

平成 26 年 5 月 22 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560466

研究課題名 (和文) 光アクセス網における反射型双方向ポンブラマン増幅の研究

研究課題名 (英文) Investigation of bidirectional pump amplification in passive optical access network

研究代表者

加島 宜雄 (kashima, Norio)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：50306924

交付決定額 (研究期間全体) : (直接経費) 4,400,000 円、(間接経費) 1,320,000 円

研究成果の概要 (和文) : PONで構成された光アクセス網にラマン増幅を適用する事を検討した。ポンプ光反射器を用いたラマン増幅を提案し、光反射器の効果について検討した。さらに、10G-EPON (XG-PON) の高度化のため、分布ラマン増幅の他にファイバ型の増幅も用いるハイブリッドラマン増幅を提案した。ハイブリッド増幅を用いた伝送特性についての検討も行った。アクセス網では多くの接続点が存在し、MPIの原因となり、伝送特性の劣化が懸念される。このMPIは一般に光増幅で強調される。劣化を定量的に評価し、接続点の反射係数の要求値を明確化した。

研究成果の概要 (英文) : We have studied Raman amplification in passive optical networks(PON). We proposed a use of a reflector, which reflects pump wave for Raman amplification, to mitigate pump power. We also studied the upgrade of 10G-EPON (XG-PON) systems using the proposed fiber based hybrid-Raman amplification. For hybrid-Raman amplification, we use an Erbium-doped fiber and a high-nonlinear fiber. In access networks, there are many splices and connectors. These reflect signal waves and may cause a multipath interference(MPI). We evaluate required reflection coefficients of splices and connectors.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学：通信・ネットワーク工学

キーワード：光アクセス網 ラマン増幅 光増幅 PON

1. 研究開始当初の背景

高速のイーサネットの普及やさらなるインターネットの伸びに支えられ、より高速な光アクセス網が要求される状況にある。高速な光アクセス網の研究は、現在 日本、韓国、シンガポール、中国などのアジアと米国、カナダの北米、さらにオーストラリアで盛んに行われている。現在、実用化されているアクセス網の構成はPON (passive optical network)、細かく分類するとSTM-PONである。この網の高速化として各種の検討がされている。いずれにしても高速に向かうと、高い光受信レベルが要求される。光増幅の一種であるラマン(Raman)増幅は半導体形の増幅素子である SOA (Semiconductor Optical Amplifier) と共に EDFA よりも前から研究されてきた。ラマン増幅は、光中継系にEDFAの後から導入されている。ラマン増幅の利得は大きくないが、伝送用の光ファイバそのものを利得媒体として利用できるというメリットがある。しかし、アクセス網での検討はほとんどされていない。

2. 研究の目的

近年の趨勢から、より高速な光アクセス網が必要とされると予測できる。高速化に伴う高光受信レベルのため光増幅が要求されると考えられる。EDFA で代表される光ファイバアンプを使用することも1案である。しかし、電力を必要とする能動(active)装置であるため受動(passive)部品で構成される分岐型光アクセス網のPON (passive optical network) のメリットが失われる。すなわち、保守や信頼性の観点から望ましくない。本研究は、Passive な特徴を生かせるラマン増幅を採用し、片側(局側)からポンプ光を入射するが実効的に双方向入射とする効率的な増幅法を研究し、保守、信頼性に優れた経済的な光アクセス網を構築することを目的とする。これにより、高精細な動画などを高速に伝送でき、企業活動の円滑化、医療や教育の地域格差の解消、在宅での医療など高齢化社会への対応に貢献できる。

3. 研究の方法

光アクセス網の伝送路内にポンプ光を反射し信号光を通過する光バンドパスフィルタ(波長フィルタ)を挿入するユニークな構成を提案し、この構成をSTM-PON(時分割のPON)やWDM-PON(波長多重のPON)に適用した場合の増幅度や光SNR(OSNR)を理論的に検討する。一方、実験装置の制約があるが、理論検討した結果をできるだけ実験的にも検証する。

4. 研究成果

中継系への適用を想定して古くから研究されているラマン増幅であるが、多くの接続箇所を持ち、複雑な網構成を持つアクセス網へ適用する研究は未解決な課題が多く、中継系と異なる特徴を持つ。このため以下の課題について研究した。

(1) 反射型双方向ポンブラマン増幅
提案した反射器 R を持つ反射型双方向ポンブラマン増幅の構成を図1に示す。スターカプラー

(SC)の前に反射器Rを配置し、局(CO)からのポンプ光を反射させることでポンプ光の効率化を行うと共に各加入者にポンプ光が届かないための光フィルタの機能も持つ。

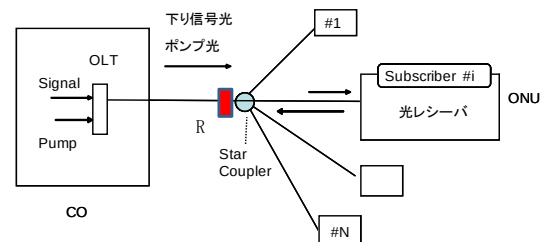


図1 反射器 R を持つラマン増幅の適用

理論検討のためにラマン増幅の波長依存性の測定を行った。中継系と異なり、アクセス系では信号波長が離れているため、ポンプ光と信号光の波長配備により増幅だけでなく減衰も起こりうるので広い波長範囲で測定した。結果を図2に示す。測定結果はポンプ光波長(中心波長 1472nm)の位置で上下反転するほぼ奇関数の形状を示し、理論上奇関数になるという事実とほぼ一致した。

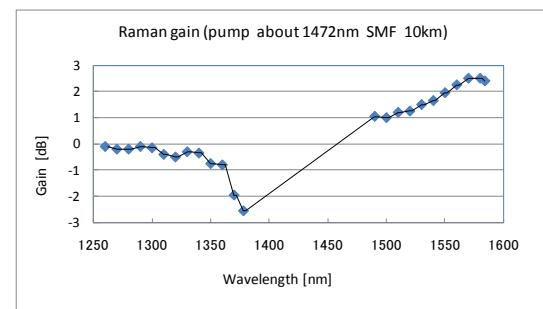


図2 ラマン増幅の波長依存性の測定結果

この結果をもとに計算機による数値シミュレーションを行った。光反射器Rの有効性を表わすために改善比を次式で定義した。

$$\text{改善比} = \frac{P_{sW}}{P_{sWO}} \quad (1)$$

ここで、 P_{sW} は反射器を使用した場合の信号光パワーを、 P_{sWO} は反射器を使用しない場合の信号光パワーを表わす。計算には、光線路損失を 0.2dB/km とし、信号光波長を 1554nm、ポンプ光波長を 1480nm とした。ポンプパワーは 300mW と 600mW とし、信号パワーは 1mW とした。反射係数は $R=0.5$ と 1 とした。図3に伝送距離Lの関数

として計算結果を示す。R の値が大きい時、ポンプパワーが大きい時に大きな改善比が得られている事が分かる。改善比 > 1 なので、反射器によりラマン利得が増強されている事が分かるが、その効果に距離依存性があることが図 3 から分かる。短距離では反射器による双方向増幅が有効に働かない事、遠距離ラマン（L > 20km など）ではファイバの損失でポンプ光パワーの減衰で有効に働かない事が分かる。

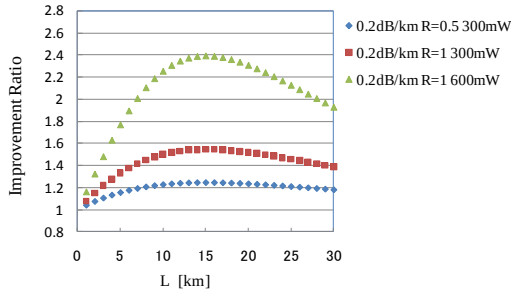


図3 改善比の伝送距離依存性(反射器の効果)

古くから増幅のある長波長側（ストークス光）についてはよく検討されていて、その結果、信号光の放出率 W_{emit} と吸収率 W_{abs} は以下の様になる。

$$W_{emit} \propto \left| \langle n_p - 1, n_s + 1, 1 | a_p a_s^+ a_v^+ | n_p, n_s, 0 \rangle \right|^2 = n_p (n_s + 1) \quad (2)$$

$$W_{abs} \propto \left| \langle n_p + 1, n_s - 1, 0 | a_p^+ a_s a_v | n_p, n_s, 1 \rangle \right|^2 = (n_p + 1) n_s \quad (3)$$

ここで、 a, a^+ は光子の消滅、生成演算子、 a_v, a_v^+ はホソンの消滅、生成演算子である。ここで n_p はポンプ光の光子数、 n_s はストークス光の光子数である。ホソンのエネルギー状態は基底状態 0 及び励起状態 1 である。これから、ストークス光 n_s について次式が導き出される。

$$\frac{dn_s}{dt} = gn_s + \frac{g}{1 - \exp(-h\Delta f_s / k_B T)} \quad (4)$$

$$\Delta f_s = f_p - f_s \quad (> 0) \quad (5)$$

ここで、 g は利得を表わし、 h, k_B, T はプランク定数、ボルツマン定数、絶対温度を表わす。また、 f_p と f_s はポンプ光および信号光の周波数である。

短波長側（アンチストークス光の光子数 n_{as} ）については導出されていないので同じ考えのもとで新たに次式のように導出した。

$$\frac{dn_{as}}{dt} = -gn_{as} - \frac{g}{1 - \exp(-h\Delta f_{as} / k_B T)} \quad (6)$$

$$\Delta f_{as} = f_p - f_{as} \quad (< 0) \quad (7)$$

図 2 の測定したラマン増幅係数から雑音光の波長特性を計算し、計算結果をチェックするため、チューナブル LD 光を信号光として、雑音光 (ASE) の測定を行った結果、計算と実験は比較的良い一致であった。この結果をもとに利得、OSNR を計算した。図 4 に $R = 1$ (反射率 100%) と $R = 0$ の場合の OSNR の結果を示す。また、利得と OSNR の測定も行い図 5 の結果を得た。

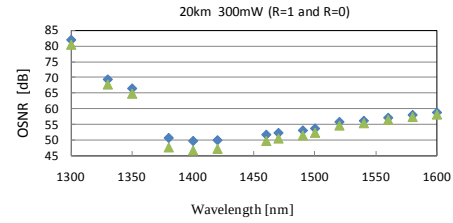


図 4 OSNR の波長依存性の計算結果
(20km 300mW △が R=1)

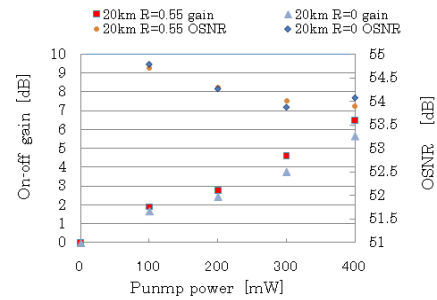


図 5 利得及び OSNR の測定結果
(20km R=0, R=0.5)

これらをもとにいくつかの PON システムにつき数値シミュレーションを行った。1 例を図 6 に示す。距離 $L=20\text{km}$ 、分岐数 128 (この時の SC の損失 22dB)、光線路損失 0.2dB/km (at 1550nm) 0.3dB/km (接続損失など)、下り信号波長 1580nm、

上り信号波長 1270nm、2 ポンプ光波長 1480nm,1200nm で、下り 1 信号、上り 1 信号光パワー すべて 5dBm である。この場合、1580nm の下り信号は 1480nm のポンプ光で増幅されるが、1200nm のポンプ光からの影響は無い。一方、1270nm 上り信号は 1200nm のポンプ光で増幅され、1480nm のポンプ光で減衰する。

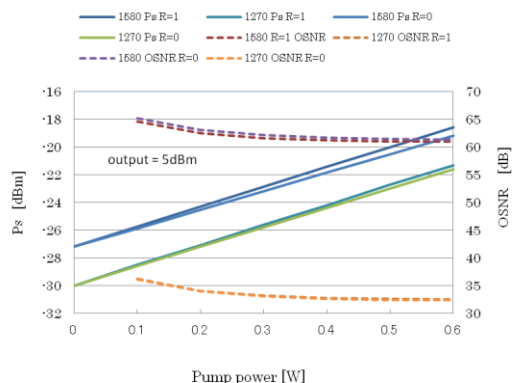


図 6 Ps、OSNRの計算結果

(2) ハイブリッドラマン増幅

10G-EPON(XG-PON)の高度化（高速化、長距離化、分岐数の増大化など）をするために光増幅の適用を検討した。ラマン増幅は優れた特性を持つが、欠点として増幅度が低く、その適用は限られる。高度化するシステムによっては大きな増幅が必要になると思われる。このため、図 7 に示すハイブリッド構成を提案する。10G-EPON の 1577nm の下り信号光を増幅するため局から 1480nm のポンプ光と 1577nm の下り信号光を伝送させる。1480nm のポンプ光は通常の伝送ファイバで分布ラマン増幅(DRA)し、さらに EDF のポンプ光として作用し、DRA と EDFA のハイブリッド増幅を形成する。伝送ファイバの距離が長いと局からの 1480nm のポンプ光はファイバ損失などで減衰し、EDF のポンプ光として機能するだけのポンプパワーが得られない状況になりうる。この場合は契約した加入者もしくは何らかの手段を用いて、加入者側から 980nm のポンプ光を供給する。伝送路にはEDFのみであるため、passive な PON の特長を有する。一方、上りの 1270nm 信号は、局側から分布ラマン増幅(DRA)のため 1210nm のポンプ光を供給する。また、集中型のラマン増幅(LRA)を構成し、局

側で光プリアンプとして使用する。

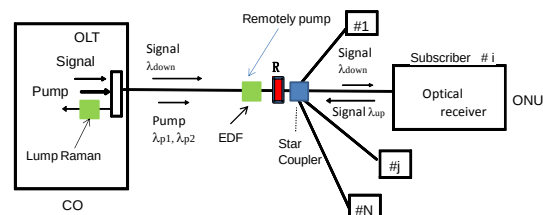


図7 10G-EPON へのハイブリッドラマン増幅の適用

980nm と 1480nm の両方のポンプ光を用いる EDFA は 1991 から 1992 年に検討されているが実験結果のみで特性を説明する理論的な検討は無いので、新たに簡単な理論を構築した。図 8、図 9 に 980nm と 1480nm の両方のポンプ光が存在する場合の利得と OSNR の計算結果(CAL)と実測結果（ファイバ長 21m で、市販品のため信号光波長 1565nm で実験）を示す。構築した理論による計算は実測の傾向をよく説明している。1480nm が 4mW になった場合、980nm を 10~20mW 程度供給する事で 20dB を超える増幅が得られる事が分かる。

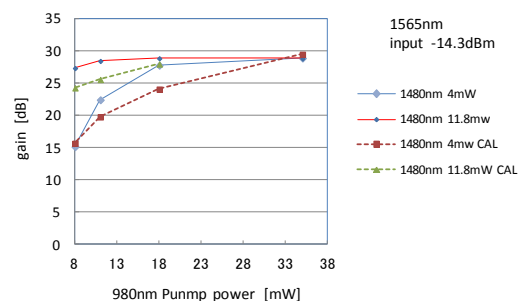


図8 利得とポンプパワーの関係（CAL は計算値）

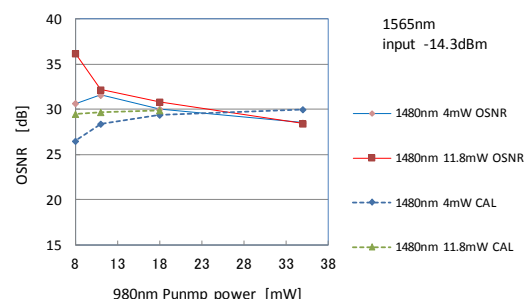


図9 OSNRとポンプパワーの関係（CAL は計算値）

ハイブリッドラマン増幅で 伝送実験を行い、下り信号特性、上り信号特性を図 10、11 に示す。

下り信号の場合、光増幅の無い場合、DRA、EDFA、ハイブリッド増幅(1480nmのみ276mW)、ハイブリッド増幅(1480nm は180mWと、980nmは5mW)の各場合の測定結果を示す。また、上り信号では、光増幅の無い場合、DRA、DRA +LRAの各場合の測定結果を示す。なお、LRA増幅媒体として、実験室にある高非線形ファイバ (HNLF)を用いた。許容減衰値減衰値=増幅値となると予測され、これらの測定結果はそれを実証している。

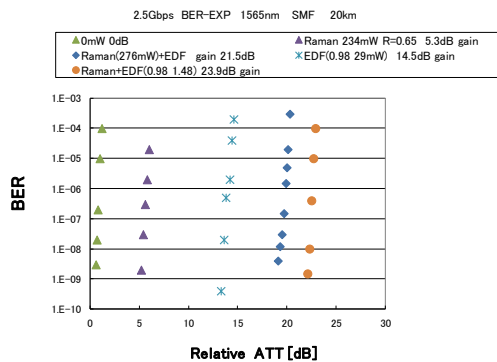


図10 誤り率の測定結果(下り信号)

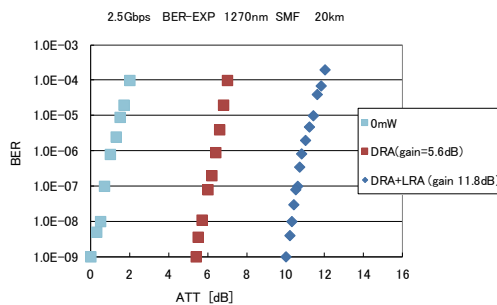


図11 誤り率の測定結果(上り信号)

(3) ラマン増幅のPONでの反射の影響

光アクセス網では多接続箇所を持つ複雑な光伝送路であり、接続部の反射による伝送劣化が光増幅で増長される。接続部の反射による伝送特性劣化を伝送のパワーペナルティ ΔP で評価する。先行研究をもとに光増幅を持つアクセス網に適用できるように修正をした。 ΔP は次式で表わされる。

$$\Delta P = -10\log(1 - R_c Q^2) \quad (8)$$

ここで、 $Q=5.9$ が $BER=10^{-9}$ に対応する。 R_c は 2つの場合を想定した。多数の接続点がある中で最

近接のペアのみ考え、同一偏光状態と見なして $P=1$ とする (式 9)。他方、すべての接続ペアの組み合わせを考え、 P は 0 から 1 まで変化すると考えられるので $P=0.5$ とする (式 10)。

$$R_c = \alpha^2 G^2 R^2 (N-1)P \quad (9)$$

$$R_c = 0.5\alpha^2 G^2 R^2 N(N-1)P \quad (10)$$

α, G, R, N, P は損失係数、利得係数、反射係数、接続点数、偏光の効果を表わす。理論式の妥当性を調べるため、実験を行い計算と実測値はおおむね良好な一致を得た。この結果をもとに接続点の反射係数への 1 dB パワーペナルティの場合の許容接続点反射係数値要求値を定量的に求める。GL = 1 を用いて $\Delta P=1\text{dB}$ の場合の反射係数 R を計算した結果を図 12 に示す。横軸は接続点数で距離 $L=20\text{km}$ とした。また、ポンプパワーは 600mW で採用したモデルはより厳しい式 (10) で計算した。 $Q=5.9$ ($BER=10^{-9}$)の他に FEC の採用も考慮して $Q=3.8$ ($BER=5 \times 10^{-5}$)の場合の結果も合わせて示している。接続点数 $N=300$ は等接続点間隔の場合、接続点間隔 $S=67\text{m}$ となる。 $\Delta P=1\text{dB}$ の場合の反射係数 R は 600mW の場合 概ね -33dB である。融着接続は良好な反射特性を持つが、実際にアクセス網で使用されているメカニカルスプライス、光コネクタにおいてもこの要求値を満足している。

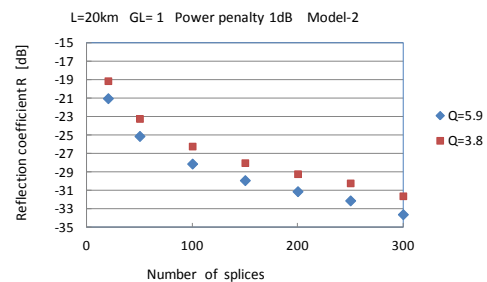


図12 反射係数要求値の接続点数依存性

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 7 件)

[1] N. Kashima, "Transmission Properties of Passive Optical Network using hybrid-Raman amplifiers" J. of Opt. Commun, 査読有, vol.35, No.1, pp1-7, 2014

March DOI:10.1515/joc-2013-0067

- [2] N. Kashima, "Bidirectional lump Raman amplification for both 10G-EPON and TWDM-PON", IEICE Communication Express, 査読有 vol.3, No.2, pp39-43, 2014.2.3 DOI:10.1587/comex.3.39
- [3] N. Kashima, "Upgrade of Passive Optical Network using Raman Amplification" J. of Opt. Commun, 査読有 vol.34, No.4, pp315-323, 2013 DOI: 10.1515/joc-2013-0039
- [4] N. Kashima, "Fiber design consideration for lump Raman amplification in passive optical networks", IEICE Communication Express, 査読有 vol.2, No.11, pp496-500, 2013.11.21 DOI:10.1587/comex.2.496
- [5] N. Kashima, "Study of multipath interference of passive optical networks using hybrid-Raman amplifiers, IEICE Communication Express, 査読有 vol.2, No.6, pp263-267, 2013.6.24 DOI: 10.1587/comex.2.263
- [6] N. Kashima, "Feasibility study of hybrid-Raman amplifier for passive optical networks", IEICE Communication Express, 査読有 vol.2, No.3, pp118-122, 2013 DOI:10.1587/comex.2.118
- [7] N. Kashima, "Application of Raman Amplification using a Reflector in Passive Optical Networks", J. of Opt. Commun, 査読有 vol.33, No.4, pp265-272, 2012 DOI:10.1515/joc-2012-0054

[学会発表] (計 14 件)

- [1] 加島宜雄 "ハイブリッドラマン増幅を用いたPONにおける光パースト特性の検討" 電子情報通信学会全国大会B-13-35、2014.3.20 新潟大学
- [2] 加島宜雄, "ハイブリッドラマン増幅を用いたパッシブ光アクセス網の接続反射特性の検討" 電子情報通信学会技術研究報告 光ファイバ応用技術 OFT 2013-206 p.11-14 2014.2.27 ネストホテル那覇
- [3] 加島宜雄, "ハイブリッドラマン増幅によるパッシブ光アクセス網の高度化" 電子情報通信学会技術研究報告 光ファイバ応用技術 OFT 2013-31 p.43-46 2013.10.24 エルトピア奈良
- [4] 加島宜雄 谷澤健二 松岡諒 "ハイブリッドラマン増幅PONへのEDF励起方式の検討(1)" 電子情報通信学会通信ソサイエティ大会 B-13-34、2013.9.20 福岡工大
- [5] 加島宜雄 "ハイブリッドラマン増幅を用いたPONにおける下り方向特性の検討" 電子情報通信学会通信ソサイエティ大会 B-13-35、2013.9.20 福岡工大
- [6] 加島宜雄, "10G-EPON高度化のためのハイブリッドラマン増幅の検討" 電子情報通信学会技術研究報告 光ファイバ応用技術 OFT 2013-8 p.33-36 2013.5.23 まりんびあ宮古
- [7] 加島宜雄 "パッシブ光アクセス網における反射器を用いたラマン増幅の伝送特性" 電子情報通信学会全国大会 B-13-37、2013.3.21 岐阜大学
- [8] 加島宜雄, "ポンプ光反射器を用いたラマン増幅のパッシブ光アクセス網への適用" 電子情報通信学会技術研究報告 光ファイバ応用技術 OFT 2012-61 2013.1.24 アスティとくしま
- [9] 加島宜雄, "パッシブ光アクセス網におけるポンプ光反射器を用いたラマン増幅の検討" 電子情報通信学会技術研究報告 光ファイバ応用技術 OFT 2012

—23 2012.10.25 海峡メッセ下関

- [10] 加島宜雄 "PONを用いたアクセス網のラマン増幅のASE、OSNRの波長依存性" 電子情報通信学会通信ソサイエティ大会 B-13-38、2012.9.14 富山大学
- [11] 加島宜雄 "ラマン増幅の偏光および波長依存性の検討" 電子情報通信学会全国大会 B-13-18、2012.3.20 岡山大学
- [12] 加島宜雄、佐々木 悠三、遠藤 宏紀、"PONを用いた光アクセス網におけるラマン増幅の検討" 電子情報通信学会技術研究報告 光ファイバ応用技術 OFT 2011-64 2012.1.19 サンポートホール高松
- [13] 佐々木悠三、加島宜雄、"PONを用いたアクセス網におけるラマン増幅の検討(6)" 電子情報通信学会通信ソサイエティ大会B-13-32、2011.9.14 北海道大学
- [14] 遠藤宏紀、加島宜雄、"PONを用いたアクセス網におけるラマン増幅の検討(5)" 電子情報通信学会通信ソサイエティ大会 B-13-31、2011.9.14 北海道大学

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加島 宜雄 (KASHIMA Norio)
芝浦工業大学工学部通信工学科教授
研究者番号：50306924

(2) 研究分担者

()
研究者番号：

(3) 連携研究者

()
研究者番号：