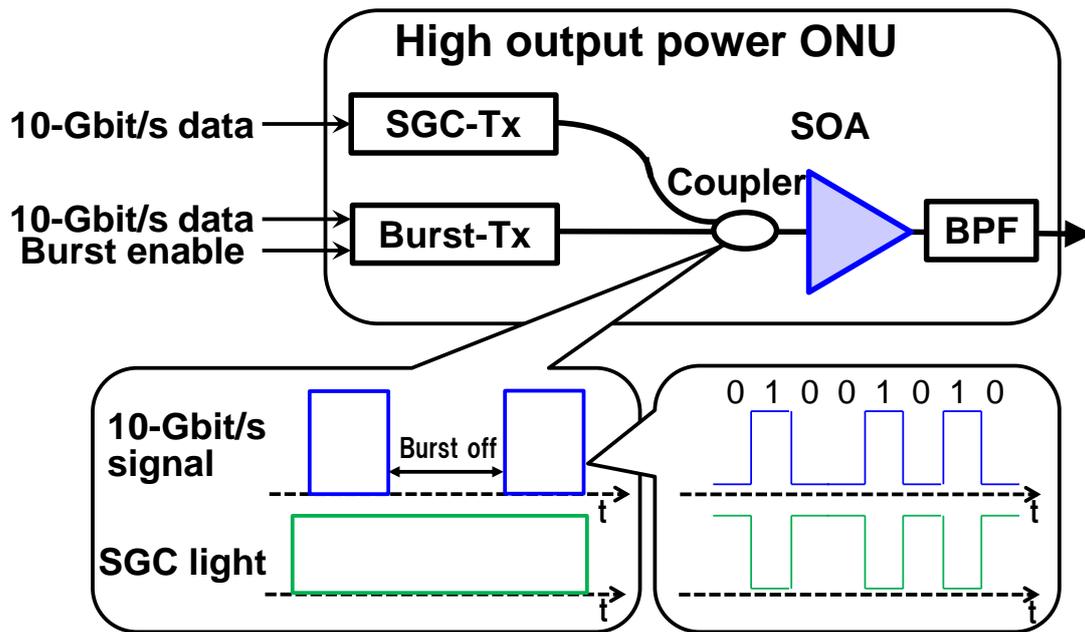


図 4-12 パターン効果抑圧ブースタ SOA を備えた高出力 10-Gbit/s 級 ONU の構成.

4-4-2 上りバースト光伝送特性評価

提案した、10-Gbit/s 級 PON システム向け ONU 用バースト光送信器出力のバースト信号波形、およびアイパターンを図 4-13 に示す。SGC 光によるパターン効果抑圧効果を比較するため、SGC 光無しの場合についても掲載する。ONU が出力する上りバースト信号のフレームパターンにおける、プリアンプル、ペイロード、およびエンドオブバーストは、それぞれ 397 ns、1589 ns、および 99 ns とした。図 4-13 より、SGC 光有りの場合においては、前節と同様にパターン効果が抑圧できているのに対して、SGC 光無しの場合においてはブースタ SOA として適用していることもあり、パターン効果による波形歪みが著しく発生する。SGC 光有り、および無しにおける出力信号の消光比は、それぞれ 7.5 dB および 3.5 dB である。パターン効果抑圧 SOA に入力するバースト信号の消光比は 6.3 dB であるため、1-Gbit/s 級信号に対する検証と同様に、10-Gbit/s 級信号においても光信号再生効果が得られることが確認できる。また、バースト信号波形より SGC 光有りの場合においては、スペースレベルの雑音成分が低減される。

次に、提案した 10-Gbit/s 級 PON システム向け ONU 用バースト光送信器の、上りバースト伝送特性を明らかにするため、システムロスバジェット評価を行った。ONU 出力を +10.8 dBm とした条件におけるシステムロスバジェットに対する BER 特性を図 4-14 に示す。なお、比較のために、SGC 有り、および無しの場合について示す。10-Gbit/s 級 PON システムにおいては、10G-EPON システムおよび XG-PON システムに関わらず、FEC の適用が前提となる。このため、エラーフリーとなる最小受信感度は $BER=10^{-3}$ で定義する。また、OLT を構成するバースト光受信器は、高感度 APD-TIA、およびバースト対応等価増幅回路 (B-LA: Burst-mode limiting amplifier) から構成される。バースト信号受信時におけるバースト受信器の最小受信感度、およびバースト応答速度は、それぞれ -29.5 dBm および 200 ns である [13]。これらバースト受信器特性は、10G-EPON の標準化で定められている仕様値を満足するものである。図 4-14 より、SGC 光無しの場合におけるシステムロスバジェットは、OLT バースト光受信器の受信感度劣化を招くため 37.0 dB となる。一方、SGC 光有りの場合におけるシステムロスバジェットは、40.3 dB となる。これら測定結果は、ONU の出力パワー、および OLT バースト光受信器の受信感度が、+10.8 dBm および -29.5 dBm であることから、バースト光信号伝送によるロスバジェットの劣化がない事を意味する。以上より、SGC 光を用いたパターン効果抑圧 SOA は、PON システムの広域・多分岐化に向けた、10-Gbit/s 級 PON 向け ONU の高出力化に対しても有効であることを示した。

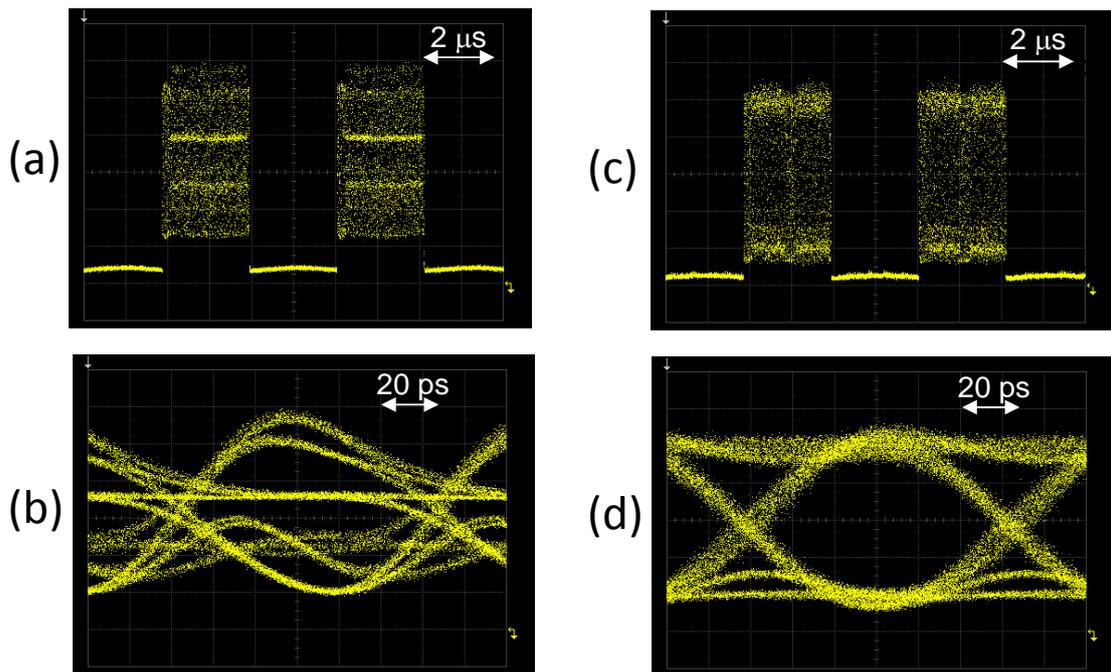


図 4-13 SGC 光無しの場合における(a)バースト波形, (b)アイパターン, および SGC 光有りの場合における(c)バースト波形, (d)アイパターン.

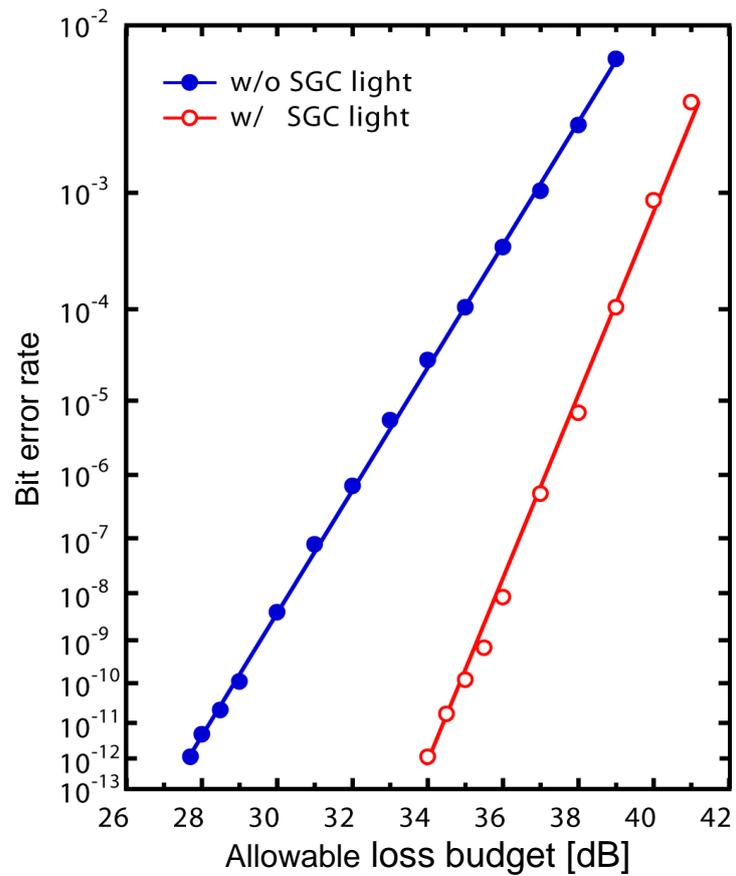


図 4-14 ONU 出力が+10.8 dBm の場合における BER 特性.

4-5 TWDM-PON 向け波長可変バースト光送信器に対する有効性検証

4-5-1 パターン効果抑圧ブースタ SOA を用いた高出力波長選択型 ONU

第 1-1-4 1-1 節で述べたように、10G-EPON システムおよび XG-PON システムの後継システムとして、40 Gbit/s のシステム容量を有する NG-PON2 として、TWDM-PON システムの標準化が、2012 年から ITU-T にて開始された。NG-PON2 においても、更なる広域・多分岐化に対する要求は強く、光増幅器を適用しない構成における伝送距離、および分岐数は、従来から 2 倍の 40 km および 64 分岐と標準化されている [14, 15]。更には、ロスバジェット規格において、光増幅器を OLT に適用した規格 (E1 および E2) が定められた。特に、ONU および OLT の高出力化は、伝送路中に光増幅器を設置する光中継方式で問題となる、光増幅器の設置場所や給電方法といった、保守・運用上の課題を解決できるため、期待が集まっている。このため、TWDM-PON システムにおいても、ONU の高出力化が強く望まれている。このような背景を鑑み、本節ではこれまでに提案した SGC 光を採用したパターン効果抑圧 SOA 技術の適用領域をさらに広げるべく、TWDM-PON 用波長可変 ONU バースト送信器への適用を検討する。

提案する高出力波長可変 ONU バースト送信器を適用する、Cyclic AWG を用いた波長可変型 TWDM-PON システムの構成を図 4-15 に示す。OLT は、送受信波長がそれぞれ異なるバースト対応光トランシーバを備えた 4 台の CT、および DWBA コントローラから構成される [16]。ONU は波長可変バースト対応光トランシーバ(λ -tunable B-TRx)を備え、送信および受信波長を上り信号 ($\lambda_{u1} \sim \lambda_{u4}$)、および下り信号 ($\lambda_{d1} \sim \lambda_{d4}$) の各 4 波長から選択して送受信を行う。Cyclic AWG の入出力特性を図 4-16 に示す。Cyclic AWG は各入力ポートにおいて、入力される信号波長に対して、AWG の周回性を利用して入力信号波長に応じた出力ポートに振り分けて出力する。このため、AWG を局内合分波モジュールとして用いる構成では、Cyclic AWG が光ルーティング素子として動作し、かつ光フィルタとしての役割を果たすため、各 CT に 10G-EPON システムなどで使われている一般的な光バーストトランシーバを搭載することができる。Cyclic AWG は一般的な AWG と同等の 5 dB 程度の挿入損失を有するため、パワースプリッタなどの構成に対して、低い局内合分波損失で対応波長数を拡大することが可能となる。近年では、TWDM-PON システムへの適用を狙い、上り下り信号の異なる波長帯に対して、一心双方向入出力特性が得られる Cyclic AWG も報告されている [17]。本検討においては、上り信号および下り信号に、それぞれ 1300 nm 帯 (O 帯)、および 1580 nm 帯 (L 帯) を使用し、これら波長帯に対応した一心双方向 Cyclic AWG を用いた。また、TWDM-PON システムの信号波長を、1271 nm、1291 nm、1311 nm、1331 nm の CWDM 周波数グリッドに準拠した 4 波長とする。

提案するパターン効果抑圧ブースタ SOA を用いた、高出力波長可変バースト送信器の構成を図 4-17 に示す。高出力波長可変バースト送信器は、LD ドライバを内蔵した DML アレイ光源、SGC 光送信器、LD アレイ出力合波器、3 dB カプラ、ブースタ SOA、

DML アレイ光源波長を選択する 10-Gbit/s 信号対応電気 SW、および制御回路から構成される。DML アレイ光源は、波長切替制御信号、およびバースト制御信号を基に、電気 SW と制御回路によって制御され、ONU が出力すべき信号波長とタイムスロットに上りバースト光信号を出力する。本構成において、波長可変光源として採用している DML アレイ光源は、40GBASE-LR4 で実用化されているデバイスである。

提案する高出力波長可変バースト送信器において、SGC 光は DML アレイから出力される主信号に対して論理反転したビットパターンで変調され、3 dB カプラを介して、信号光と同期した状態でブースタ SOA に入力される。上り信号は波長を変えながら出力されるのに対し、SGC 光は固定波長で出力される。上り信号および SGC 光の関係を図 4-17 挿入図に示す。本構成においても、パターン効果抑圧原理は前節と同じであり、信号光が 0 レベル時に SOA に蓄積されるキャリアを SGC 光によって低減することにより、パターン効果が抑圧できる [18]。さらに、SOA の利得は SGC 光によって、信号光が 1 レベル時には高く、0 レベル時には低く制御されるため、増幅信号の消光比が改善される。高出力波長可変バースト送信器から出力された上り信号、および SGC 光は、伝送区間に出力される。この時、SGC 光は OLT 側に実装される Cyclic AWG によって除去される波長に設定する。本構成で用いたブースタ SOA を駆動電流 300 mA で動作させた場合における、小信号利得および NF は、それぞれ 19.2 dB および 6.4 dB である。また、SOA の利得が飽和しパターン効果が発生する入力信号パワー閾値は -12.5 dBm である。駆動電流 300 mA で SOA を飽和状態で光増幅させた場合における、飽和出力パワーおよび利得ピーク波長は、それぞれ +12.8 dBm および 1300 nm である。

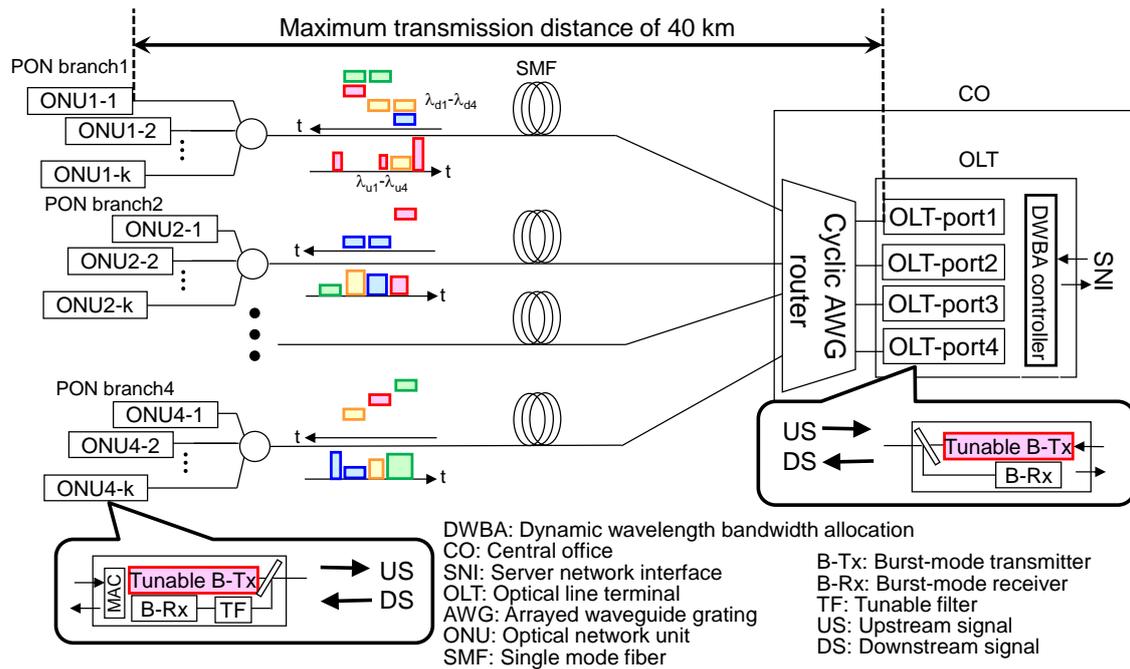


図 4-15 Cyclic AWG を用いた波長可変型 TWDM-PON システムの構成.

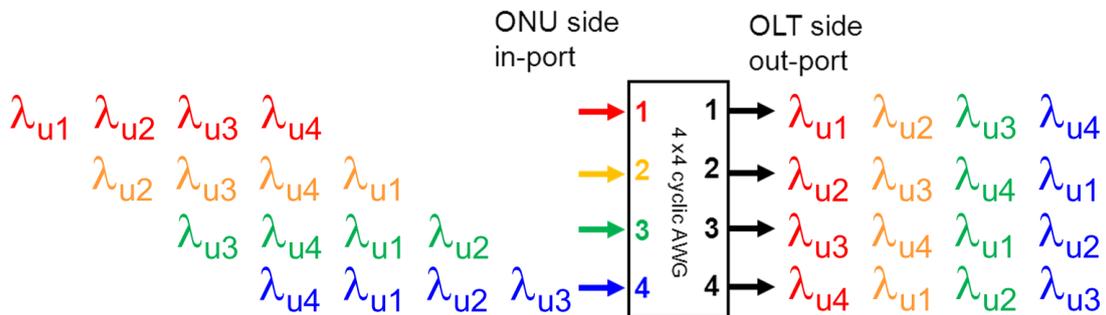


図 4-16 Cyclic AWG の入出力特性.

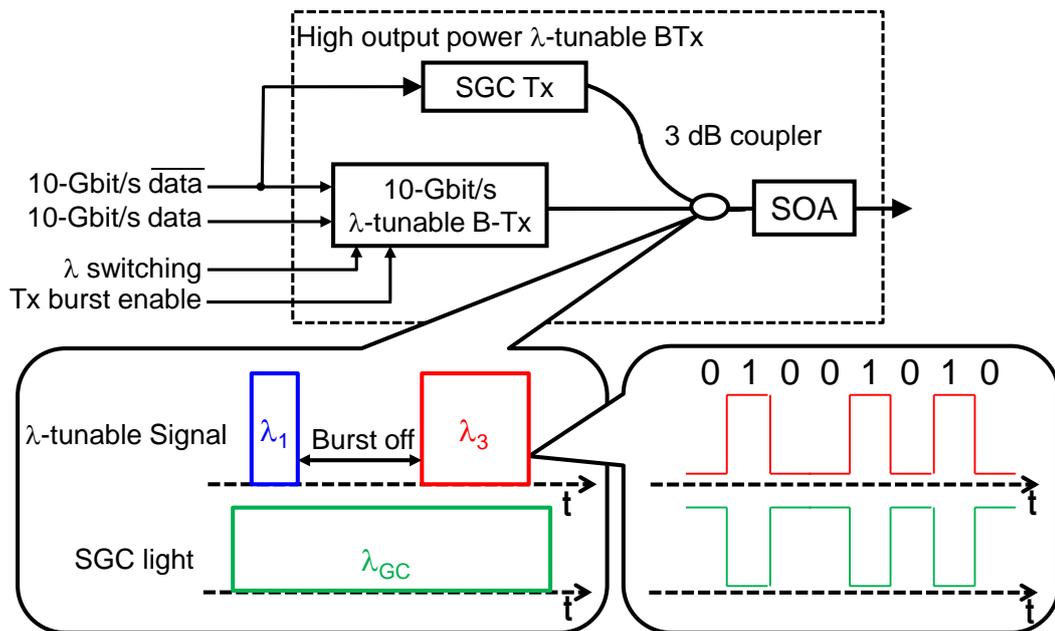


図 4-17 パターン効果抑圧ブースタ SOA を用いた高出力波長選択型 ONU の構成.

4-5-2 パターン効果抑圧効果およびロスバジェット推定

高出力波長可変バースト送信器を ONU へ実装するため、経済的に構成可能な上り信号波長配置を選択する必要がある。このため、本構成に用いる上り 4 波長は CWDM 周波数グリッドに準拠した、1271 nm (λ_{u1})、1291 nm (λ_{u2})、1311 nm (λ_{u3})、1331 nm (λ_{u4})とする。さらに、SGC 光は OLT における上り信号受信特性に影響を与えない波長を選択しなければならない。このため、本節では各上り信号波長に対する、パターン効果抑圧効果の SGC 光波長依存性を明らかにする。各上り信号波長に対して、SGC 光波長を 1260 nm から 1340 nm に変化させた場合における、ブースタ SOA 出力信号の出力パワー、および消光比の測定値を、それぞれ図 4-18 および図 4-19 に示す。なお、入力信号の消光比は 6.2 dB である。出力パワーにおいては、SGC 光波長に依らず +10.0 dBm 以上の高出力化が実現できる。また、上り信号波長が 1311 nm の出力特性が、他の上り信号波長よりも高出力化されているのは、ブースタ SOA の利得ピークが 1300 nm に存在するためである。さらに、消光比においては、SGC 光波長が 1290 nm から 1320 nm の条件において、SOA 入力信号よりもブースタ SOA 増幅信号の特性が改善する。これは、ブースタ SOA の利得ピークが 1300 nm であるため、SGC 光によるブースタ SOA 内部のキャリア制御が効率的に働き、強いパターン効果抑圧効果が得られたからと考えられる。以上より、出力パワーおよび消光比特性を総合的に判断し、かつ Cyclic AWG のフィルタエッジによって SGC 光を除去できる波長の条件で、SGC 波長を決定すると、1302 nm が SGC 光波長として選ばれる。

ここで、式(3-2)を用いて、高出力波長可変バースト送信器から出力される上り信号の OMA、および OLT に用いるバースト受信器の最小受信感度を用いて、ロスバジェットを推定する。受信信号の消光比を 6.3 dB とした場合において、BER 特性が 10^{-3} におけるバースト受信器の最小受信感度は -30.0 dBm である。式 (3-2)を用いて導出した、各上り信号波長のロスバジェット推定値を図 4-20 に示す。各波長によって推定値にばらつきがあるものの、ロスバジェットを全波長の最小値で定義すると、パターン効果抑圧ブースタ SOA を備えた高出力波長可変バースト送信器を用いた TWDM-PON システムのロスバジェットは、41.1 dB と推定できる。

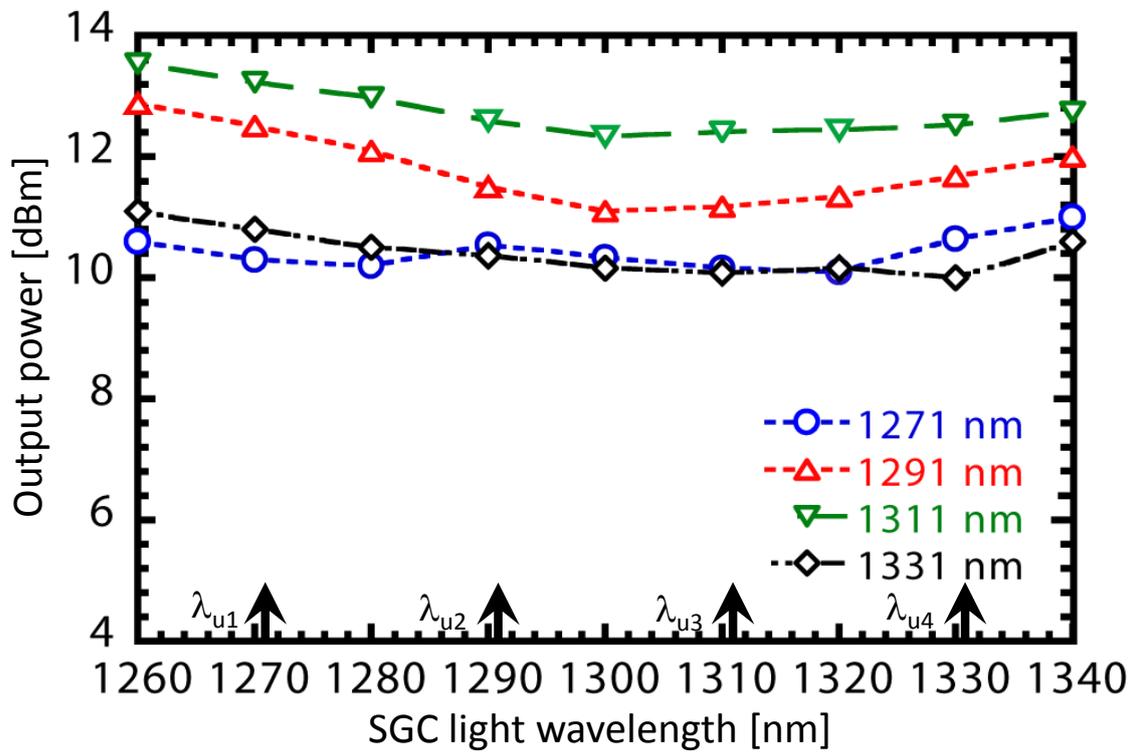


図 4-18 ONU 出力パワーの SGC 波長依存性.

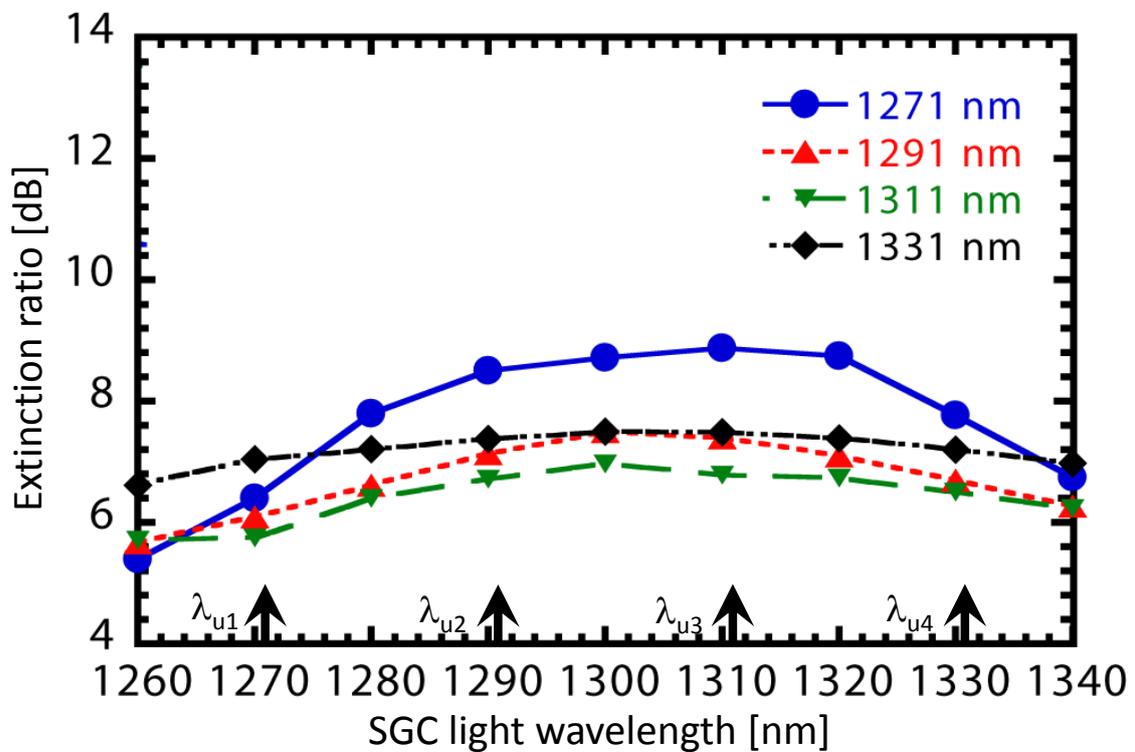


図 4-19 ONU 消光比の SGC 波長依存性.

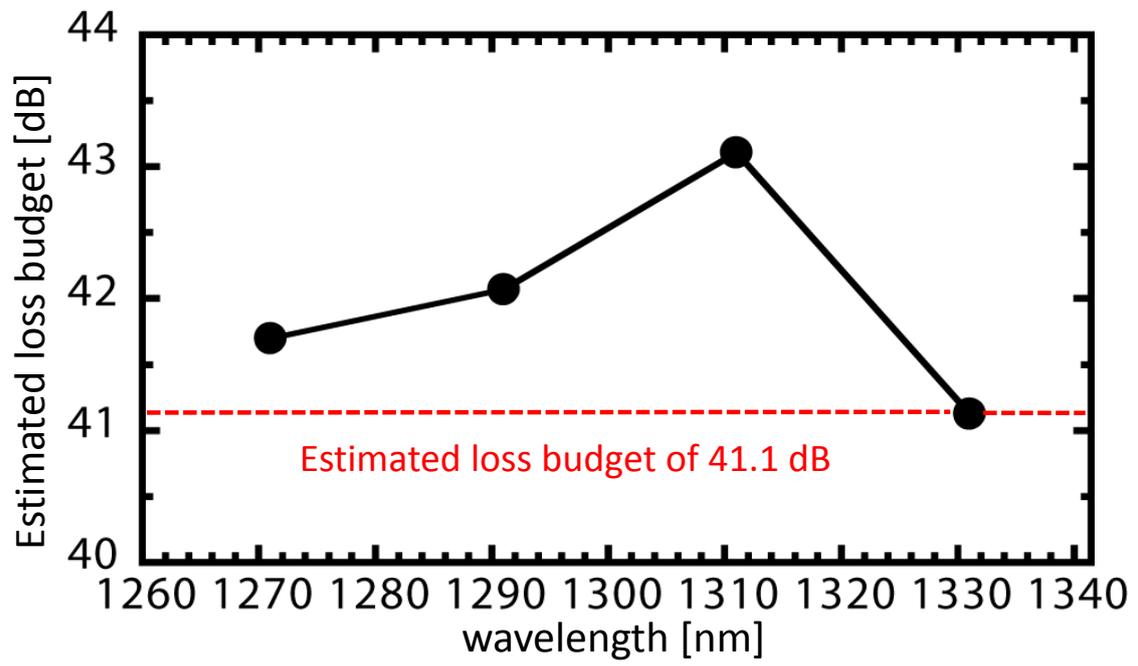


図 4-20 各上り波長におけるロスバジェットの推定値.

4-5-3 40-Gbit/s 級 TWDM-PON 上り伝送評価

提案した高出力波長可変バースト送信器によるロスバジェット拡大効果を評価するため、これらを ONU に用いた 40-Gbit/s 級 TWDM-PON システムの上り伝送特性評価を行った。伝送評価系を図 4-21 に示す。伝送評価系は、高出力波長可変バースト送信器を備えた ONU、4x4 ポート対応 Cyclic AWG、各 PON ブランチに配置された光パワースプリッタ、40-km シングルモード光ファイバ、およびバースト受信器を備える OLT から構成される。上り信号の送信波長、およびバーストフレームパターンは、BER 測定器から出力される波長制御信号、およびバースト状態制御信号を ONU に入力して制御する。ONU 2-1 を干渉光用の強バースト信号源とし、OLT バースト受信器に入力される光パワーを、受信器の最大入力パワーである -6 dBm に設定した。一方、ONU 1-1 は測定用の弱バースト信号源とし、各上り信号波長に対して、OLT バースト受信器に入力される上り光信号パワーを変化させながら、BER 特性を評価した。上りバースト信号フレームパターンのプリアンプル、ペイロード、およびエンドオブバーストは、それぞれ 397 ns、1589 ns、および 99 ns とした。また、ペイロードは 10.3125 Gbit/s (PRBS31 段) のビットレートで変調される。測定に用いた OLT 用バースト受信器のバースト応答速度は 200 ns である。また、ONU においては、SGC 光によってパターン効果が抑圧でき、かつ +9.0 dBm 以上の高出力化が図れるように、SOA の駆動電流、SGC 光波長、および SGC 光パワーを、それぞれ 300 mA、1302 nm、および -3.0 dBm に設定した。

上り信号波長を 1271 nm に設定した場合における、ブースタ SOA 入力信号、高出力波長可変バースト送信器出力信号において SGC 光無し、および有りとした場合のアイパターンを図 4-22 に示す。SGC 光無しとした図 4-22 (b) は、入力信号アイパターンである図 4-22 (a) と比較して、パターン効果による波形歪みが発生し、アイパターンが著しく劣化する。特に、波形の立ち上がり、および立ち下りのポイントにおいて、SOA 内部のキャリア変動によるオーバーシュート、およびダウンシュートが確認できる。一方、波長を 1302 nm に設定した SGC 光を入力した図 4-22 (c) においては、パターン効果を抑圧した、綺麗なアイパターンが得られる。図 4-22 (a)、(b)、および (c) の各アイパターンにおける消光比は、それぞれ 6.2 dB、3.2 dB、および 8.2 dB である。SGC 光による光信号再生効果により、入力信号に対して増幅信号の消光比が 2.0 dB 改善した。

続いて、高出力波長可変バースト送信器から出力される、上りバースト信号の 40 km 伝送特性評価を行った。BER 測定器から出力される波長制御信号を用いて、上り信号波長が 1271 nm および 1331 nm における上りバースト信号 40 km 伝送時の BER 特性を、図 4-23、および図 4-24 に示す。本測定において、ONU 1-1 から出力される測定信号 (弱バースト信号)、および ONU 2-1 から出力される干渉信号 (強バースト信号) は、それぞれ波長を切り替えながら Cyclic AWG の各ポートに出力される信号の BER 測定を行った。なお、Cyclic AWG の各ポートから出力される干渉光パワーは、図 4-21

の挿入図のように-6.0 dBm に設定した。また、TWDM-PON システムでは、FEC の適用が前提となるため、エラーフリーを $BER=10^{-3}$ で定義する。図 4-23、および図 4-24 より、上り信号波長が 1271 nm および 1331 nm における、B・B の最小受信感度は-29.5 dBm である。SGC 光無しの構成では、40 km 上りバースト光伝送時における、上り信号波長 1271 nm、および 1331 nm の条件において、パターン効果による波形歪みに起因する 5.3 dB、および 1.8 dB のパワーペナルティが確認された。上り信号波長の 1271 nm におけるパワーペナルティが、長波長側の上り信号のパワーペナルティよりも大きいのは、SOA の利得ピークの短波長側に信号波長が位置することにより、パターン効果が発生しやすくなっているためである。一方、SGC 光有りの構成においては、上り信号波長 1271 nm、および 1331 nm における、最小受信感度はそれぞれ、-30.5 dBm、および-29.8 dBm となる。また、SGC 光によるパターン効果抑圧効果および光信号再生効果により、SGC 光無しの場合と比較して、上り信号波長が 1271 nm および 1331 nm における最小受信感度が、それぞれ 6.3 dB および 2.1 dB 改善する。上り信号全 4 波長における、40 km バースト光伝送時の BER 特性を図 4-25 に示す。全上り信号波長において、40 km 伝送時の最小受信感度が-29.8 dBm を満たし、一般的な 10G 級バースト信号の最小受信感度規定である-28.0 dBm を満足する。

各上り信号波長における、各構成のロスバジェット特性を図 4-26 に示す。ブースタ SOA を用いない構成では、波長可変バースト光送信器の出力、およびバースト光受信器の最小受信感度が、それぞれ-0.5 dBm、および-29.8 dB であることから、ロスバジェットが 30.3 dB となる。また、最も短波長側の λ_{u1} において、SOA の利得ピークに対して短波長側の信号を増幅することになるため、パターン効果が激しく発生する。このため、ロスバジェットの最小値は 36.0 dB となる。信号波長が長波長側になるにつれ、パターン効果が緩和されるため、ロスバジェット特性は改善する傾向が確認できる。一方、SGC 光を用いた構成では、上り信号波長に依らず、効率的にパターン効果が抑圧されるため、全ての波長において 40 dB 以上のロスバジェット特性を得る。OMA と最小受信感度から導いた、ロスバジェットの推定値と、測定値は良く一致し、これらはパターン効果が抑圧されていることを意味する。また、上り信号波長が λ_{u3} の場合は、SOA の利得ピーク波長の近傍であるため、出力パワーの高出力化が図れ、ロスバジェット特性が最も改善した。以上より、SGC 光を用いたブースタ SOA を波長可変バースト光送信器に採用することにより、ブースタ SOA を用いない場合と比較してロスバジェット特性を 10.1 dB 改善することに成功した。

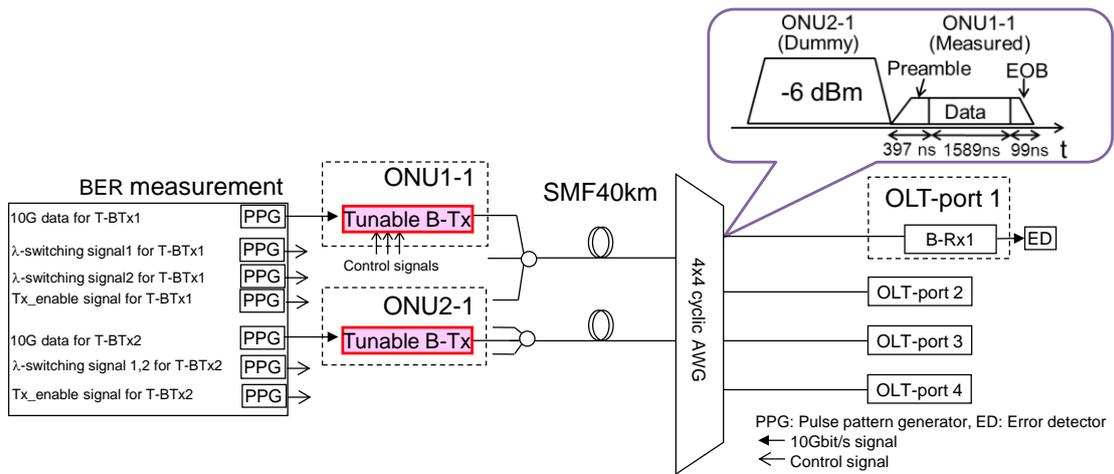


図 4-21 40-Gbit/s 級 TWDM-PON システムの上り伝送特性評価。

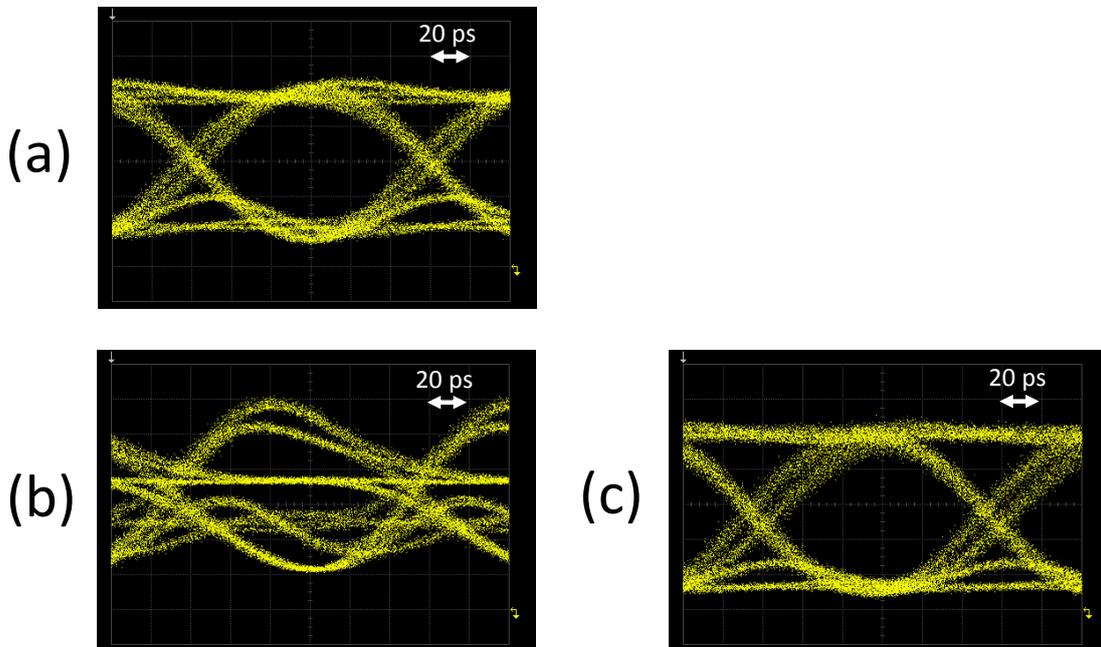


図 4-22 上り信号波長 1271 nm におけるアイパターン, (a) ブースタ SOA 入力信号, 高出波長可変パースト送信器出力信号における (b) SGC 光無しの場合, および (c) SGC 光ありの場合。

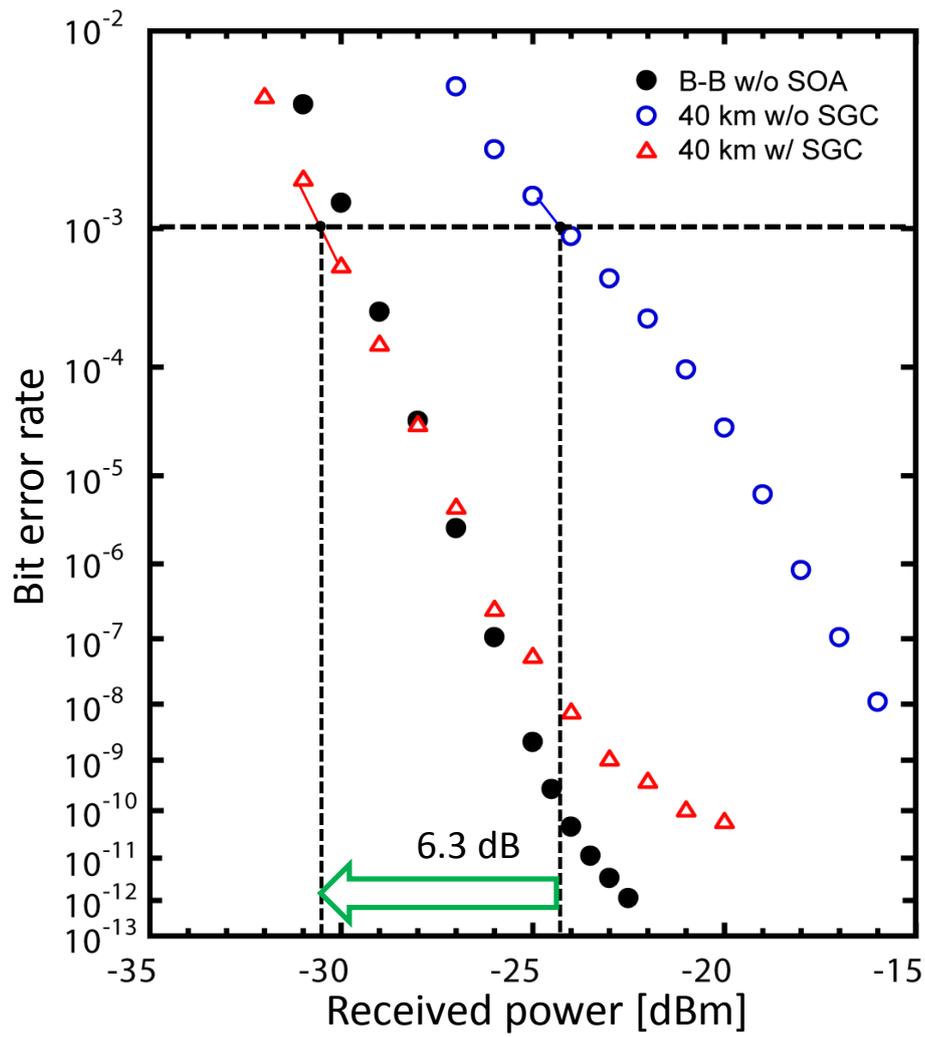


図 4-23 上り信号波長が 1271 nm におけるバースト信号の BER 特性.

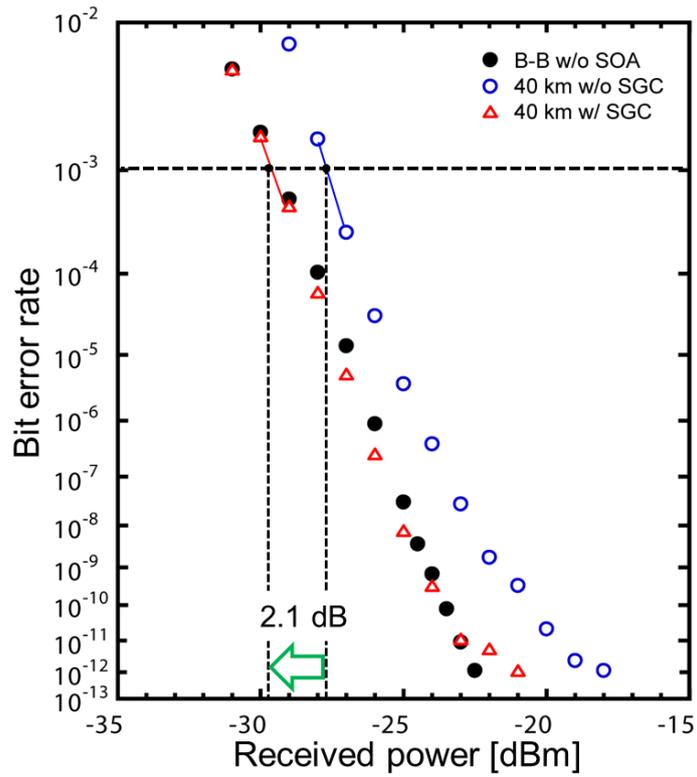


図 4-24 上り信号波長が 1331 nm におけるバースト信号の BER 特性.

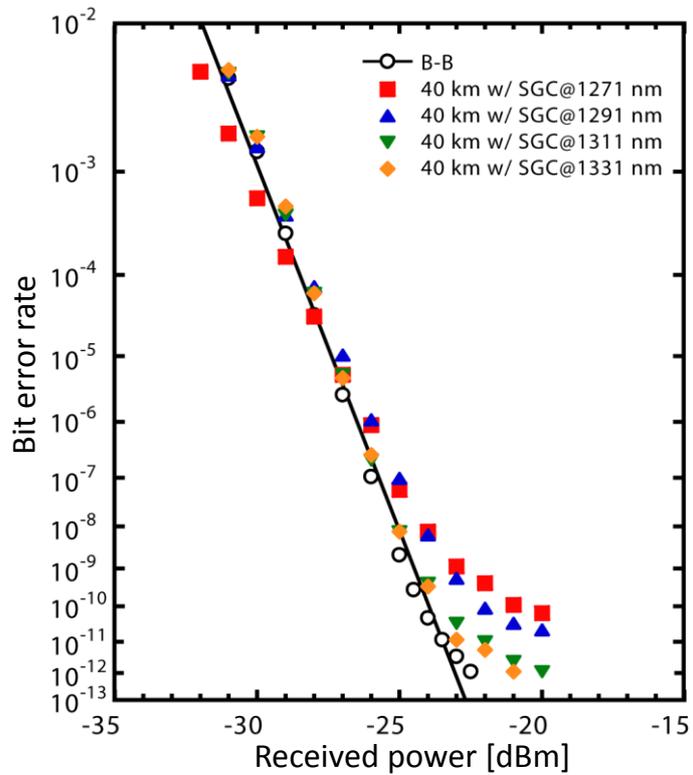


図 4-25 全上り波長の 40 km バースト光伝送特性.

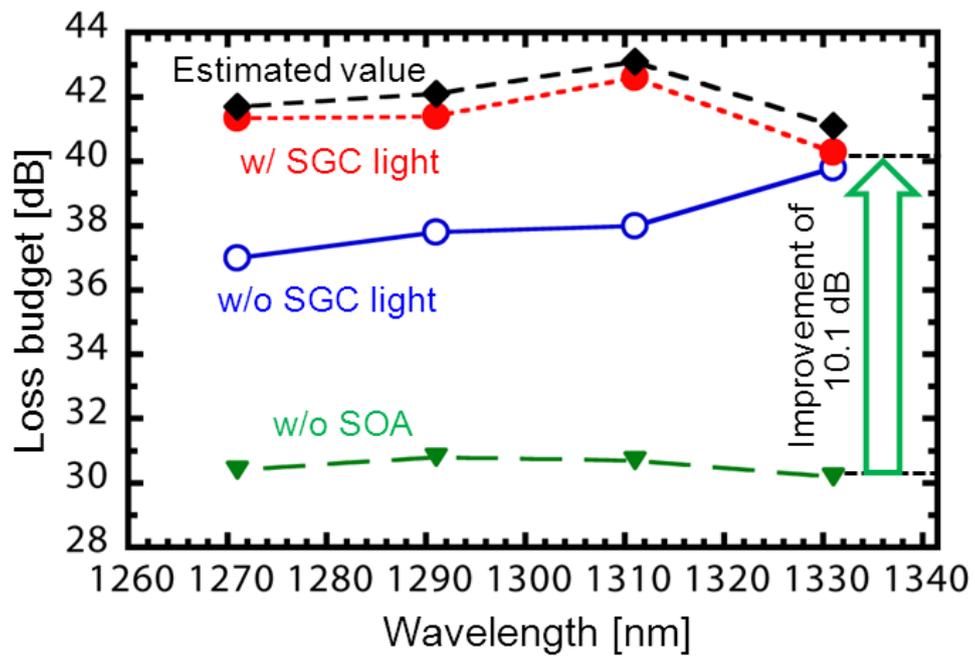


図 4-26 各上り信号波長におけるロスバジェット特性.

4-6 まとめ

本章では、SOA を適用した光増幅 PON システムにおいて、Surge 限界によって制限される、下り方向のシステム動作領域の拡大に向けて、O/E/O 変換器から生成される SGC 光を用いた、SOA のパターン効果抑圧技術を提案した。中継増幅構成の光増幅 GE-PON システム下り信号増幅においては、伝送路中に設置される下り信号用 SOA に SGC 光生成部を備えたパターン効果抑圧構成を具備することにより、強い光パワー入力の下り信号に対して、パターン効果による波形歪みを劇的に改善できることを示した。パターン効果抑圧 SOA を中継光増幅 GE-PON システムに適用することで、アクセス区間のロスバジェットを 40 dB 確保しつつ、トランク区間の伝送距離を 51.8 dB まで拡大可能であることを明らかにした。また、10-Gbit/s 級 TDM-PON 用 ONU の高出力化に向けたブースタ SOA への適用においては、10 Gbit/s 信号においても良好なパターン効果抑圧特性が得られることを明らかにし、中継光増幅なしでシステムロスバジェットを 40 dB まで拡大できることを実験により示した。さらに Cyclic AWG を用いた TWDM-PON 用 ONU の高出力化に向けたブースタ SOA への適用においては、CWDM 周波数グリッドに準拠した 60 nm にわたる上り信号波長範囲 (4 波長分)においても、良好なパターン効果抑圧特性が得られることを明らかにし、TWDM-PON システムの上り方向ロスバジェットを中継光増幅器なしで 40 dB 以上に拡大できることを示した。

参考文献

- [1] K. Taguchi, M. Fujiwara, T. Imai, K.-I. Suzuki, H. Ishii, N. Yoshimoto, and H. Hadama, "Applicable area estimation of bidirectional optical amplifiers to 10-Gb/s class long-reach PON systems," in *Proc. COIN'2010*, MoA1-3, 2010.
- [2] J. C. Simon, P. Doussiere, P. Lamouler, I. Valiente, and F. Riou, "Travelling wave semiconductor optical amplifier with reduced nonlinear distortions," *IET Electron. Lett.*, vol. 30, no. 1, pp. 49-50, 1994.
- [3] C. Michie, A. E. Kelly, I. Armstrong, I. Andonovic, and C. Tombling, "An adjustable gain-clamped semiconductor optical amplifier (AGC-SOA)," *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 25, no. 6, pp. 1466-1473, 2007.
- [4] H. Wessing, B. Sorensen, B. Lavigne, E. Balmeffre, and O. Leclerc, "Combining control electronics with SOA to equalize packet-to-packet power variation for optical 3R regeneration in optical networks at 10 Gbit/s," in *Proc. OFC'2004*, WD2, 2004.
- [5] R. Sato, T. Ito, Y. Shibata, A. Ohki, and Y. Akatsu, "40-Gb/s burst-mode optical 2R regenerator," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, no. 10, pp. 2194-2196, 2005.
- [6] G. Contestabile, R. Proietti, N. Calabretta, and E. Ciaramella, "Cross-gain compression in semiconductor optical amplifiers," *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 25, no. 3, pp. 915-921, 2007.
- [7] S. V. Pato, R. Meleiro, D. Fonseca, P. Andre, P. Monteiro, and H. Silva, "All-optical burst-mode power equalizer based on cascaded SOAs for 10-G/s EPON," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 20, no. 24, pp. 2078-2080, 2008.
- [8] K. Taguchi, M. Fujiwara, T. Imai, K.-I. Suzuki, H. Ishii, and N. Yoshimoto, "Optically-amplified PON system using XGM-based ALC technique," *IEICE Electron. Express*, vol. 8, no. 21, pp. 1836-1841, 2011.
- [9] IEEE Std 802.3 ah, "Part 3: Carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications,"
- [10] H. Shinohara, "Broadband access in Japan: Rapidly growing FTTH market," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 43, no. 9, pp. 72-78, 2005.
- [11] C. Arnaud, T. Adler, L. Julie, B. Joseph, T. Andreas, P. Taesang, and K. Saito, "Common technical specification of the G-PON system among major worldwide access carriers," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 44, no. 10, pp. 34-40, 2006.
- [12] K. Tanaka, A. Agata, and Y. Horiuchi, "IEEE 802.3av 10G-EPON standardization and its research and development status," *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 28, no. 4, pp. 651-661, 2010.
- [13] K. Hara, S. Kimura, H. Nakamura, N. Yoshimoto, and H. Hadama, "New AC-

coupled burst-mode optical receiver using transient-phenomena cancellation techniques for 10 Gbit/s-class high-speed TDM-PON systems,” *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 18, no. 19, pp. 2775-2782, 2010.

- [14] ITU-T recommendation G.989 series.
- [15] D. Nasset, “NG-PON2 technology and standards,” *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 33, no. 5, pp. 1136-1143, 2015.
- [16] H. Nakamura, K. Taguchi, S. Tamaki, T. Mizuno, Y. Hashizume, T. Yamada, M. Itoh, H. Takahashi, S. Kimura, N. Yoshimoto, “40 Gbit/s-class λ -tunable WDM/TDM-PON using tunable-B-Tx and cyclic AWG router for flexible photonic aggregation networks,” in *Proc. ECOC’2012*, Tu.4.B.3, Amsterdam, Netherlands, Sep. 2012.
- [17] T. Mizuno, Y. Hashizume, T. Yamada, S. Tamaki, H. Nakamura, S. Kimura, M. Ito, and H. Takahashi, “Integrated 1.3/1.5 μm cyclic AWG router for λ -tunable WDM/TDM-PON,” *OSA Opt. Express.*, vol. 20, no. 26, pp. B1-B-6, 2012.
- [18] K. Taguchi, M. Fujiwara, T. Imai, K.-I. Suzuki, H. Ishii, and N. Yoshimoto, “Pattern effect suppression by injecting directly modulated synchronized gain-clamping light using inverted signal for PON application of SOA,” *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 32, no. 8, pp. 1616-1623, 2014.

第5章 ONU 高性能化に向けた SOA バースト制御技術

5-1 波長可変バースト光送信器の高性能化

これまでに、PON システムの更なる経済化を狙い、ロスバジェット改善効果に優れた光増幅 PON 中継器を用いた、広域・多分岐化技術が検討されてきた [1-4]。これら光増幅 PON 中継器によるロスバジェット拡大手法は、光増幅器の用途に応じて、光ファイバ伝送路中に設置する中継光増幅、受信器前段に設置する前置光増幅、送信器出力に設置するブースタ光増幅に分類され、それぞれ活発に研究開発されている。中継光増幅構成は最も効率的にロスバジェットを拡大することができる一方、屋外に敷設された光ファイバ伝送路中に光増幅 PON 中継器を設置する必要があるため、電源供給、耐環境性、および遠隔監視といった、保守・運用面での課題を解決しなければならない [5]。また、前置光増幅構成は、SOA を OLT のバースト光受信器に適用することによるコスト上昇を収容ユーザ数で共有できるため、PON システムへのコストインパクトを最小限に抑えることができる。一方、光増幅器としての特性面に着目すると、SOA 自体の PDG や NF の影響により、受信感度改善効果が制限されるため、他の方式と比較してロスバジェット拡大効果が十分得られない。ブースタ光増幅構成は、光増幅器を送信器出力に設置することで、+10.0 dBm 以上の高出力化が可能となる。特に、SOA は半導体レーザとの集積が可能であるため、偏波に起因する PDG など諸特性の課題を解決でき、上記 2 方式と比較して、最も簡易な構成でロスバジェットを拡大できる。このため、PON システムの広域・多分岐化に向けて、OLT および ONU に搭載される、光トランシーバの高出力化に対する要求が高まっている。第 4 章では、光トランシーバにブースタ SOA を適用した場合に問題となる、パターン効果による波形歪み抑圧を目的とし、SGC 光を用いたパターン効果抑圧ブースタ SOA を提案し、これらを用いた高出力バースト光送信器の特性評価を行った [6, 7]。しかし、SGC 光によるパターン効果抑圧手法は、信号光波長とは異なる SGC 光用の光源を別途用意する必要があり、PON システムへの適用を考えた場合、構成面およびコスト面が課題となる。

一方、次世代光アクセスシステムとして標準化が完了した TWDM-PON システムにおいては、従来の GE-PON システムや 10G-EPON システムなどと比較して、抜本的な経済化を実現すべく、大幅な収容 ONU 数 (分岐数) の拡大が検討されている [8, 9]。このような PON システムの多分岐化においては、OLT に接続される ONU が数倍に増えることにより、発光状態の 1 台の ONU が送信するバースト光信号に対して、消光状態の ONU が放出するバーストオフレベル光パワーが、クロストーク成分として上りバースト光信号に重畳される。これらバーストオフレベルのクロストーク成分は、OLT のバースト光受信器におけるパワーペナルティ要因となり、最小受信感度の劣化を招く恐れがある [10]。

以上より、TWDM-PON システムにおいて従来の PON システムから、さらなる分岐

数拡大を実現するには、ONUに搭載する波長可変バースト光送信器に対して、高出力および低バーストオフレベル特性が要求される。本章では、波長可変バースト光送信器の高出力化に向けて、簡易構成でパターン効果による波形歪みを緩和する手法として、SOA 利得ピークの離調設計技術を提案し、パターン効果緩和効果を明らかにする。また、バーストオフレベル低減手法として、駆動電流制御方式、および逆バイアス電圧制御方式による、ブースタ SOA のバースト制御技術を提案し、上りバースト信号伝送時のクロストークペナルティ抑圧効果を明らかにする。

5-2 高出力、および低バーストオフレベル化対応技術

5-2-1 パターン効果緩和に向けた利得ピーク離調設計技術

一般的な SOA のキャリア回復時間は数 10~100 ps である。このため、1 ビット長が数 100 ps 程度である Gbit/s 級 NRZ (Non-return-zero) 信号を、SOA の飽和領域で光増幅した場合、キャリア応答時間に起因するパターン効果と呼ばれる波形のオーバーシュート、およびダウンシュートが、それぞれ波形の立ち上がり、および立ち下がりに現れる。これら、パターン効果による光信号波形の歪みは、1 ビット毎に発生する。波形歪みは送信信号波形の劣化を意味するため、受信器においてパワーペナルティによる受信感度劣化を招く。SOA をはじめとした光増幅器は、利得ピーク波長に対して長波長側に位置する信号光を増幅する場合、信号光の増幅によって光増幅器内のエネルギー (SOA の場合はキャリア) が減少し、光増幅器の利得スペクトルが長波長側に遷移するため、利得の線形増幅特性や雑音指数などの増幅特性が改善することが知られている [11, 12]。特に、飽和増幅時においては、利得スペクトルの長波長側への遷移が顕著に現れるため、SOA の利得ピーク波長に対して長波長側に位置する信号光に対する飽和増幅特性が大幅に改善し、結果としてパターン効果による波形歪みが緩和される [13, 14]。SOA の利得ピーク波長に対して、条件の異なる光信号波長の非飽和増幅時、および飽和増幅時の利得スペクトル変化、および増幅器特性を図 5-1 に示す。これら信号光波長と SOA の利得ピークの離調設計を最適化することにより、パターン効果による波形歪みの緩和が期待できる。

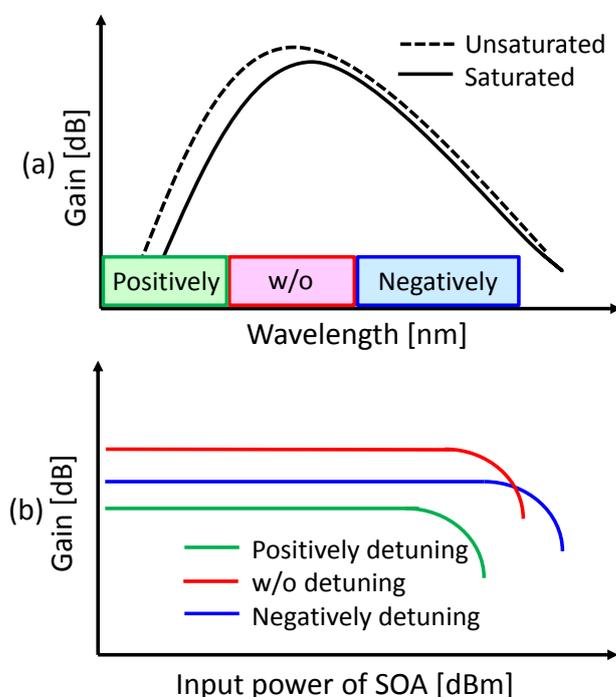


図 5-1 SOA 利得ピークに対する増幅信号波長の離調によるパターン効果緩和, (a)飽和および非飽和増幅時における SOA の利得変動, (b)各信号波長増幅に対する利得特性。

5-2-2 バーストオフレベル低減に向けたバースト制御技術

前節で述べた、信号光波長に対して利得ピークの離調設計を行ったブースタ SOA を実装した、TWDM-PON システム向け ONU 用波長可変光バースト送信器について述べる。ブースタ SOA のバースト制御によるバーストオフレベル低減手法として、駆動電流制御方式、および逆バイアス電圧制御方式を提案する [15, 16]。これら機構を備えたブースタ SOA を実装した、波長可変光バースト送信器の構成を、図 5-2 (a)、および図 5-3 (a)に示す。両構成において、連続信号光を出力する波長可変送信器、バースト制御ブースタ SOA、および制御部は共通デバイスとし、バースト制御ブースタ SOA のバースト状態を決定する制御電子回路が異なる。波長可変バースト光送信器の出力波長は波長選択信号によって決定され、C 帯 200-GHz 周波数グリッド、1530.33 (λ_{u1})、1531.90 (λ_{u2})、1533.47 (λ_{u3})、1535.04 (λ_{u4}) nm に準拠した連続信号を出力する [17]。また、各上り信号波長における波長可変送信器の出力、および消光比は、それぞれ-0.5 dBm、および 9.1 dB である。さらに、ブースタ SOA の駆動電流は 300 mA とした。

図 5-2 (a)に示す、駆動電流制御方式では、SOA は駆動電流制御回路によって、バースト制御される。駆動電流制御回路には、数 100 mA 程度の SOA 駆動電流に対応可能なスイッチとして、商用のトランジスタを適用した。バースト状態における印加電圧方向、SOA 動作状態、および駆動電流状態の関係を、図 5-2 (b)に示す。本構成では、上りバースト信号を波長可変連続信号送信器出力に配置された、ブースタ SOA の駆動電流をバースト制御信号に応じて駆動、または遮断することで、上りバースト光信号を生成する [16]。SOA はバーストオン時にブースタ光増幅器として作用し、出力の高出力化に寄与する。一方、バーストオフ時には駆動電流を遮断することで、入力される光信号に対して SOA が損失媒体として作用し、バーストオフレベルパワーの低減、すなわち高バースト消光比化を実現する。これら、駆動電流制御方式によるバースト制御ブースタ SOA を用いることにより、ONU 用波長可変バースト光送信器の高出力化、および低バーストオフレベル化が実現できる。

第 2 章で述べた様に、バーストオフレベルに起因するクロストークペナルティを 0.1 dB 以下に抑圧し、抜本的な多分岐化を実現するには、256 分岐において-63.2 dBm 以下を満足する、非常に厳しいバーストオフレベル特性が求められる。駆動電流制御方式に対して、更なるバーストオフレベル特性の改善が期待できる、逆バイアス電圧制御方式の構成を、図 5-3 (a)に示す。本構成においても、上りバースト信号はバースト制御信号によって制御され、SOA の駆動電流/バイアス電圧をバーストフレーム毎に駆動/順方向、または遮断/逆方向と制御することにより、生成される。ブースタ SOA は、バーストオン時にはブースタ光増幅器として作用し、高出力化に寄与する。一方、バーストオフ時には、逆バイアス電圧制御を行うことで光受信器として作用し、光吸収効果によるバーストオフレベル改善効果を得る。これら、逆バイアス電圧制御方式により、駆動電流制御方式から、さらなるバーストオフレベル特性の改善が実現できる。

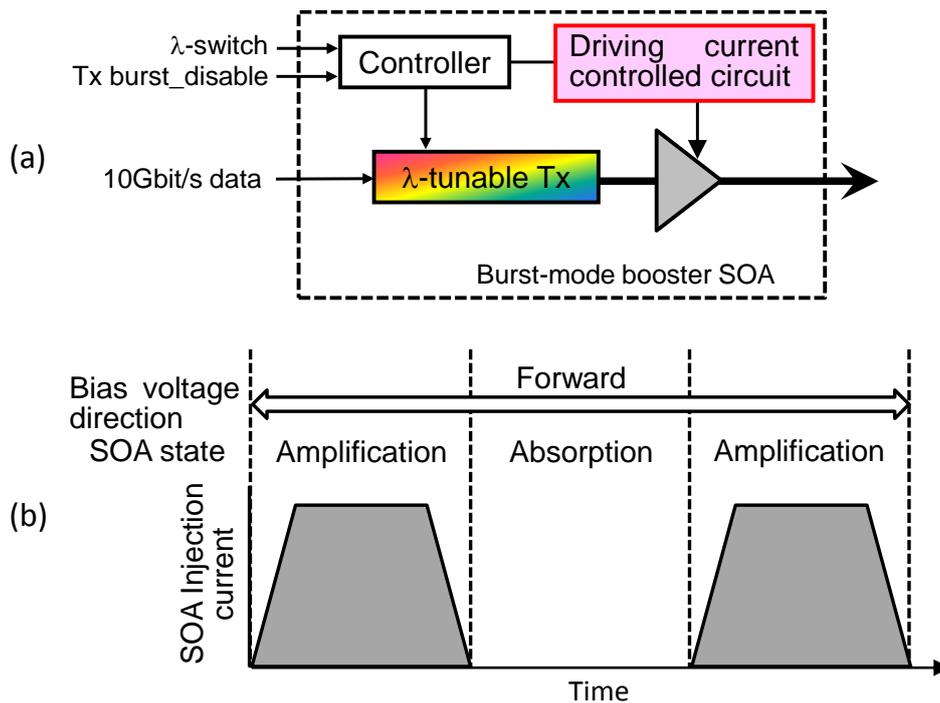


図 5-2 (a)駆動電流制御型バースト制御ブースタ SOA を備えた波長可変バースト光送信器の構成, (b)およびバイアス電圧および駆動電流の関係.

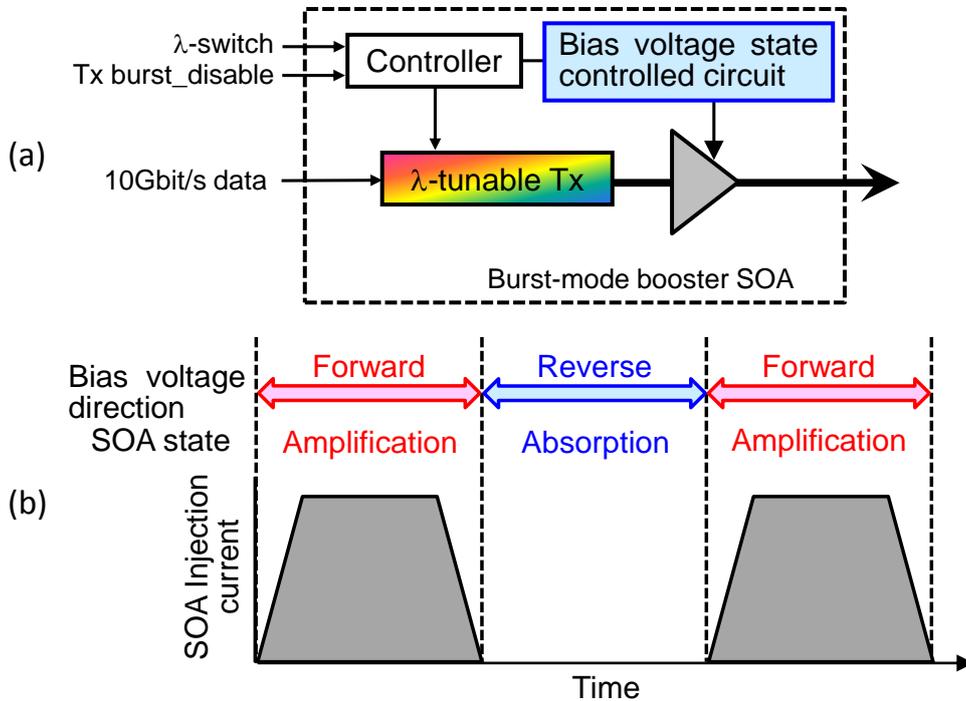


図 5-3 (a)逆バイアス電圧制御型バースト制御ブースタ SOA を備えた波長可変バースト光送信器の構成, および(b)バイアス電圧および駆動電流の関係.

5-3 駆動電流制御ブースタ SOA を用いた波長可変バースト光送信器

5-3-1 パターン効果緩和効果、および出力特性

利得ピークが、TWDM-PON システムの上り信号波長 (1530 nm 付近) に対して異なる、3 種類のブースタ SOA を適用した、波長可変バースト光送信器のパターン効果緩和効果について、評価を行う。ここで、SOA の利得ピーク波長を、光信号を増幅していない非飽和動作状態における SOA の利得ピーク波長と定義する。上り信号波長と、3 種類の SOA が有する利得ピークの関係性を、図 5-4 に示す。ここで、上り信号波長に対して SOA の利得ピークを、短波長側、および長波長側に離調したものを、それぞれ *Negatively detuning*、および *Positively detuning* と定義する。パターン効果緩和効果の比較に用いた 3 種類の SOA として、利得ピークが上り信号波長に対して、短波側に -65 nm 離調 (*Negatively detuning*)、長波長側に +35 nm 離調 (*Positively detuning*)、および離調しないタイプを用いた。このため、*Negatively detuning* および *Positively detuning* タイプの SOA が有する利得ピーク波長は、それぞれ 1480 nm、および 1570 nm である。また、離調しないタイプの SOA が有する利得ピーク波長は、図 5-4 より 1550 nm であり、1530 nm 付近の上り信号波長に対して、+20 nm の波長差を有する。しかし、1530 nm および 1550 nm における、SOA の利得差が 1 dB 以内に抑えられていることから、離調なしタイプとして評価する。

利得ピークの離調によるパターン効果緩和効果を評価するため、増幅信号のアイパターンを測定した。上り信号波長が 1535.04 (λ_{u4}) nm に対して、*Negatively detuning*、離調なし、および *Positively detuning* タイプのブースタ SOA を適用した場合における、増幅信号のアイパターンを、それぞれ図 5-5 (a)、(b)、および(c)に示す。ブースタ SOA に入力する波長可変光送信器の出力パワー、および消光比は、それぞれ -0.5 dBm、および 9.1 dB である。離調なし、および *Positively detuning* タイプのアイパターンは、*Negatively detuning* タイプのアイパターンと比較して、パターン効果による波形歪みにより、著しく波形が劣化する。*Negatively detuning*、離調なし、および *Positively detuning* タイプの消光比は、それぞれ 8.5 dB、6.8 dB、および 6.6 dB となる。よって、*Negatively detuning* タイプの SOA は、利得ピークに対して 65 nm 長波長側に位置する上り信号光を増幅することで、SOA 自体の飽和増幅特性が向上し、パターン効果が緩和される。ブースタ SOA の入力信号、および *Negatively detuning* タイプ SOA の増幅信号間における消光比劣化は 0.6 dB であり、利得ピークの離調設計によりパターン効果は十分に緩和される。なお、*Negatively detuning*、離調なし、*Positively detuning* の SOA の駆動電流は最大仕様値とし、それぞれ 300 mA、400 mA、および 300 mA である。

続いて、*Negatively detuning* タイプの駆動電流制御ブースタ SOA を備えた、波長可変バースト光送信器のバースト駆動特性を評価する。上り信号波長が 1535.04 (λ_{u4}) nm における、上りバースト信号出力波形を図 5-6 に示す。なお、バーストフレーム長、

およびバーストデューティ比を、それぞれ $20.0 \mu\text{s}$ 、および 50% とした。本構成では、バーストオン時に SOA に入力された上り信号は、 300 mA の駆動電流によって SOA で増幅される。一方、バーストオフ時に SOA に入力された上り信号は、SOA の駆動電流が 0 mA に遮断されるため、SOA 自体が損失媒体として働くことにより、減衰する。よって、図 5-6 より、バーストオン、およびバーストオフ状態における上りバースト信号光パワーは、それぞれ $+10.0 \text{ dBm}$ 、および -56.0 dBm を達成した。駆動電流制御ブースタ SOA によって、 66.0 dB のバースト消光比特性を有する、波長可変バースト光送信器が実現可能である。また、**Negatively detuning** のブースタ SOA は、 210 mA 以上の駆動電流において $+10.0 \text{ dBm}$ 以上の出力が得られるが、SOA 自体の PDG による出力パワーの変動なども考慮し、以降の検討においては最大定格駆動電流である 300 mA の条件で評価を行う。これら、上りバースト信号のバースト立ち上がり、および立下り波形を図 5-7 に示す。出力信号のバースト立ち上がり、および立下り時間は、 100 ns 、および 40 ns を達成した。ブースタ SOA のバースト応答特性は、バースト状態を制御する駆動電流制御回路に採用するトランジスタの性能に依存する。

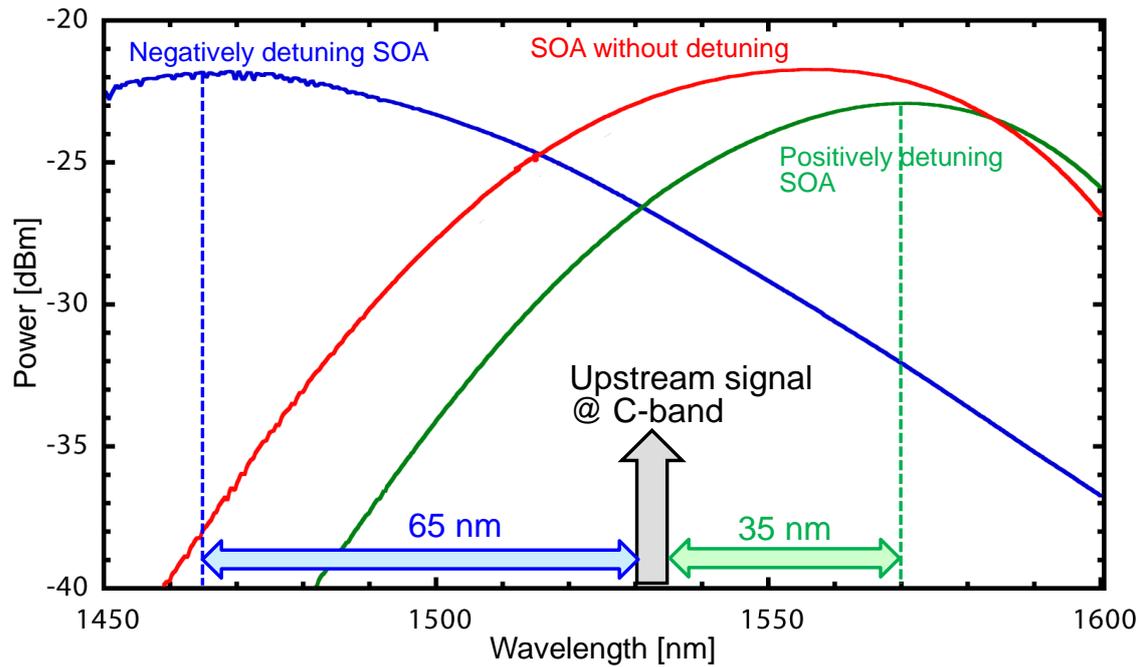


図 5-4 Negatively detuning, 離調なし, および Positively detuning タイプの SOA 利得ピーク波長と上り信号波長の関係.

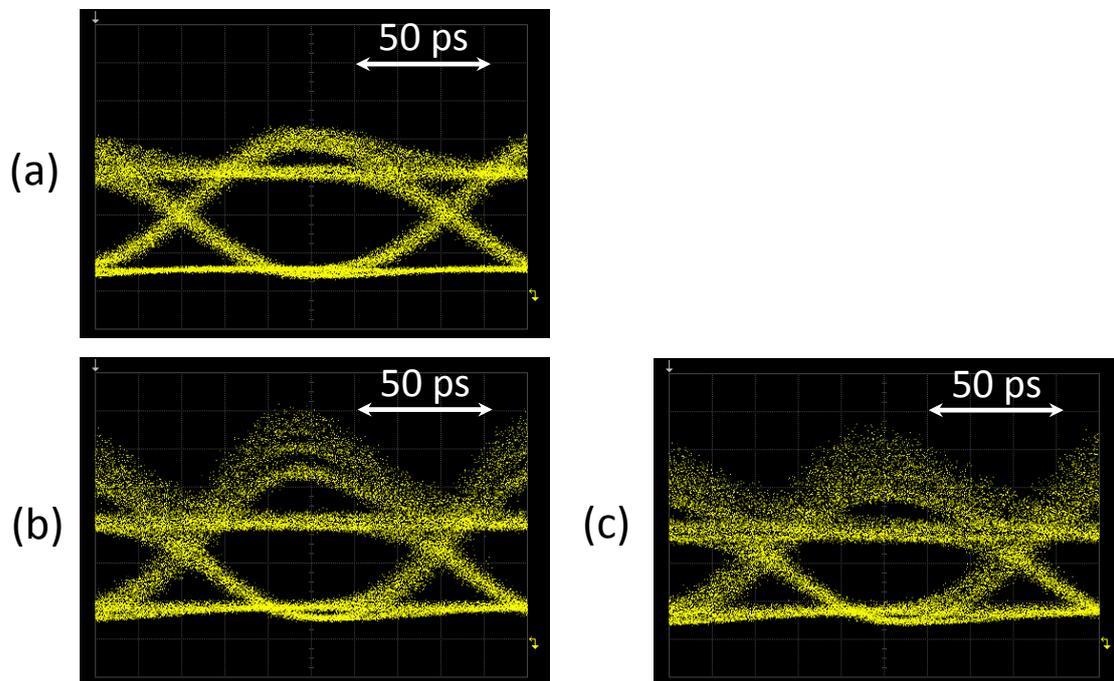


図 5-5 上り信号波長 1535.04 (λ_{ud}) nm における波長可変バースト光送信器の出力アイパターン. (a) Negatively detuning の場合. (b) 離調なしの場合. (c) Positively detuning の場合.

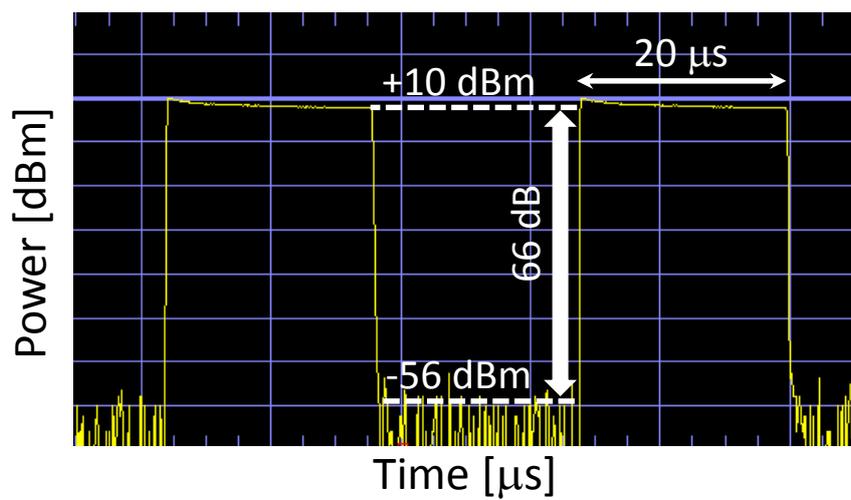


図 5-6 上り信号波長が $1535.04 (\lambda_{u4})$ nm における上りバースト信号波形.

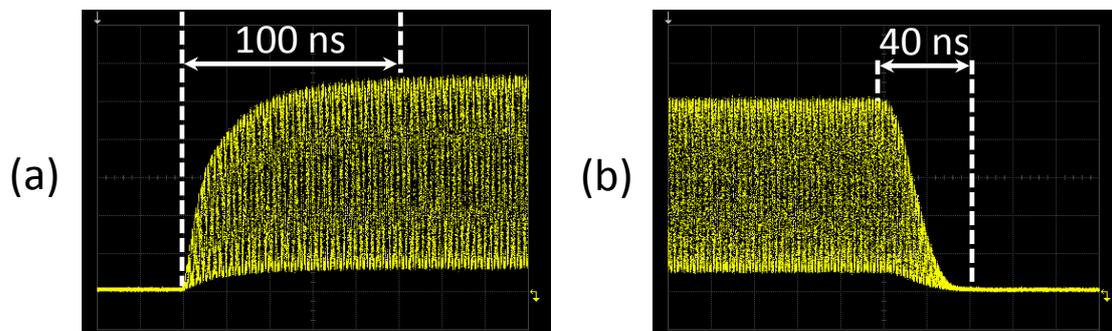


図 5-7 (a) バースト立ち上がり, および(b) バースト立ち下がり波形.

5-3-2 上りバースト信号 40 km 伝送実験、およびロスバジェット評価

提案した駆動電流制御ブースタ SOA を用いた、波長可変バースト光送信器の伝送特性を評価するため、これらを ONU に用いた 40-Gbit/s 級 TWDM-PON システムの上り 40-km 伝送特性評価を行った。上りバースト信号の 40-km 伝送実験構成を、図 5-8 に示す。伝送実験構成は、波長可変バースト光送信器を備えた 2 台の ONU、各 PON ブランチに配置された光パワースプリッタ、40 km のシングルモード光ファイバ、OLT 下部に設置された局内分岐用光パワースプリッタ、および各々送受信波長の異なる 4 台の CT を構成する光トランシーバから構成される。ONU が出力する上り信号の送信波長、およびバーストフレームパターンは、BER 測定器から出力される波長制御信号、およびバースト状態制御信号を用いて制御する。ONU 2 は干渉光用の強バースト信号源とし、バースト受信器に入力される光パワーを、受信器の最大入力パワーである -6 dBm に設定した。一方、ONU 1 は測定用の弱バースト信号源とし、各上り信号波長に対して、各 CT のバースト光受信器に入力される。上りバースト信号光パワーを変化させながら、40 km 伝送時の BER 特性を評価した。上りバースト信号のプリアンプル、ペイロード、およびエンドオブバーストは、それぞれ 397 ns、19.5 μ s、および 99 ns とした。また、ペイロードは 10.3125 Gbit/s (PRBS31 段) のビットレートで変調される。CT の光トランシーバに用いるバースト受信器のバースト応答速度は、200 ns である。本構成に代表される、パワースプリッタ型 TWDM-PON システムは、上りバースト信号の全波長が各 CT に接続された光トランシーバに入力される。このため、各光トランシーバは、受信する波長の信号を選択する BPF 構造を、受信部に備えなければならない。近年では、CT に搭載するバースト光トランシーバの一心双方向モジュール (BOSA: Bidirectional optical sub-assembly) 内に、BPF 構造を実装した光デバイスが報告されている [18]。本実験で用いた、各 CT のバースト受信器に搭載した BPF の透過特性を、図 5-9 に示す。BPF は、各上り信号波長において flat-top 透過特性を有し、挿入損失特性は 1.0 dB 以下である。各上り信号の中心波長からの波長マージン ± 0.2 nm (25 GHz) を考慮した、隣接波長間クロストークは、-43.5 dB 以下である。

波長可変バースト光送信器に、利得ピークの異なる 3 種類の駆動電流制御ブースタ SOA を実装し、上り信号波長 1535.04 (λ_{u4}) nm における 40 km 伝送特性を評価した。なお、Negatively detuning、離調なし、Positively detuning の SOA の駆動電流は最大仕様値とし、それぞれ 300 mA、400 mA、および 300 mA である。また、Negatively detuning のブースタ SOA は、210 mA 以上の駆動電流において 10.0 dBm 以上の出力が得られるが、SOA 自体の PDG による出力パワーの変動なども考慮し、最大定格駆動電流である 300 mA の条件で評価を行う。評価結果を図 5-10 に示す。なお、本 BER 特性は CT 4 に実装されたバースト光受信器の受信特性である。TWDM-PON システムは FEC の適用を前提とするため、BER が 10^{-3} の条件においてエラーフリーを達成する。本測定では、まず初めに測定対象である ONU 1 から出力される上りバースト信号

の受信パワーを、バースト受信器の最大入力光パワーである-6.0 dBm に設定し、受信特性を評価した。Negatively detuning タイプの SOA を搭載した波長可変バースト光送信器において、BER が 10^{-10} を満たすことを確認した。また、B-B 構成におけるバースト光受信器の最小受信感度は-30.7 dBm である。Negatively detuning タイプのブースタ SOA を実装した、波長可変バースト光送信器における、上りバースト信号 40 km 伝送時の最小受信感度、および B-B 構成の最小受信感度に対するパワーペナルティは、それぞれ-30.2 dBm、および 0.5 dB である。パワーペナルティの 0.5 dB は、主に 40 km 伝送時の波長分散による影響である。一方、離調なし、および Positively detuning タイプのブースタ SOA を実装した、波長可変バースト光送信器におけるパワーペナルティは、パターン効果による波形歪みの影響により、それぞれ 2.9 dB、および 4.1 dB となる。よって、Negatively detuning タイプのブースタ SOA を波長可変バースト光送信器に適用することにより、パターン効果による波形歪みに起因するパワーペナルティを大幅に改善できる。

続いて、利得ピーク波長の離調設計が異なる各ブースタ SOA に対する、上りロスバジェット改善効果の評価を行う。各タイプのブースタ SOA を実装した波長可変バースト光送信器の出力パワー、CT に備えるバースト光受信器の最小受信感度、および上り信号のロスバジェットを、図 5-11 に示す。利得ピーク波長の離調なしタイプのブースタ SOA においては、パターン効果による波形歪みが発生するものの、上り信号において 40 dB 程度のロスバジェットが確保できる。また、Positively detuning タイプのブースタ SOA においては、パターン効果による波形歪み、および出力パワーの低下の影響により、ロスバジェットは 3 種類の SOA 中で最小値の 37.2 dB となる。一方、Negatively detuning タイプのブースタ SOA においては、パターン効果の緩和によるパワーペナルティの抑圧、および+10.0 dBm 以上の高出力化により、全ての上り信号波長において 41.0 dB 以上のロスバジェット特性を達成した。加えて、ブースタ SOA の駆動電流制御によるバースト応答により、バーストオフレベル特性を-56.0 dBm まで低減できる。以上より、ブースタ SOA に、利得ピーク離調設計によるパターン効果緩和、駆動電流制御方式によるバースト制御技術を施すことにより、+10 dBm の高出力かつ、-56.0 dBm の低バーストオフレベル特性を兼ね備えた、波長可変バースト光送信器が実現できることを明らかにした。

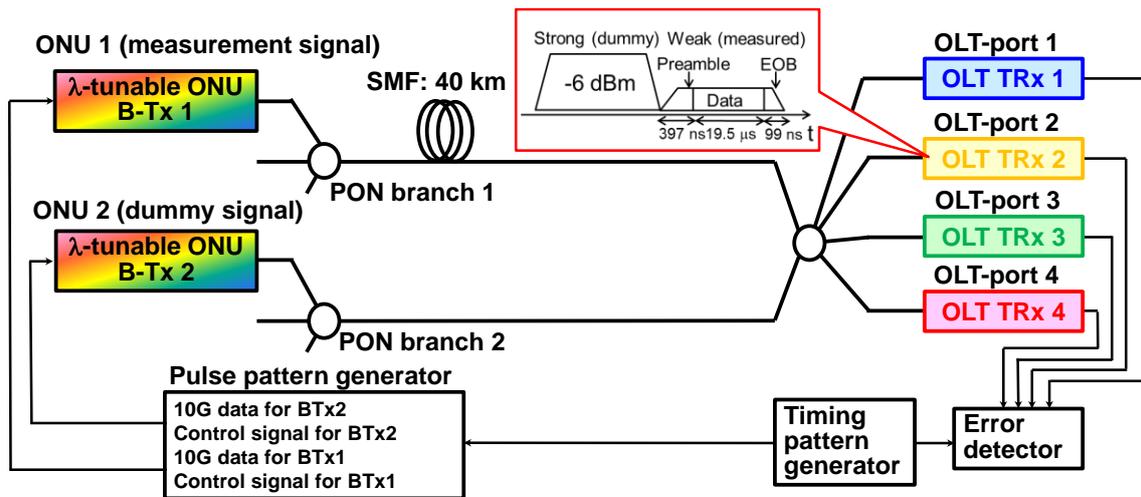


図 5-8 上り 40 km 伝送特性、およびロスバジェット評価実験構成.

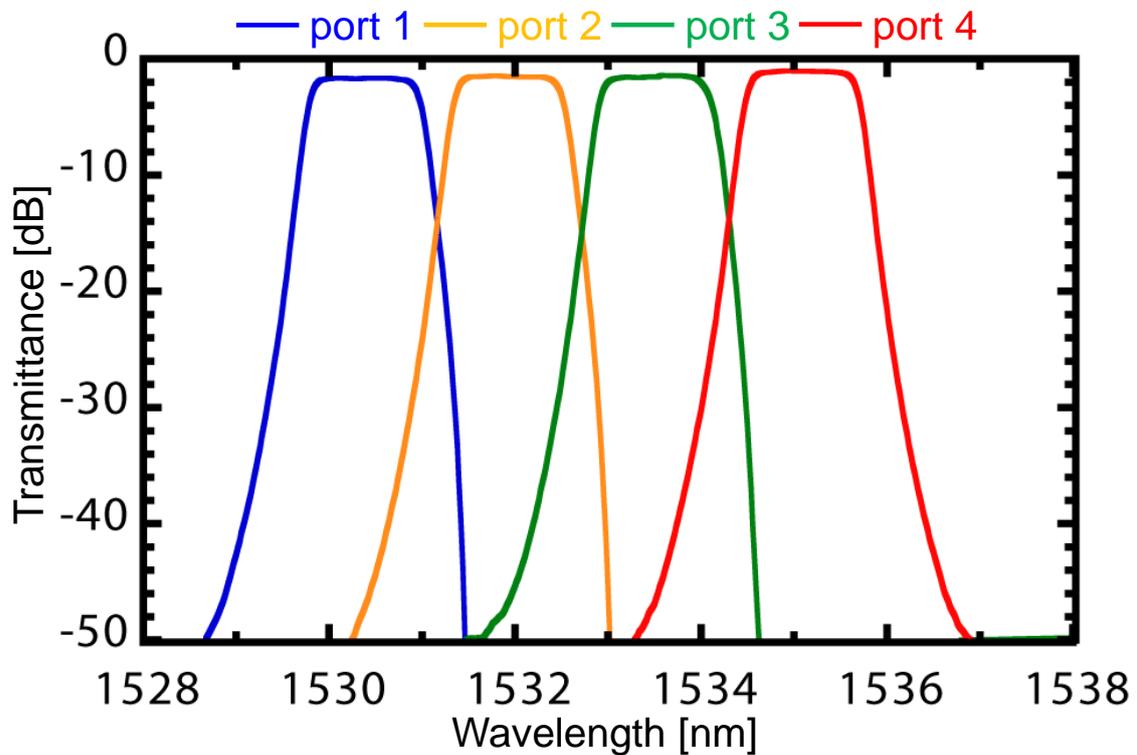


図 5-9 CT に搭載する光トランシーバ受信部が備える BPF の透過特性.

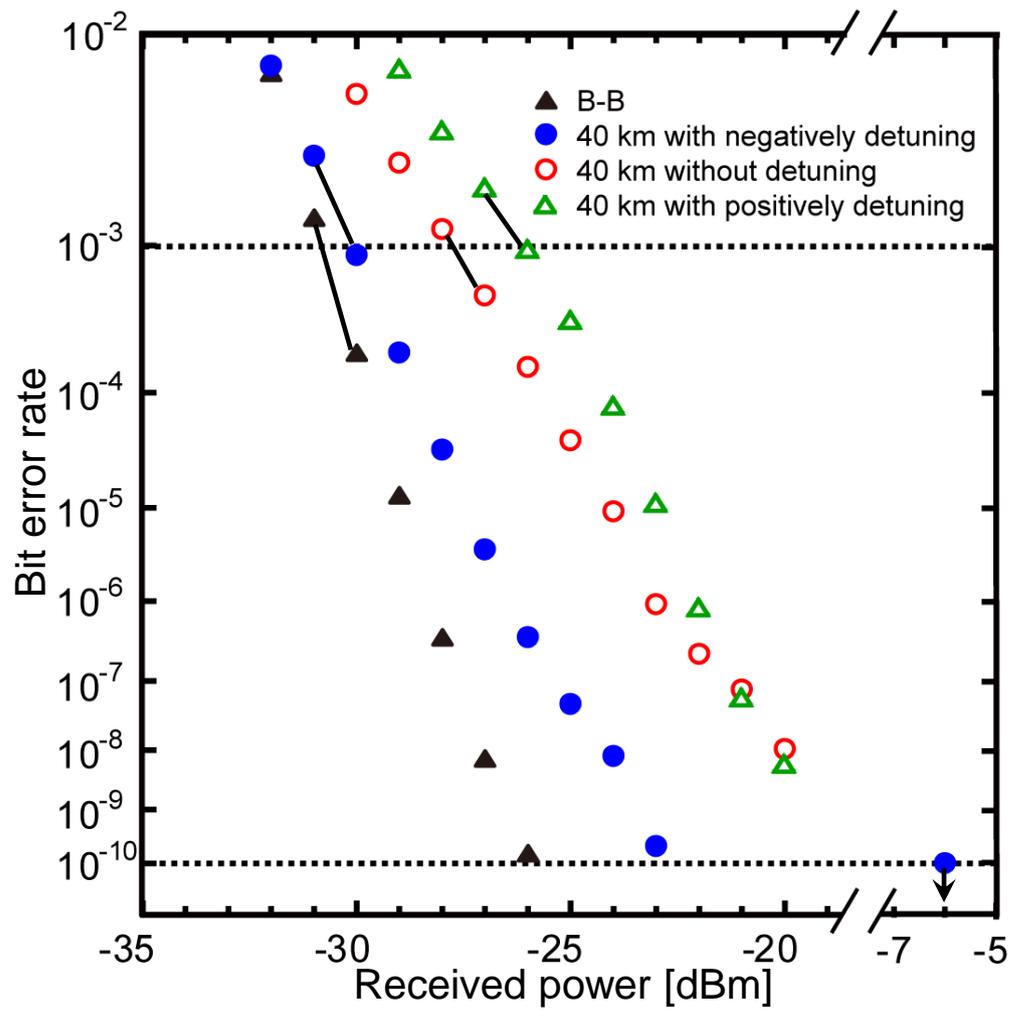


図 5-10 上り信号波長 1535.04 (λ_{u4})における上り 40 km バースト伝送時の BER 特性.

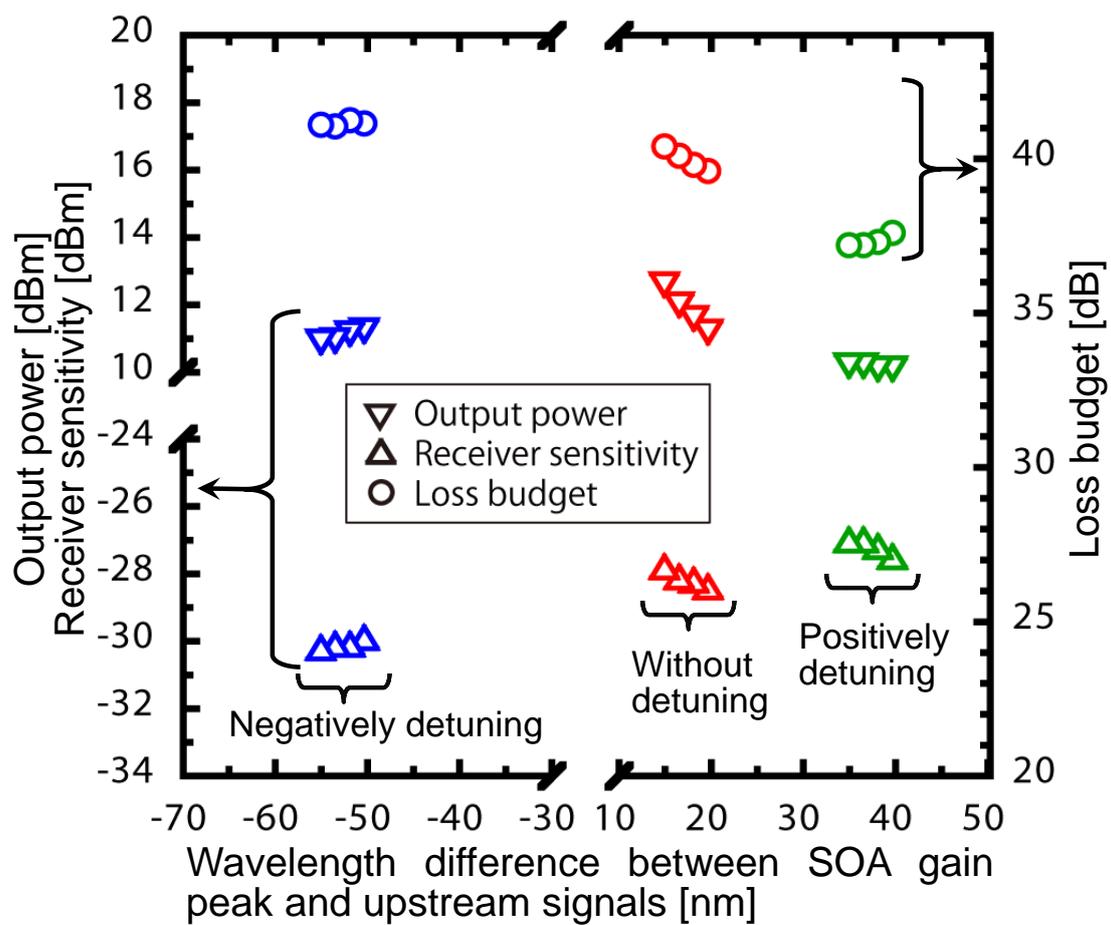


図 5-11 各ブースタ SOA に対する出力パワー，最小受信感度，およびロスバジェット特性.

5-4 逆バイアス電圧制御ブースタ SOA を用いた波長可変ブースト送信器

5-4-1 光吸収効果の静特性、およびブースト駆動特性

前節で述べた、駆動電圧制御ブースタ SOA を実装した、波長可変ブースト光送信器のブーストオフレベルは、最大で-56.0 dBm まで低減できた。第 2 章で明らかにした、TWDM-PON システムにおける分岐数に対するブーストオフレベル特性の要求性能を鑑みると、NG-PON2 標準化にて、G.989.2 で規定されている 0.1 dB 以下のクロストークペナルティを満たすには、例えば 256 分岐を実現するには、-63.2 dBm 以下のブーストオフレベル特性が要求される [8, 9]。すなわち、図 2-5 より、駆動電流制御ブースタ SOA 構成で実現した-56.0 dBm のブーストオフレベル特性では、クロストークペナルティ 0.1 dB 以下を満たしながら、分岐数を大幅に拡大することが困難である。これら多分岐化に向けたブーストオフレベル特性の課題を解決するため、本節では TWDM-PON システムの ONU 用波長可変ブースト光送信器の、さらなるブーストオフレベル特性改善を狙い、逆バイアス電圧制御手法をブースト制御ブースタ SOA に実装した、波長可変ブースト光送信器について検討を行う。一般的に、SOA は光増幅媒体として利用するため、順方向にバイアス電圧を印加して使用する。一方、SOA は半導体素子であるため、バイアス電圧を逆方向に印加することにより、光受信器として動作する特性も有する。すなわち、逆バイアス電圧印加時に SOA に入力された光信号は、光吸収作用を受ける。

まず初めに、SOA を逆バイアス駆動した場合における静的な光吸収特性を評価した。図 5-3 (a)において、連続信号を出力する波長可変光送信器出力に配置されたブースタ SOA に対し、逆バイアス電圧を印加し、ブースタ SOA から出力される光信号パワー、および駆動電流を評価した。バイアス電圧に対するブースタ SOA 出力パワー、および SOA 駆動電流の測定値を、図 5-12 に示す。なお、ブースタ SOA に入力する波長可変送信器の出力パワー、および信号波長は、それぞれ-0.5 dBm、および 1535.04 nm (λ_{u4}) である。駆動電流は、バイアス電圧が-0.7 V 以下の領域でマイナスの値を示し、光の吸収作用が働くことを示す。一方、ブースタ SOA 出力パワーは、バイアス電圧が-1.5 V の場合において、-65.9 dBm の値を示す。本特性は、図 2-5 より 256 分岐相当のブーストオフレベル要求条件に相当する。

逆バイアス電圧制御ブースタ SOA の状態制御に用いる、バイアス状態制御回路の構成を図 5-13 に示す。図 5-13 (a)に示す基本回路構成は、順方向および逆方向バイアス電圧源、2 台のアナログ SW、およびアナログ SW 制御部から構成される。本構成は、2 台のアナログ SW の切り替え動作を、アナログ SW 制御部によって同期して行うことにより、ブースタ SOA への印加バイアス電圧を順方向、および逆方向に制御する。本構成を TWDM-PON システムの ONU に搭載することを考慮すると、より簡易化、小型化、かつ低消費電力化が可能な構成が求められる。これら要求に応えるべく、可変抵抗器を用いることによりバイアス電圧源の共通化を可能とした、バイアス電圧状態制御

回路を提案する。図 5-13 (b)に示す、提案するバイアス電圧状態制御回路は、順方向バイアス電圧源、可変抵抗器、2 台のアナログ SW、およびアナログ SW 制御部から構成される。順方向電圧源は+5.0 V をブースタ SOA に供給する。順方向バイアス電圧印加時は、アナログ SW は A ポートに接続し、ブースタ SOA のアノード端子、およびカソード端子は、それぞれ定電圧源、およびグランドに接続する。ゆえに、ブースタ SOA には+5.0 V の順方向バイアス電圧が印加され、さらには 300 mA の駆動電流で駆動されることにより光増幅動作を行う。一方、逆方向バイアス電圧印加時においては、アナログ SW は B ポートに接続されるため、ブースタ SOA のアノード端子、およびカソード端子は、それぞれ可変抵抗器、および定電圧源に接続される。ここで、可変抵抗器においては定電圧源に対して電圧降下が発生し、アノード端子の電圧は+4.0 V となる。このため、ブースタ SOA のカソード端子に接続された定電圧源の電圧+5.0 V に対して、ブースタ SOA は-1.0 V の逆バイアス電圧が印加されることとなる。

続いて、図 5-3 (a)に示す逆バイアス電圧制御ブースタ SOA を用いた、波長可変バースト光送信器のバースト駆動特性を評価する。搭載するブースタ SOA に、前節で明らかにした **Negatively detuning** タイプを採用する。上り信号波長が 1535.04 (λ_{u4}) nm におけるバースト信号出力波形を、図 5-14 に示す。なお、バーストフレーム長、およびバーストデューティ比を、それぞれ 20.0 μ s、および 50 %とした。また、本構成では、バーストオン時に SOA に入力された上り信号は、300 mA の駆動電流および順方向バイアス電圧印加によって SOA で増幅される。一方、バーストオフ時に SOA に入力された上り信号は、駆動電流が 0 mA に遮断され、かつ逆バイアス電圧が印加されるため、SOA が光吸収媒体として働き、上り光信号パワーが低減する。図 5-14 より、バーストオン、およびバーストオフ状態における光パワーは、それぞれ+9.0 dBm、および-64.2 dBm を得た。なお、バーストオフレベル測定は、波長可変バースト光送信器に入力するバースト状態制御信号を、3 秒周期でバーストオン、またはオフとなるように入力した状態において、高分解能のパワーメータを用いて、バーストオフ時の光パワーを測定した。本構成の出力信号のアイパターン、バースト立ち上がり、およびバースト立ち下がり波形を、それぞれ図 5-15 (a)、(b)、および(c)に示す。出力信号のパターン効果は緩和されており、消光比は 7.5 dB となる。また、出力信号のバースト立ち上がり、および立ち下がり時間は、50 ns、および 30 ns を達成した。これらバースト立ち上がり、および立ち下がり特性は、バイアス電圧状態制御回路 (図 5-13)に採用するアナログ SW の特性に依存する。

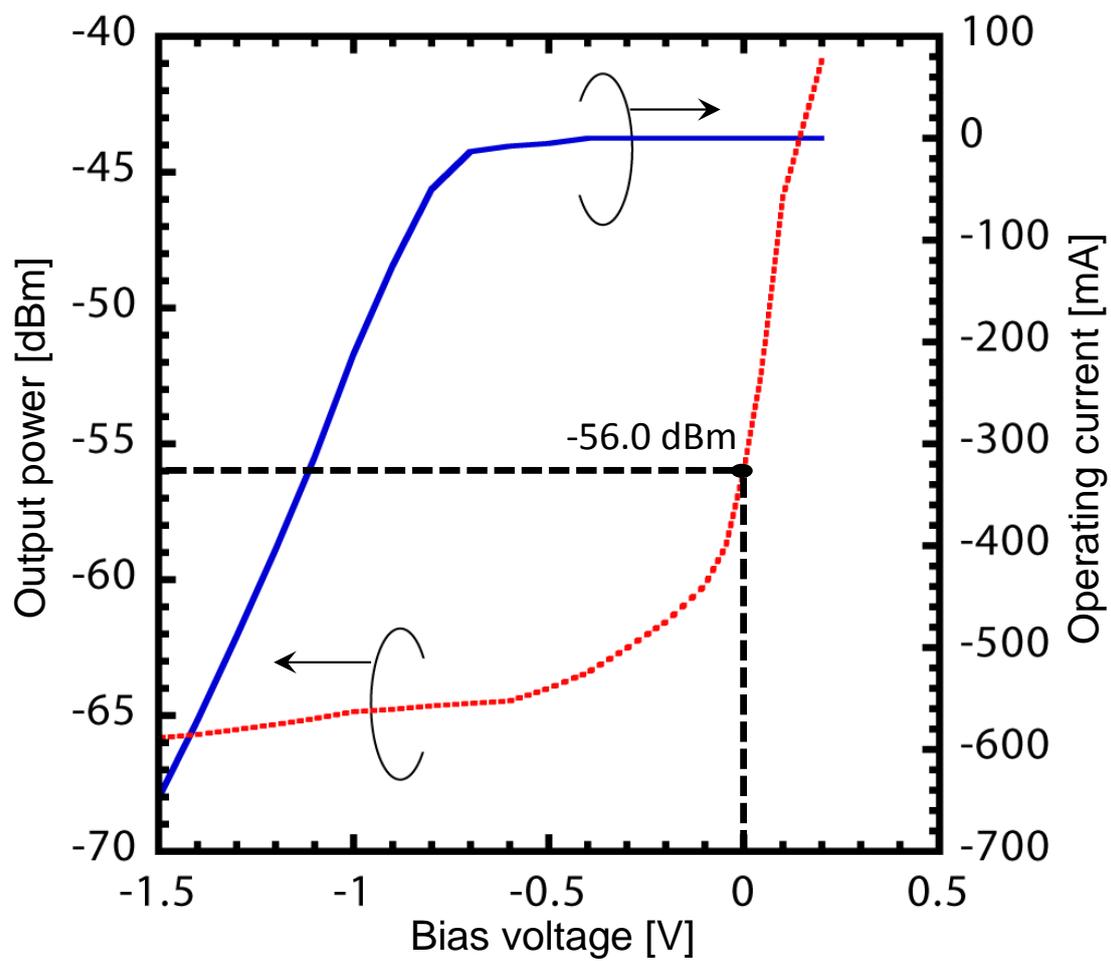


図 5-12 SOA を逆バイアス電圧制御した場合における光吸収効果の静特性.

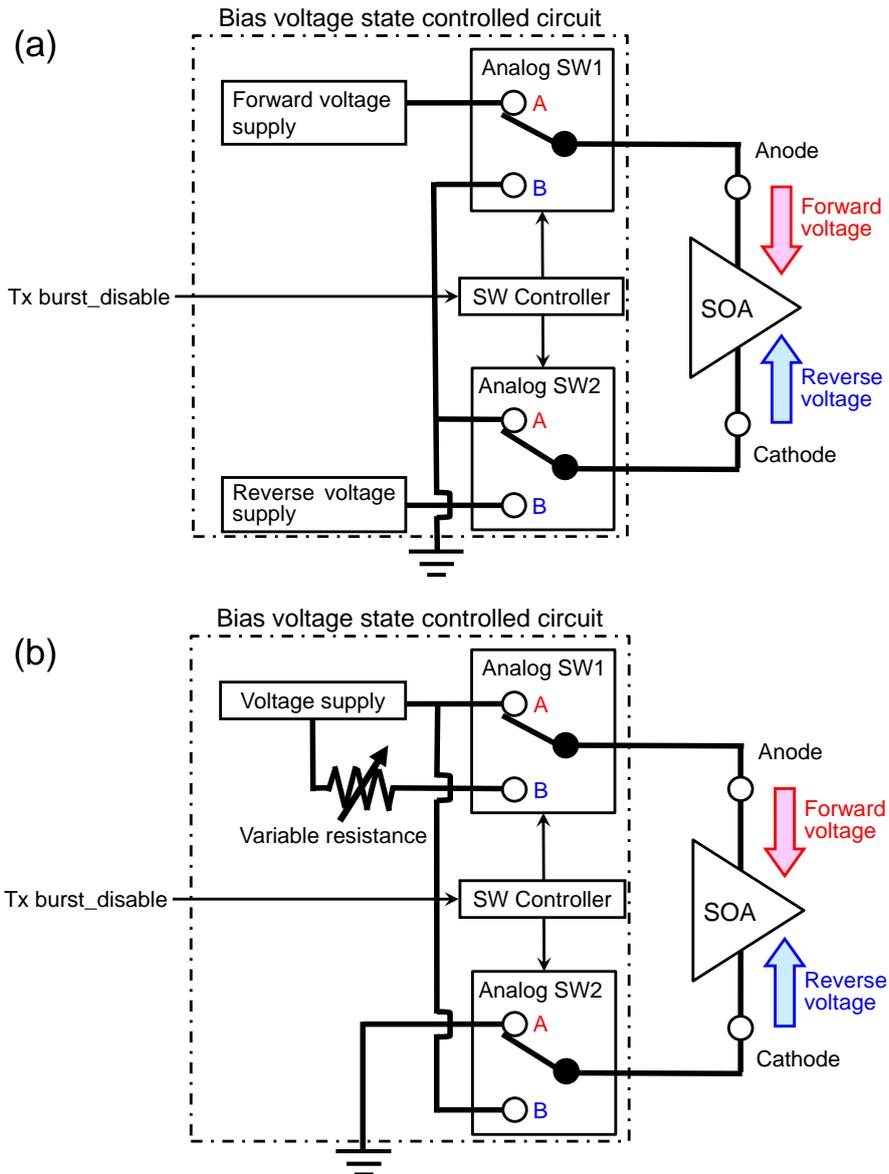


図 5-13 バイアス電圧状態制御回路構成. (a)基本構成. (b)電源を共通化した提案構成.

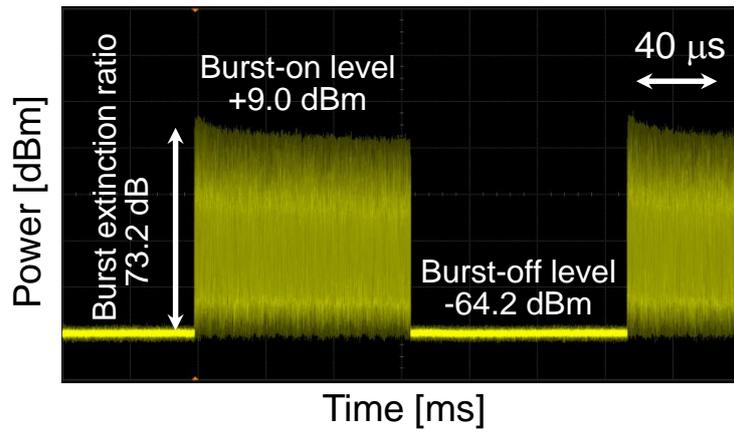


図 5-14 上り信号波長が 1535.04 (λ_{u4}) nm における上りバースト信号波形.

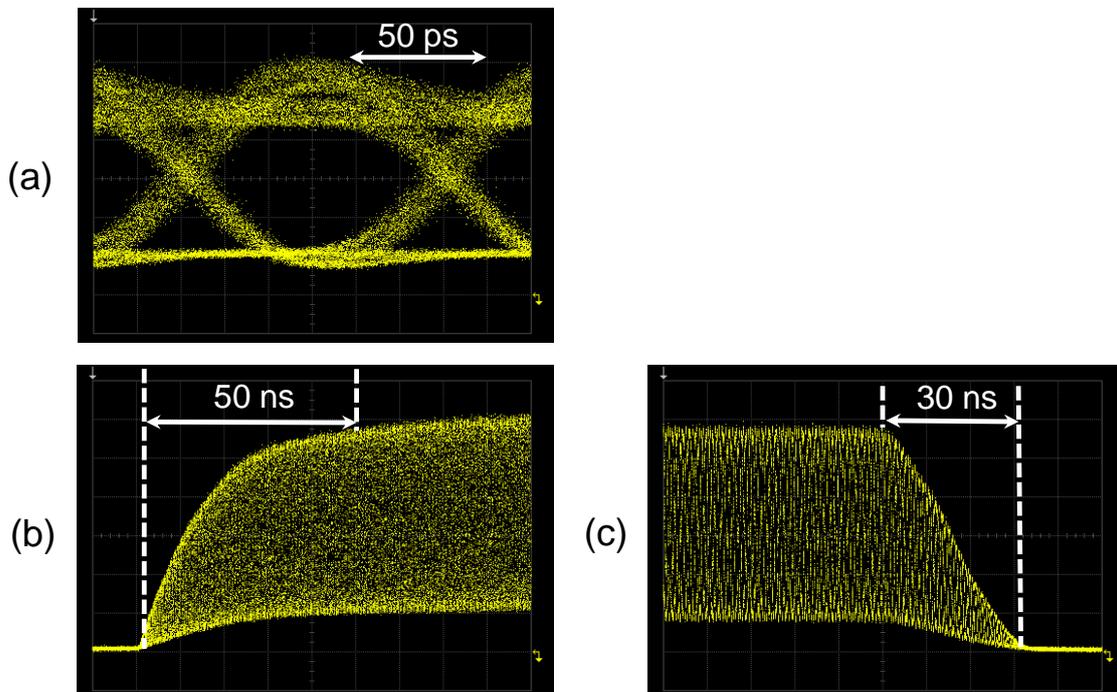


図 5-15 上り信号波長 1535.04 (λ_{u4}) nm における波長可変バースト光送信器の出力波形.
 (a)出力アイパターン. (b) バースト立ち上がり波形. (c)バースト立ち下がり波形.

5-4-2 クロストークペナルティ評価

提案した逆バイアス電圧制御型ブースタ SOA を用いた波長可変バースト光送信器を ONU に用いた、40-Gbit/s 級 TWDM-PON システムの上りバースト信号に対する、クロストークペナルティ特性評価を行った。クロストークペナルティ特性評価を行う、実験構成を図 5-16 に示す。実験構成は、波長可変バースト光送信器を備えた 2 台の ONU、各 PON ブランチに配置された偏波制御器 (PC: polarization controller)、各 PON ブランチに配置された光パワースプリッタ、OLT 下部に設置された局内分岐用光パワースプリッタ、および各々送受信波長の異なる 4 台の CT を構成する光トランシーバから構成される。ONU が出力する上りバースト信号の送信波長、およびバーストフレームパターンは、BER 測定器から出力される波長制御信号、およびバースト状態制御信号を用いて制御する。図 5-16 中に示す挿入図より、ONU 2 は分岐数を 32 分岐から 512 分岐まで変化させた場合における、バーストオフレベルのクロストーク成分を模擬する。一方、ONU 1 は測定用の弱バースト信号源とし、各上りバースト信号波長に対して、CT のバースト受信器に入力される上りバースト信号パワーを変化させながら、各分岐数における BER 特性を評価した。上りバースト信号フレームパターンのプリアンプル、ペイロード、およびエンドオブバーストは、それぞれ 397.2 ns、19.9 μ s、および 99 ns とした。また、ペイロードは 10.3125 Gbit/s (PRBS31 段) のビットレートで変調される。NG-PON2 の標準化規格である ITU-T G.989.2 では、FEC の適用を前提とするため、BER=10⁻³ でエラーフリーを規定する。また、測定に用いた CT の光トランシーバに用いる、バースト光受信器のバースト応答速度は 200 ns である。実験に用いたバースト光受信器の B-B における最小受信感度は -31.1 dBm である。

新たに提案した、逆バイアス電圧制御ブースタ SOA を搭載した、波長可変バースト光送信器のクロストークペナルティ抑圧効果を明らかにするため、まず初めにクロストークペナルティの偏波依存性を評価する。なお、波長可変バースト光送信器に備えるブースタ SOA は、前節で明らかにしたパターン効果緩和効果を得る **Negatively detuning** タイプを使用し、信号波長帯である C 帯において +9.0 dBm 以上の高出力化が図れるように、駆動電流を最大仕様値の 300 mA に設定した。また、逆バイアス電圧は、SOA 自体の最大仕様値が -2.0 V であるが、バースト立ち上がりおよび立ち下がりにおける安定的な高速バースト応答性も担保する必要があるため、バースト状態制御回路に使用しているアナログ SW の応答特性から、-1.0 V に設定した。図 5-16 において、ONU 1 から出力される上りバースト信号、および ONU 2 から出力されるクロストーク成分の偏波状態が、合致した場合 (最悪ケース)、および異なる場合 (最良ケース) における、クロストークペナルティの計算、および実験結果を図 5-17 に示す。なお、上りバースト信号、およびクロストーク成分の偏波状態は、各 PON ブランチに配置された PC を用いて調整した。偏波状態が最悪ケースにおいては、上りバースト信号とクロストーク成分間のビート雑音の影響により、偏波状態が最良ケースと比較して大きなクロストークペ

ナルティが発生する。さらに、ONU 1 から出力される上りバースト信号は、ブースタ SOA で重畳される ASE 雑音を含有するため、これら上りバースト信号と ASE 雑音のビート雑音も発生する。このため、実験により得られたクロストークペナルティの値は、128 分岐以上の領域において計算結果よりも高い値となる。

256 分岐、および 512 分岐構成における、上りバースト信号波長が 1530.33 nm (λ_{ul}) の場合における BER 特性を、図 5-18 に示す。比較のため、駆動電流制御ブースタ SOA を備えた、波長可変バースト光送信器を用いた場合の BER 特性も示す。図 5-18 より、ブースタ SOA を用いない、B-B 構成の最小受信感度は -31.1 dBm となる。逆バイアス電圧制御方式の 256 分岐構成における最小受信感度、およびクロストークパワーペナルティは、それぞれ -31.0 dBm、および 0.1 dB となる。一方、512 分岐構成においては、バーストオフレベルパワーを模擬したクロストーク成分の影響、およびブースタ SOA から放出される ASE 雑音成分の影響により、最小受信感度、およびクロストークペナルティは、それぞれ -30.8 dB、および 0.3 dB となる。一方で、前節で提案した駆動電流制御方式の 256 分岐、および 512 分岐構成におけるクロストークペナルティは、バーストオフレベル特性が -56.0 dB と、逆バイアス電圧制御方式と比較して 8.2 dB 劣るため、それぞれ 0.4 dB、および 1.2 dB となる。

TWDM-PON システムの分岐数に対する駆動電流制御、および逆バイアス電圧制御ブースタ SOA を備えた波長可変送信器の、クロストークペナルティ特性を図 5-19 に示す。駆動電流制御方式では、図 2-5 に示したクロストークペナルティの計算結果と同様に、128 分岐以上の構成において 0.1 dB 以上のクロストークペナルティが発生する。一方、逆バイアス電圧制御方式においても、計算結果の見積りと同様に、256 分岐構成まで 0.1 dB 以下のクロストークペナルティを満たす。よって、提案した逆バイアス電圧制御ブースタ SOA を ONU に適用することにより、波長可変バースト光送信器の高出力化、および低バーストオフレベル化が図れ、クロストークペナルティが 0.1 dB 以下の条件において、TWDM-PON システムの分岐数を、256 分岐まで拡大可能であることを明らかにした。

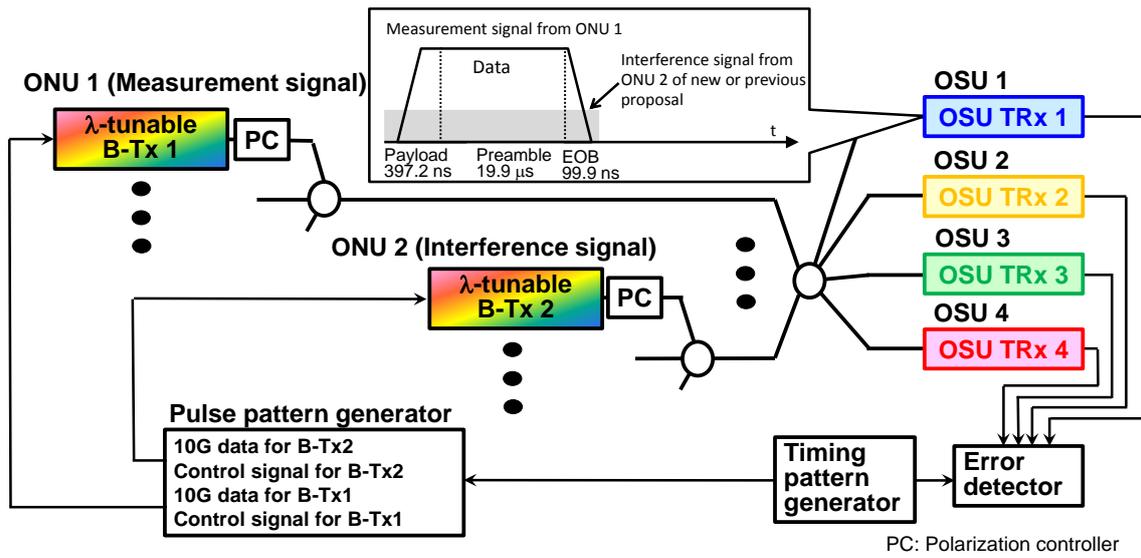


図 5-16 クロストークペナルティ評価実験構成.

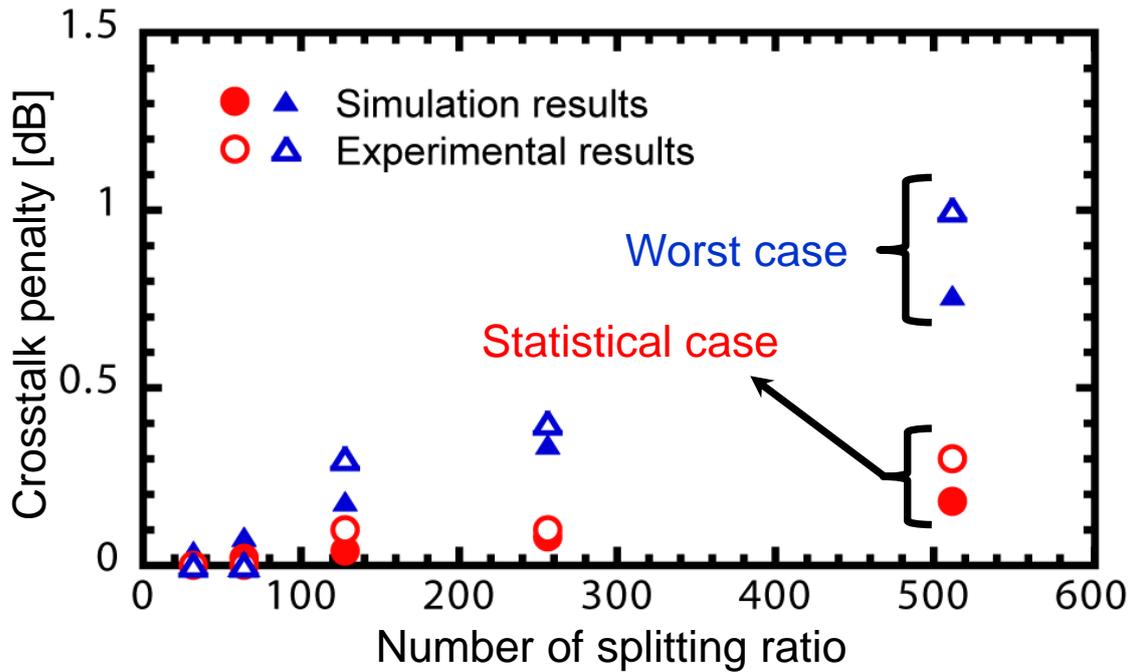


図 5-17 TWDM-PON システムの分岐数に対するクロストークペナルティ特性.

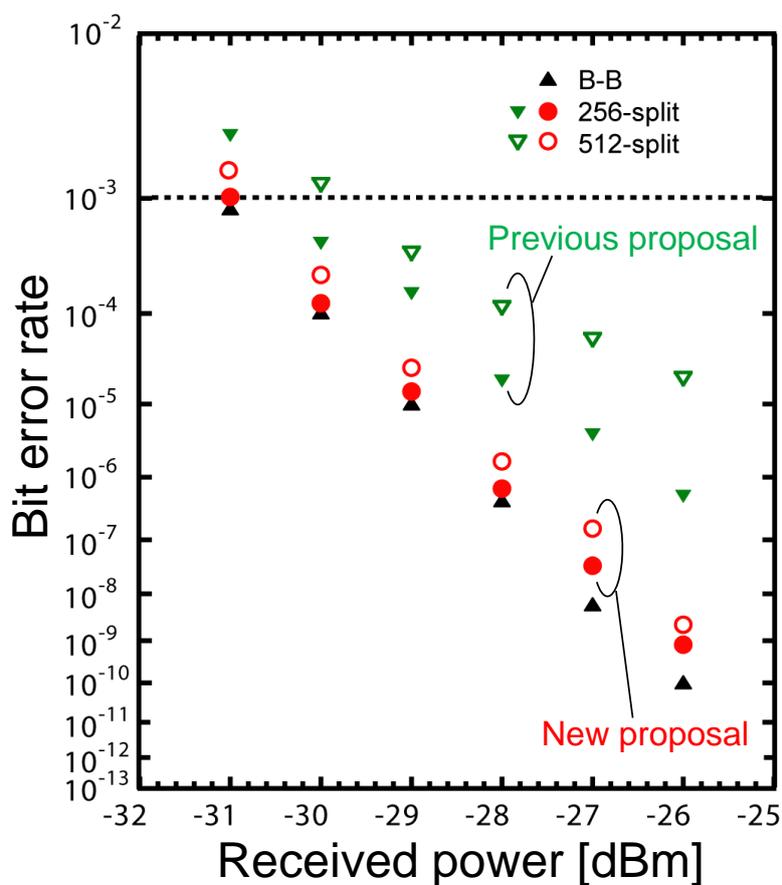


図 5-18 駆動電流制御型, および逆バイアス電圧制御型プースタ SOA を備えた波長可変バースト送信器の BER 特性.

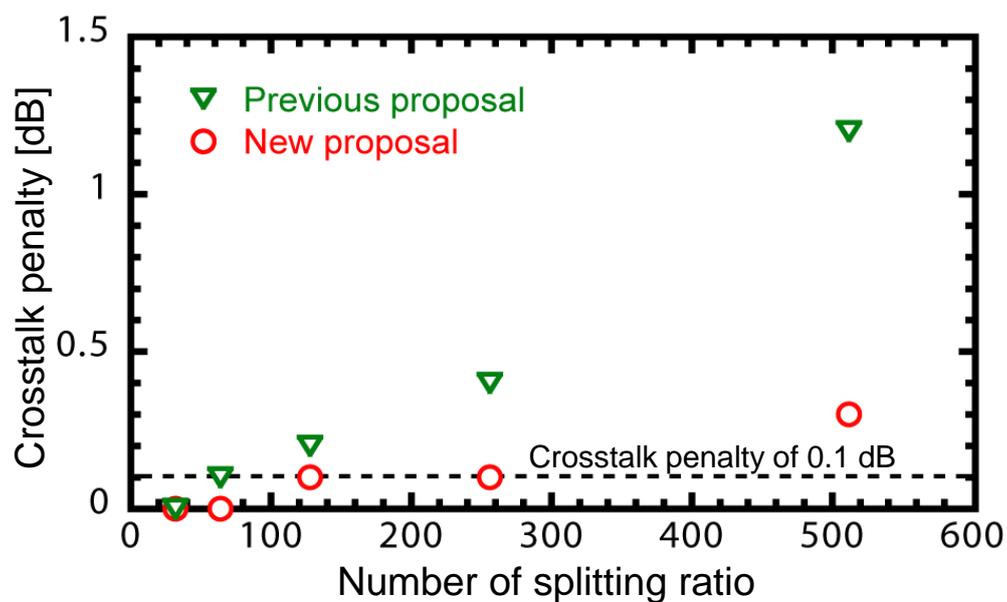


図 5-19 TWDM-PON システムの分岐数に対する駆動電流制御型, および逆バイアス電圧制御型プースタ SOA を備えた波長可変送信器のクロストークペナルティ特性.

5-5 まとめ

本章では、TWDM-PON システムの抜本的な多分岐化に対応するため、ONU に搭載する波長可変バースト光送信器の高出力、および低バーストオフレベル化に向けて、それぞれブースタ SOA の利得ピーク離調によるパターン効果緩和、およびブースタ SOA のバースト制御によるバーストオフレベル低減技術について提案した。ブースタ SOA のパターン効果緩和においては、信号光波長に対して短波長側に利得ピーク波長を有する **Negatively detuning** タイプのブースタ SOA を適用することにより、パターン効果による波形歪みを簡易な構成で効率よく緩和できることを明らかにした。また、バーストオフレベル低減技術は、駆動電流、および逆バイアス電圧制御による、ブースタ SOA のバースト制御技術を適用した、波長可変バースト光送信器を提案し、駆動電流、および逆バイアス電圧制御構成において、バーストオフレベル特性を、それぞれ **-56.0 dBm**、および **-64.2 dBm** まで低減できることを明らかにした。多分岐化 TWDM-PON システムにおける、分岐数に対するクロストークペナルティ特性を実験により評価し、逆バイアス制御ブースタ SOA を実装した、波長可変バースト光送信器を用いることで、クロストークによるパワーペナルティを **0.1 dB** 以下に抑えつつ、分岐数を **256** 分岐まで拡大できることを示した。

参考文献

- [1] N. Suzuki, and J. Nakagawa, "First demonstration of full burst optical amplified GE-PON uplink with extended system budget of up to 128 split and 58 km reach," in *Proc. ECOC'2005*, Tu1.3.3, 2005.
- [2] Z. Belfqih, F. Saliou, P. Chanclou, T. Soret, and N. Genay, "Bidirectional amplifier for standard PON architecture in burst mode configuration with class B+ attenuation range," in *Proc. OFC/NFOEC'2007*, OWS1, 2007.
- [3] S. Appathurai, D. Nesses, and R. Davey, "Measurement of tolerance to non-uniform burst power in SOA amplified G-PON," in *Proc. OFC/NFOEC'2007*, OWS2, 2007.
- [4] K. -I. Suzuki, Y. Fukada, D. Nesses, and R. Davey, "Amplified gigabit PON systems," *IEEE/OSA J. Opt. Newl.*, vol. 6, no. 5, pp. 422-433, 2007.
- [5] 今井健之, 藤原正満, 田口勝久, 鈴木謙一, "屋外設置型 PON 光増幅器" 電子情報通信学会技術研究報告, 通信方式, CS2011-14, pp. 23-27, 2011.
- [6] K. Taguchi, H. Nakamura, K. Asaka, S. Kimura, and N. Yoshimoto, "Long-reach λ -tunable WDM/TDM-PON using synchronized gain-clamping SOA technology," *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 5, no. 10, pp. A144-A151, 2013.
- [7] K. Taguchi, M. Fujiwara, T. Imai, K.-I. Suzuki, H. Ishii, and N. Yoshimoto, "Pattern effect suppression by injecting directly modulated synchronized gain-clamping light using inverted signal for PON application of SOA," *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 32, no. 8, pp. 1616-1623, 2014.
- [8] ITU-T recommendation G.989 series.
- [9] D. Nesses, "NG-PON2 technology and standards," *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 33, no. 5, pp. 1136-1143, 2015.
- [10] Y. Luo, H. Roberts, K. Grobe, M. Valvo, D. Nesses, K. Asaka, H. Rohde, J. Smith, J. S. Wey, and F. Effenberger, "Physical layer aspects of NG-PON2 standards - part 2: system design and technology feasibility," *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 8, no. 1, pp. 43-52, 2016.
- [11] I. D. Henning, M. J. Adams, and J. V. Collins, "Performance predictions from a new optical amplifier model," *IEEE J. Quantum. Electron.*, vol. 21, no. 6, pp. 609-613, 1985.
- [12] G. Eisenstein, K. L. Hall, R. M. Jopson, G. Raybon, and M. S. Whalen, "Two-color gain saturation in an InGaAsP near-traveling-wave optical amplifier," in *Proc. OFC/IOOC'87*, ThC4, 1987.

- [13] A. A. M. Saleh and I. M. I. Habbab, "Effects of semiconductor-optical-amplifier nonlinearity of the performance high-speed intensity-modulation lightwave systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 38, no. 6, pp. 839-846, 1990.
- [14] K. Inoue, T. Mukai, and T. Saitoh, "Gain saturation dependence on signal wavelength in a travelling-wave semiconductor laser amplifier," *IET Electron. Lett.*, vol. 23, no. 7, pp. 328-329, 1987.
- [15] K. Taguchi, K. Asaka, S. Kimura, and N. Yoshimoto, "High output power and burst extinction ratio ONU using a simple configuration booster SOA with gain peak detuning for WDM/TDM-PON," in *Proc. OFC'2014*, W3G.7, 2014.
- [16] K. Taguchi, K. Asaka, S. Kimura, K. -I. Suzuki, and A. Otaka, "Burst-off-level power reduction in λ -tunable transmitter using a reverse bias voltage controlled burst-mode booster SOA for 256-split WDM/TDM-PON," in *Proc. OFC'2015*, Tu3E.8, 2015
- [17] K. Taguchi, H. Nakamura, K. Asaka, S. Nakano, S. Kimura, and N. Yoshimoto, "100-ns λ -selective burst-mode transceiver for 40-km reach symmetric 40-Gbit/s WDM/TDM-PON," in *Proc. ECOC'2013*, Mo.4.F.5, 2013.
- [18] K. Asaka, K. Taguchi, Y. Sakaue, K.-I. Suzuki, S. Kimura, and A. Otaka, "High output power OLT/ONU transceivers for 40 Gbit/s symmetric-rate NG-PON2 systems," in *Proc. ECOC'2015*, Mo.4.4.1, 2015.

第6章 今後の展望

光アクセスシステムの研究開発においては、本論文でまとめたシステムロスバジェット拡大による広域・多分岐化と共に、10-Gbit/s級の10G-EPONシステム/XG-PONシステム、および40-Gbit/s級のTWDM-PONシステムと、大容量化システムの標準化が進められ、積極的に研究開発が進められてきた [1-3]。特に、近年では、4.5 Gもしくは5G世代のモバイルサービスの基地局を収容する、モバイルフロントホール/バックホールに対するPONシステム適用が盛んに検討されており、システムの更なる大容量化に向けた検討が盛り上がりつつある [4-6]。このような状況を背景に、ITU-Tで標準化された40-Gbit/s級の伝送容量を有するNG-PON 2に対抗して、2015年からIEEEにて100G-EPONシステムの標準化に向けた検討が開始されている [7]。100G-EPONシステムの主要性能は今後議論されるが、25-Gbit/sの光信号を4波多重するTWDM-PONシステムを基本構成とした方式が有力である。PONシステムにおいては、信号速度の高速化はデバイスコストに大きな影響を与える。このため、TDM信号の25 Gbit/s変調信号 [8]に加えて、4-PAM (Pulse amplitude modulation)変調信号 [9]や、Duobinary変調信号 [10]を適用することにより、デバイスへの高速性能要求を緩和した方式が注目され、検討が進められている。一方、ロスバジェットの観点においては、PONシステム特有の課題として、既存システムとロスバジェットの整合性を保ち、かつ更なる高ロスバジェット化を実現して、経済性を高める必要がある。このため、100G-EPONにおいても、既存PONシステムで標準化されている30 dB程度のロスバジェットが要求される可能性が高い。

以下に、本論文で提案した各要素技術の将来PONシステムに対する有効性を考察する。SOAの非線形効果、および飽和効果を用いた波長変換型ALC技術のPAM変調信号への適用においては、弱い光レベルで変調されている信号は線形領域で増幅され、強い光レベルで変調されている信号は飽和領域で増幅されるため、結果としてPAM信号に対してALC効果が働くことが想定され、振幅方向の多値変調度を喪失してしまう。一方、SGC光を用いたパターン効果抑圧技術、およびブースタSOAのバースト制御技術は、PAM変調信号などにおいても信号の変調方式は、NRZ信号によるOOK (On-off-keying) 変調が基本となるため、本論文で示したのと同様の効果が得られると考えられる。また、25 Gbit/s-TDM信号方式に対しては、本論文で検証を行った10-Gbit/s信号以上の高速化対応が必要になる。近年では、25 Gbit/s以上のビットレートに対応した波長変換用SOAや、直接変調または外部変調器が実用化されているため、これら高速信号に対応したデバイスを用いることにより、波長変換によるALC効果やSGC光によるパターン効果抑圧効果が期待できる。また、ブースタSOAのバースト制御技術は、バーストフレーム毎にSOAの動作を制御する方式であり、変調信号などに特性に依存しないため、本論文の検討構成をそのまま適用することができる。これら、変調方式や要求されるシステムロ

スバジェットに対応すべく、今後標準化されるシステム使用に対応した、SOA制御技術の検討が求められる。

さらに将来の技術として長距離光伝送システムで研究されている最新技術についても、アクセスシステムへの適用が積極的に検討されている。近年では柔軟な帯域割当などが実現可能なOFDM信号や、QAM変調信号などの多値変調信号を用いた、適応変調方式が盛んに研究されている [11]。これら多値変調変信号に対するSOAの適用においては、パターン効果による波形歪みの影響が信号のコンスタレーションに与える影響などが報告されており、SOAに対して線形増幅領域の拡大、すなわち飽和増幅特性の改善が望まれる。一方、広域・多分岐化に向けたロスバジェット拡大技術としては、SOAをはじめとした光増幅器の適用と並んで、長距離伝送システムで導入が進められているデジタルコヒーレント技術のアクセス適用が熱を帯びている [12]。これらデジタルコヒーレント技術との比較では、特にコストの面でSOAをはじめとした光増幅器にアドバンテージがある。しかし、デジタルコヒーレント技術は、送受信器に組み込むことで伝送路にアクティブデバイスを配置することなく高ロスバジェット化が実現でき、かつSOAよりも優れた特性が得られる。このため、SOAに対しては、デバイスとしてNFやPDGなどEDFAに代表される光ファイバ増幅器並みの諸特性の実現、および低消費電力動作に向けた高温動作、対応および耐環境性能や監視機能といった実用化開発が加速することを期待したい。

参考文献

- [1] IEEE 802.3av.
- [2] ITU-T recommendation G.987 series.
- [3] ITU-T recommendation G.989 series.
- [4] T. Orphanoudakis, E. Kosmatos, J. Angelopoulos, and A. Stavdas, "Exploiting PONs for mobile backhaul," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 2, pp. 527-534, 2013.
- [5] D. Iida, S. Kuwano, J.-I. Kani, and J. Terada, "Dynamic TWDM-PON for mobile radio access networks," *OSA Opt. Express*, Vol. 21, No.22, pp-26209-26218, 2013.
- [6] N. Shibata, S. Kuwano, J. Terada, and H. Kimura, "Dynamic IQ data compression using wireless resource allocation for mobile front-haul with TDM-PON" *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 7, no. 3, pp. A372-A378, 2015.
- [7] IEEE 802.3 Industry connections NGE-PON Ad Hoc., http://www.ieee802.org/3/ad_hoc/ngepon/.
- [8] V. Houtsma, and D. Veen, "Demonstration of 25 Gbps TDM-PON with 31.5 dB optical power budget using only 10 Gbps optical components," in *Proc. ECOC'2015*, PD.4.3, 2015.
- [9] H. Zhang, S. Fu, J. Man, W. Chen, X. Song, and L. Zeng, "30km downstream transmission using 4x25 Gb/s 4-PAM modulation with commercial 10 Gbps TOSA and ROSA for 100 Gb/s PON," in *Proc. OFC'2014*, M2I.3, 2014.
- [10] D. V. Veen, V. E. Houtsma, P. Winzer, and P. Vetter, "26-Gbps PON transmission over 40-km using duobinary detection with a low cost 7-GHz APD-based receiver," in *Proc. ECOC'2012*, Tu.3.B.1.F, 2012.
- [11] N. Iiyama, J. -I, Kani, J. Terada, and N. Yoshimoto, "Feasibility study on a scheme for coexistence of DSP-based PON and 10-Gbps/ λ PON using hierarchical star QAM format," *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 31, no. 18, pp. 3085-3092, 2013.
- [12] D. Lavery, R. Maher, D. S. Millar, B. C. Thomsen, P. Bayvel, and S. J. Savory, "Digital coherent receivers for long-reach optical access networks," *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 31, no. 4, pp. 609-620, 2013.

第7章 結論

本研究では、PONシステムの広域・多分岐化を実現するSOA制御技術として、上り信号増幅における動作領域拡大に向けたSOAの波長変換によるALC技術、下り信号増幅における動作領域拡大に向けたSGC光によるパターン効果抑圧技術、およびTWDM-PONシステム多分岐化におけるONUの波長可変バースト光送信器高性能化に向けた、ブースタSOAの利得ピーク離調によるパターン効果緩和技術、およびバースト制御技術によるバーストオフレベル低減技術の検討を行い、以下の結論を得た。

第2章では、SOAを適用した光増幅PONシステムにおいて、システム動作領域の制限要因を数値解析により示し、詳細な光増幅PONシステムの動作領域を明らかにした。その結果、上り信号増幅に適用するSOAにおいては、SOAが放出するASE雑音の影響、および強バースト光信号入力時におけるパターン効果による波形歪みの影響により、システムダイナミックレンジが大きく制限されることを明らかにした。また、下り信号増幅へ適用するSOAにおいては、ネットワーク構成上、下り信号増幅用SOAに強い光強度の下り信号が入力されるため、パターン効果に起因するSurge限界の制限が支配的であることを明らかにした。さらに、TWDM-PONシステムの抜本的な多分岐化の実現に向けた、ブースタSOAを用いたONU向け波長可変光バースト送信器の高性能化に向けた検討として、数値解析により多分岐化構成において要求される、バーストオフレベル特性を明らかにした。

第3章では、SOAを適用した光増幅PONシステムにおいて、Overload、およびSurge限界によって制限される、上り方向のシステム動作領域の拡大に向けて、SOAのXGMを活用した波長変換型ALC技術を提案した。中継増幅構成の光増幅GE-PONシステムにおいては、伝送路中に設置される光増幅器に波長変換型ALC機能を具備することにより、15 dBのパワー差を有するバースト入力信号に対して、パワー差を2 dB以内に制御できることを示した。提案した波長変換型ALCを中継光増幅GE-PONシステムに適用することで、システムロスバジェットを最大55.0 dBまで拡大しつつ、17.0 dBのシステムダイナミックレンジを確保できることを明らかにした。また、局置構成の光増幅GE-PONシステムへの適用においては、25 nmの信号波長範囲に対して、最小受信感度を-35.0 dBまで拡大しつつ、25.0 dBの入力信号パワーダイナミックレンジを達成した。10-Gbit/s級光増幅PONシステムへの適用においては、16 nmの信号波長範囲に対して、トランク区間損失を30.0 dBまで拡大しつつ、15.0 dBのトランク区間ダイナミックレンジを確保できることを明らかにした。

第4章では、SOAを適用した光増幅PONシステムにおいて、Surge限界によって制限される、下り方向のシステム動作領域の拡大に向けて、O/E/O変換器か生成されるSGC光を用いた、SOAのパターン効果抑圧技術を提案した。中継増幅構成の光増幅GE-PONシステム下り信号増幅においては、伝送路中に設置される下り信号用SOAにSGC

光生成部を備えたパターン効果抑圧構成を具備することにより、強い光パワー入力の下り信号に対して、パターン効果による波形歪みを劇的に改善できることを示した。パターン効果抑圧 SOA を中継光増幅 GE-PON システムに適用することで、アクセス区間のロスバジェットを 40 dB 確保しつつ、トランク区間の伝送距離を 51.8 km まで拡大可能であることを明らかにした。また、10-Gbit/s 級 TDM-PON 用 ONU の高出力化に向けたブースタ SOA への適用においては、10 Gbit/s 信号においても良好なパターン効果抑圧特性が得られることを明らかにし、中継光増幅なしでシステムロスバジェットを 40 dB まで拡大できることを実験により示した。さらに Cyclic AWG を用いた TWDM-PON 用 ONU の高出力化に向けたブースタ SOA への適用においては、CWDM 周波数グリッドに準拠した 60 nm に渡る上り信号波長範囲 (4 波長分)においても、良好なパターン効果抑圧特性が得られることを明らかにし、TWDM-PON システムの上り方向ロスバジェットを中継光増幅器なしで 40 dB 以上に拡大できることを示した。

第 5 章では、TWDM-PON システムの抜本的な多分岐化に対応するため、ONU に搭載する波長可変バースト光送信器の高出力、および低バーストオフレベル化に向けて、それぞれブースタ SOA の利得ピーク離調によるパターン効果緩和、およびブースタ SOA のバースト制御によるバーストオフレベル低減技術について提案した。ブースタ SOA のパターン効果緩和においては、信号光波長に対して短波長側に利得ピーク波長を有する (Negatively detuning) ブースタ SOA を適用することにより、パターン効果による波形歪みを簡易な構成で効率よく緩和できることを明らかにした。また、バーストオフレベル低減技術は、駆動電流、および逆バイアス電圧制御によるブースタ SOA のバースト制御技術を適用した、波長可変バースト光送信器を提案し、駆動電流、および逆バイアス電圧制御構成において、バーストオフレベル特性を、それぞれ -56.0 dBm、および -64.2 dBm まで低減できることを明らかにした。多分岐化 TWDM-PON システムにおける、分岐数に対するクロストークペナルティ特性を実験により評価し、逆バイアス制御ブースタ SOA を実装した、波長可変バースト光送信器を用いることで、クロストークによるパワーペナルティを 0.1 dB 以下に抑えつつ、分岐数を 256 分岐まで拡大できることを示した。

以上の検討により、PON システムを用いて提供される光アクセスシステムの広域・多分岐化技術として、各種技術課題を解決する SOA 制御技術を提案し、その有効性を明らかにした。国民の生活や経済活動を支える社会基盤として、FTTH サービスが固定電話に代わり重要な役割を担うようになった現代において、本論文でまとめた広域・多分岐化技術は、デジタルデバイドの解消、および光通信サービスの更なる経済化に資する技術である。将来における、SOA を用いた広域・多分岐化 PON システムの実用化に期待しつつ、筆を置く事とする。

研究発表リスト

主著

学術論文

- [1] **K. Taguchi**, M. Fujiwara, T. Imai, K.-I. Suzuki, H. Ishii, and N. Yoshimoto, "Optically-amplified PON system using XGM-based ALC technique," *IEICE Electron. Express*, vol. 8, no. 21, pp. 1836-1841, Nov. 2011.
- [2] **K. Taguchi**, H. Nakamura, K. Asaka, S. Kimura, and N. Yoshimoto, "Long-reach λ -tunable WDM/TDM-PON using synchronized gain-clamping SOA technology [Invited]," *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 5, no. 10, pp. A144-A151, Oct. 2013.
- [3] **K. Taguchi**, M. Fujiwara, T. Imai, K.-I. Suzuki, H. Ishii, and N. Yoshimoto, "Pattern effect suppression by injecting directly modulated synchronized gain-clamping light using inverted signal for PON application of SOA," *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 32, no. 8, pp. 1616-1623, Apr. 2014.
- [4] **K. Taguchi**, K. Asaka, S. Kimura, and N. Yoshimoto, "High output power and burst extinction ratio λ -tunable ONU transmitter using burst-mode booster SOA for WDM/TDM-PON," *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 7, no. 1, pp. 1-7, Jan. 2015.
- [5] **K. Taguchi**, K. Asaka, M. Fujiwara, S. Kaneko, T. Yoshida, Y. Fujita, H. Iwamura, M. Kashima, S. Furusawa, M. Sarashina, H. Tamai, A. Suzuki, T. Mukojima, S. Kimura, K.-I. Suzuki, and A. Otaka, "Field trial of long-reach and high-splitting λ -tunable TWDM-PON," *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 34, no. 1, pp. 213-221, Jan. 2016.

国際会議

- [1] **K. Taguchi**, M. Fujiwara, T. Imai, K.-I. Suzuki, H. Ishii, N. Yoshimoto, and H. Hadama, "Applicable area estimation of bidirectional optical amplifiers to 10-Gb/s class long-reach PON systems," in *Proc. COIN'2010*, MoA1-3, Jeju, Korea, Jul. 2010.
- [2] **K. Taguchi**, M. Fujiwara, T. Imai, K.-I. Suzuki, H. Ishii, and N. Yoshimoto, "Pattern suppression technique of synchronized gain-clamping light injection for downstream SOA in optically-amplified PON systems," in *Proc. OFC/NFOEC'2012*, OTh4G.5, Los Angeles, USA, Mar. 2012.
- [3] **K. Taguchi**, H. Nakamura, K. Asaka, T. Mizuno, Y. Hashizume, T. Yamada, M.

- Ito, H. Takahashi, S. Kimura, and N. Yoshimoto, "40-km reach symmetric 40-Gbit/s λ -tunable WDM/TDM-PON using synchronized gain-clamping SOA," in *Proc. OFC/NFOEC'2013*, OW4D.6, Anaheim, USA, Mar. 2013.
- [4] **K. Taguchi**, H. Nakamura, K. Asaka, S. Nakano, S. Kimura, and N. Yoshimoto, "100-ns λ -selective burst-mode transceiver for 40-km reach symmetric 40-Gbit/s WDM/TDM-PON," in *Proc. ECOC'2013*, Mo.4.F.5, London, United Kingdom, Sep. 2013.
- [5] **K. Taguchi**, K. Asaka, S. Kimura, and N. Yoshimoto, "High output power and burst extinction ratio ONU using a simple configuration booster SOA with gain peak detuning for WDM/TDM-PON," in *Proc. OFC'2014*, W3G.7, San Francisco, USA, Mar. 2014.
- [6] **K. Taguchi**, K. Asaka, S. Kimura, K. I. Suzuki, and A. Otaka, "Burst-off-level power reduction in λ -tunable transmitter using a reverse bias voltage controlled burst-mode booster SOA for 256-split WDM/TDM-PON," in *Proc. OFC'2015*, Tu3E.8, Los Angeles, USA, Mar. 2015
- [7] **K. Taguchi**, K. Asaka, M. Fujiwara, S. Kaneko, T. Yoshida, Y. Fujita, H. Iwamura, M. Kashima, S. Furusawa, M. Sarashina, H. Tamai, A. Suzuki, T. Mukojima, S. Kimura, K.-I. Suzuki, and A. Otaka, "First field trial of 40-km reach and 1024-split symmetric-rate 40-Gbit/s λ -tunable WDM/TDM-PON," in *Proc. OFC'2015*, Th5A.6, Los Angeles, USA, Mar. 2015.
- [8] **【招待講演】 K. Taguchi**, "Long-reach and high-splitting technology for 40-Gbit/s-class λ -tunable TWDM-PON," in *Proc. OFC'2016*, W4C.4, Anaheim, USA, Mar. 2016.

国内学会

- [1] **田口勝久**, 松浦基晴, 來住直人, "単一周波数光ファイバレーザの多波長外部光源による周波数制御法," 電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会, OFT2008-35, 芝浦工業大学 (東京), 2008年10月.
- [2] **田口勝久**, 藤原正満, 今井健之, 鈴木謙一, 吉本直人, 葉玉寿弥, "長延化 PON システムにおけるバースト対応光増幅器の適用領域に関する検討," 電子情報通信学会通信方式研究会, CS2009-68, 下関海峡メッセ (山口), 2010年1月.
- [3] **田口勝久**, 藤原正満, 今井健之, 鈴木謙一, 吉本直人, 葉玉寿弥, "4×8 分岐長延化 PON システムにおけるバースト対応光増幅器の適用領域に関する検討," 2010年電子情報通信学会総合大会, B-8-55, 東北大学 (宮城), 2010年3月.
- [4] **田口勝久**, 藤原正満, 今井健之, 鈴木謙一, 石井比呂志, 吉本直人, "GE-PON システムにおける半導体光増幅器の適用領域," 2011年電子情報通信学会ソサエティ大

- 会, B-8-25, 北海道大学(北海道), 2011年9月.
- [5] 田口勝久, 藤原正満, 今井健之, 鈴木謙一, 石井比呂志, 吉本直人, “同期ゲインクランプ光を用いた SOA のパターン効果抑圧,” 2012 年電子情報通信学会総合大会, B-8-56, 岡山大学(岡山), 2012年3月.
- [6] 田口勝久, 藤原正満, 今井健之, 鈴木謙一, 石井比呂志, 吉本直人, “10-Gb/s 級光増幅 PON システムへの XGM-ALC 技術の適用,” 2012 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-8-23, 富山大学(富山), 2012年9月.
- [7] 田口勝久, 中村浩崇, 浅香航太, 木村俊二, 吉本直人, “40-Gbit/s 級波長可変 WDM/TDM-PON の実現に向けた 1.5 μm 帯波長可変バースト送信方式の一検討,” 電子情報通信学会通信方式研究会, CS2012-101, 愛媛大学(愛媛), 2013年1月.
- [8] 田口勝久, 中村浩崇, 浅香航太, 木村俊二, 吉本直人, “同期ゲインクランプ(SGC)光中型ブースタ SOA を用いた波長可変型 WDM/TDM-PON 用バースト送信器の高出力化,” 2013 年電子情報通信学会総合大会, B-8-43, 岐阜大学(岐阜), 2013年3月.
- [9] 田口勝久, 浅香航太, 木村俊二, 吉本直人, “WDM/TDM-PON における高速波長選択型バースト送信器の検討,” 2013 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-8-23, 福岡工業大学(福岡), 2013年9月.
- [10] 田口勝久, 浅香航太, 木村俊二, 吉本直人, “WDM/TDM-PON 用高速波長選択型バースト送受信器の提案と動作検証,” 電子情報通信学会光通信システム研究会, OCS2013-91, 長岡技術科学技術大学(新潟), 2013年11月.
- [11] 田口勝久, 浅香航太, 木村英明, 木村俊二, 吉本直人, “バースト制御 SOA を用いた WDM/TDM-PON 用 ONU 送信器,” 2014 年電子情報通信学会総合大会, B-8-11, 新潟大学(新潟), 2014年3月.
- [12] 田口勝久, 浅香航太, 木村俊二, 吉本直人, 木村秀明, “ブースタ SOA を用いた WDM/TDM-PON 用高出力光バースト送信器の設計と特性評価,” 電子情報通信学会通信方式研究会, CS2014-40, 南種子町商工会議所(鹿児島), 2014年7月.
- [13] 田口勝久, 浅香航太, 木村俊二, 木村秀明, “逆バイアス制御ブースタ SOA を用いた WDM/TDM-PON 用 ONU 送信器のバーストオフレベル特性評価,” 2014 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-8-7, 徳島大学(徳島), 2014年9月.
- [14] 田口勝久, 浅香航太, 木村俊二, 鈴木謙一, 大高明浩, “バースト CDR を用いた WDM/TDM-PON 用高速波長選択型 ONU の受信特性評価,” 2015 年電子情報通信学会総合大会, B-8-60, 立命館大学(滋賀), 2015年3月.
- [15] 田口勝久, 浅香航太, 木村俊二, 鈴木謙一, 大高明浩, “逆バイアス電圧制御ブースタ SOA を用いた WDM/TDM-PON 用 ONU 送信器のバーストオフレベル改善,” 2015 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-8-27, 東北大学(仙台), 2015年9月.

- [16] 田口勝久, 浅香航太, 藤原正満, 金子慎, 吉田智暁, 藤田典一, 岩村英志, 鹿嶋正幸, 古沢聡, 更科昌弘, 玉井秀明, 鈴木祥也, 向島俊明, 木村俊二, 鈴木謙一, 大高明浩, “広域・多分岐化 WDM/TDM-PON のフィールド実証実験,” 電子情報通信学会通信方式研究会, CS2015-42, 層雲峡温泉ホテル大雪 (北海道), 2015 年 11 月.
- [17] 田口勝久, 浅香航太, 木村俊二, 鈴木謙一, 大高明浩, “バースト制御 SOA を用いた TWDM-PON 用波長可変バースト送信器のクロストークペナルティ評価,” 2016 年 電子情報通信学会総合大会, B-10-25, 九州大学 (福岡), 2016 年 3 月.

共著

学術論文

- [1] M. Fujiwara, K.-I. Suzuki, **K. Taguchi**, T. Imai, H. Ishii, and N. Yoshimoto, "1G/10G coexistence long-reach PON system using ALC burst-mode SOAs," *IEICE Electron. Express*, vol. 9, no. 5, pp. 371-377, Mar. 2012.
- [2] M. Fujiwara, K.-I. Suzuki, **K. Taguchi**, T. Imai, H. Ishii, and N. Yoshimoto, "ALC burst-mode optical amplifiers for 10 Gb/s-class long-reach PONs," *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 4, no. 8, pp. 614-621, Jul. 2012.
- [3] M. Fujiwara, T. Imai, **K. Taguchi**, K.-I. Suzuki, H. Ishii, and N. Yoshimoto, "Field trial of 100-km reach symmetric-rate 10G-EPON system using automatic level controlled burst-mode SOAs," *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 31, no. 4, pp. 634-640, Jan. 2013.
- [4] H. Nakamura, **K. Taguchi**, S. Tamaki, T. Mizuno, Y. Hashizume, T. Yamada, M. Ito, H. Takahashi, S. Kimura, and N. Yoshimoto, "40Gbit/s-class- λ -tunable WDM/TDM-PON using λ -selectable B-Tx and 4 x M cyclic AWG router for flexible photonic aggregation networks," *OSA Opt. Express*, vol. 21, no.1, pp-463-468, Jan. 2013.
- [5] M. Fujiwara, **K. Taguchi**, T. Imai, K.-I. Suzuki, H. Ishii, and N. Yoshimoto, "Effective coexistence between normal- and extended-distance PON areas by using ALC-SOA," *IEICE Commun. Express*, vol. 2, no. 6, pp. 232-238, Jun. 2013.
- [6] 妹尾由美子, 金子慎, 吉田智暁, **田口勝久**, 木村俊二, 吉本直人, "波長可変型 WDM/TDM-PON を用いた広域フォトニックアグリゲーション技術と光増幅器の最適配置による集線機能の省電力化," 電子情報通信学会和文論文誌 B, vol. J98-B, no. 6, pp. 471-483, 2015 年 6 月.

国際会議

- [1] M. Fujiwara, K.-I. Suzuki, K. Hara, T. Imai, **K. Taguchi**, H. Ishii, N. Yoshimoto, and H. Hadama, "Burst-mode compound optical amplifier with automatic level control circuit that offers enhanced setting flexibility in a 10Gb/s-class PON," in *Proc. ECOC'2010*, PDP3.2, Torino, Italy, Sep. 2010.
- [2] M. Fujiwara, K.-I. Suzuki, **K. Taguchi**, T. Imai, H. Ishii, N. Yoshimoto, and H. Hadama, "Effective accommodation for users located in long/short distance areas through PONs with dual stage splitter configuration using ALC burst-mode optical amplifier," in *Proc. OFC/NFOEC'2011*, NThF3, Los Angeles, USA, Mar. 2011.

- [3] K.-I. Suzuki, M. Fujiwara, **K. Taguchi**, T. Imai, H. Ishii, and N. Yoshimoto, “128 x 8 split and 80 km long-reach dual rate 10G-EPON transmission using ALC hybrid burst-mode optical fiber amplifier and SOA pre-amplifier,” in *Proc. ECOC’2011*, Mo.1.C3, Geneva, Switzerland, Sep. 2011.
- [4] M. Fujiwara, T. Imai, **K. Taguchi**, K.-I. Suzuki, H. Ishii, and N. Yoshimoto, “Field trial of 79.5-dB loss budget, 100-km reach 10G-EPON system using ALC burst-mode SOAs and EDC,” in *Proc. OFC/NFOEC’2012*, PDP5D.8, Los Angeles, USA, Mar. 2012.
- [5] H. Nakamura, **K. Taguchi**, S. Tamaki, T. Mizuno, Y. Hashizume, T. Yamada, M. Itoh, H. Takahashi, S. Kimura, N. Yoshimoto, “40 Gbit/s-class- λ -tunable WDM/TDM-PON using tunable-B-Tx and cyclic AWG router for flexible photonic aggregation networks,” in *Proc. ECOC’2012*, Tu.4.B.3, Amsterdam, Netherlands, Sep. 2012.
- [6] M. Fujiwara, R. Koma, and **K. Taguchi**, “Burst-off-level power reduction in λ -tunable transmitter using a reverse bias voltage controlled burst-mode booster SOA for 256-split WDM/TDM-PON,” in *Proc OFC’2015*, Tu3E.6, Los Angeles, USA, Mar. 2015.

国内学会

- [1] 鈴木謙一, **田口勝久**, 藤原正満, 今井健之, 石井比呂志, 吉本直人, 葉玉寿弥, “10G-EPON システムの広域化における課題と要求条件,” 電子情報通信学会通信方式研究会, CS2010-70, 徳島大学 (徳島), 2011 年 1 月.
- [2] 藤原正満, **田口勝久**, 今井健之, 鈴木謙一, “高速 AGC/ALC 技術の適用による光増幅 PON 中継システムの動作領域拡大,” 2011 年電子情報通信学会総合大会, B-8-10, 東京都市大学 (東京), 2011 年 3 月.
- [3] 今井健之, 藤原正満, **田口勝久**, 鈴木謙一, “柱上設置型光増幅 PON 中継器,” 2011 年電子情報通信学会総合大会, B-10-71, 東京都市大学 (東京), 2011 年 3 月
- [4] 今井健之, 藤原正満, **田口勝久**, 鈴木謙一, “屋外設置型 PON 光増幅器,” 電子情報通信学会通信方式研究会, CS2011-14, 久米島イーブ情報プラザ (沖縄), 2011 年 7 月.
- [5] 中村浩崇, **田口勝久**, 木村俊二, 吉本直人, “NxM 周回性 AWG を用いた 40G 級波長可変型 WDM/TDM-PON のスケーラビリティ,” 2012 年電子情報通信学会ソサエティ大会, B-8-24, 富山大学 (富山), 2012 年 9 月.
- [6] 浅香航太, 中村浩崇, **田口勝久**, 木村俊二, 吉本直人, “波長可変型 WDM/TDM-PON における隣接波長チャンネル間クロストークに関する検討,” 2013 年電子情報通信学会総合大会, B-8-40, 岐阜大学 (岐阜), 2013 年 3 月.

- [7] 中村浩崇, 田口勝久, 浅香航太, 木村俊二, 吉本直人, “波長可変型 WDM/TDM-PON における BLDD 内蔵光モジュールを用いた低消費電力高速波長選択型バースト送信器,” 2013 年電子情報通信学会総合大会, B-8-42, 岐阜大学 (岐阜), 2013 年 3 月.
- [8] 浅香航太, 田口勝久, 木村俊二, 吉本直人, “WDM/TDM-PON における高速波長選択受信器の検討,” 2013 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-8-24, 福岡工業大学 (福岡), 2013 年 9 月.
- [9] 木村英明, 田口勝久, 浅香航太, 木村俊二, 吉本直人, 木村秀明 “バースト信号対応デジタルコヒーレント OFDM 受信のためのフレームフォーマットに関する一検討,” 2014 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-8-11, 徳島大学 (徳島), 2014 年 9 月.
- [10] 坂上裕希, 下羽利明, 田口勝久, 浅香航太, 酒井慈仁, 鈴木謙一, 須川智規 “WDM/TDM-PON と FM 一括変換システム, 10G/GE-PON システム共存時におけるラマンクロストークの評価(1),” 2015 年電子情報通信学会総合大会, B-8-38, 立命館大学 (滋賀), 2015 年 3 月.
- [11] 吉永尚生, 下羽利明, 坂上裕希, 酒井慈仁, 浅香航太, 田口勝久, 須川智規, 鈴木謙一, “WDM/TDM-PON と FM 一括変換システム, 10G/GE-PON システム共存時におけるラマンクロストークの評価(2),” 2015 年電子情報通信学会総合大会, B-8-39, 立命館大学 (滋賀), 2015 年 3 月.
- [12] 原一貴, 坂上祐希, 田口勝久, 浅香航太, 鈴木謙一, 大高明浩, “WDM を適用した心線共有による新規/既存システムへの影響検討,” 2016 年電子情報通信学会総合大会, B-8-49, 九州大学 (福岡), 2016 年 3 月.

謝辞

本論文をまとめるにあたり、懇切なる御指導、および御鞭撻を賜りました 東京工業大学大学院総合理工学研究科 植之原裕行教授に謹んで深謝の意を表します。また、論文を執筆するにあたり有益な御指導、および御助言を賜りました東京工業大学大学院総合理工学研究科 浅田雅洋教授、小山二三夫教授、宮本智之准教授、渡辺正裕准教授に謹んで深謝の意を表します。

本論文は、筆者が日本電信電話株式会社 NTT アクセスサービスシステム研究所において 2009 年から取り組んできた、半導体光増幅器を適用した広域・多分岐化光アクセスシステムに関する研究をまとめたものです。本論文をまとめる機会を与えていただきました、NTT アクセスサービスシステム研究所 光アクセス基盤プロジェクト 大高明浩プロジェクトマネージャならびに、同プロジェクト 光アクセス基盤 SE グループ 鈴木謙一グループリーダーに深謝いたします。また、防衛大学校 葉玉寿弥教授（元光アクセスシステムプロジェクト プロジェクトマネージャ）、千歳科学技術大学 吉本直人教授（元同プロジェクト プロジェクトマネージャ）、NTT デバイスイノベーションセンタスマートコネクショントデバイスプロジェクト 木村俊二プロジェクトマネージャ（元同プロジェクト 次世代アクセスシステムグループ グループリーダー）には、本研究の機会を与えていただくとともに、多くの御指導、および御激励をいただきました。ここに謹んで感謝の意を表します。

本論文における半導体光増幅器の TDM-PON システム適用に関する研究においては、その一部を情報通信研究機構 (NICT: The National Institute of Information and Communications Technology)の委託研究「広域加入者系光ネットワーク技術の研究開発」を受託する形で行いました。2009 年から 2011 年までの 3 年間、鈴木謙一グループリーダー、NTT アドバンステクノロジー株式会社 石井比呂志担当部長（元光アクセスシステムプロジェクト フルサービスアクセスグループ 主幹研究員）、東日本電信電話株式会社 今井健之主査（元同グループ 研究主任）には、研究業務を進めていく上で多くの御指導、御助言、および御協力をいただきました。さらに、藤原正満主任研究員には、入社以来 3 年間、指導者として光伝送技術の基礎や評価手法から、研究の進め方や論文執筆の作法に至るまで、多岐にわたり懇切なる御指導を賜りました。ここに感謝申し上げます。また、本研究の委託元である NICT の関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

本論文における半導体光増幅器の 40 Gbit/s 級 TWDM-PON システム適用に関する研究においては、その一部を、総務省の委託研究「超多分岐・低消費電力光ネットワーク技術の研究開発」を受託する形で行いました。2012 年から現在まで、木村俊二プロジェクトマネージャ、鈴木謙一グループリーダー、石井比呂志担当部長には、引き続き多くの御指導、および御助言を、可児淳一特別研究員、吉田智暁主幹研究員、吉野學主任

研究員、藤原正満主任研究員、金子慎主任研究員、原一貴研究員、木村英明研究員、妹尾由美子研究員、胡間遼研究員、坂上裕希研究員には研究を進めるにあたり、多くのご協力をいただきました。さらに、浅香航太主任研究員、中村浩崇主任研究員には、上司として光デバイスやバースト光伝送方式の基礎から波長可変光デバイスやトランシーバ開発に至るまで、多岐にわたり懇切なる御指導を賜りました。ここに感謝申し上げます。また、本研究の委託元である総務省の関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

著者が学部生時代に御指導を賜り、光ファイバ通信分野に強い興味を持つきっかけを提供していただいた芝浦工業大学 加島宜雄名誉教授、堀口常雄教授、ならびに大学院博士前期過程において御指導を賜り、研究の醍醐味を教えていただいた、電気通信大学大学院 三木哲也名誉教授、來住直人教授、大木英司教授、松浦基晴准教授に深謝いたします。

技術者として働く背中によって、工学に対する強い興味と憧れを持つきっかけを提供してくれた父、これまで経済的に支援してくれた母、およびこれまでに御支援いただいた多くの皆様に深く感謝いたします。最後に、日々献身的にサポートしてくれる妻 麻梨、長男 琥大、および日々の子育てをサポートしていただいている義父母に深く感謝いたします。