

博士論文概要

論文題目

超広波長域光ファイバ伝送技術の研究

Studies on Optical Fiber Transmission Technologies
Utilizing the Ultrawide Wavelength Range

申請者

氏名

可児	淳一
Junichi	Kani

専攻・研究指導
(課程内のみ)

2005 年 5 月

1. 背景と目的

半導体レーザと光ファイバを用いて光で信号を伝送する「光ファイバ伝送システム」は、1975年に初めて実用化された。その後高速化が進むとともに、1990年頃には、エルビウム添加光ファイバ増幅器（EDFA：Erbium-doped Fiber Amplifier）の開発で、光の信号を電気に戻すことなく長距離の光伝送を行うことが可能となった。一方、通信事業者ビルと各加入者宅を結ぶアクセスラインを光化するFTH（Fiber To The Home）も1980年代後半から注目され、1997年には、光スプリッタで各ユーザへの光信号を分配し、一本の光ファイバを複数のユーザが共有するアクセスシステムが実用化された。

これらの光伝送システム、光アクセスシステムの進展を支えてきた方式は、時間分割多重（TDM：Time-division multiplexing）方式、すなわち、複数のデータを、高速の電子回路によって、分割された時間領域に多重してゆく方式であったと言えることができる。本研究を開始した時点において、10ギガビット/秒（Gbps）のTDM光伝送システム、および、155メガビット/秒（Mbps）の総帯域を32人が時間分割で共有するTDM光アクセスシステムが開発されていた。

研究レベルにおいては、さらなる高速化を目指して、40Gbps超のTDM光伝送やギガビット超のTDM光アクセスを実現する高速電子回路の研究開発が進展する一方で、電子回路による速度限界を打破するために、波長多重（WDM：Wavelength-division multiplexing）伝送技術が注目されつつあった。波長の異なる複数の光信号を、光受動部品（波長合分波器）で多重分離するWDMは、信号のフォーマットやプロトコルに依存しない多重、また、電気回路の処理速度に制約されない多重を可能とするため、TDMによって多重された光信号を、さらに多重することができる。

しかしながら、EDFAの約30nmの利得帯域を利用した場合の波長多重数は、非線形効果による信号品質劣化、光源波長・波長合分波器の安定度等を考えると、8～32程度に制限される。特に、通信事業者ビル間を繋ぐ地域リングネットワークでは、波長の活用によって、伝送容量の増大のみならず、任意の通信経路を直接波長で接続できることを考えると、波長多重数の増大が期待される。また、事業者ビルと各加入者を繋ぐアクセスネットワークでは、分岐点に光スプリッタを用いた既存設備を有効活用した、新たな波長軸の活用法が期待される。

以上のような背景から、本研究では、光ファイバが有する広大な低損失波長帯域を有効に活用するための新たな光ファイバ伝送技術を確立することを目的として、以下に述べる超広波長域WDM伝送技術、および、超広波長域WDM伝送のための光デバイス技術、ならびに、コヒーレンス多重伝送技術に関する検討を行った。

2．超広波長域WDM伝送技術

E D F A の約 30 nm の利得帯域を利用した場合の波長多重数は、非線形効果による信号品質劣化、光源波長・波長合分波器の安定度等を考えると、8～32 程度に制限される。このため、利用波長域の拡大によって波長数を増大するための技術について検討した。

最初に、E D F A の利得帯域（C バンド）より短波長側の S バンドにおける W D M 伝送の実現性について述べる。ここでは、国内に広く敷設される分散シフトファイバにおいて、C バンド以外のバンドを利用することで極めて良好な伝送特性が得られることを、あわせて明らかにする。ツリウム添加ファイバ増幅器（T D F A）を用いて S バンドでの W D M 伝送実験を行い、120 km の分散シフトファイバ上で 10 Gbps × 8 波長の W D M 伝送が実現できることを示す。

次に、複数のバンドを同時に用いた超広波長域 W D M 伝送に関する検討結果を示す。波長の離れた複数のバンドの光信号間で生じるバンド間非線形効果によって、光信号に劣化が生じることを定量的に解明するとともに、双方向伝送によってこの劣化を抑圧する方式を提案したので、その内容を詳述する。

さらに、光ファイバ種別毎に、バンド内非線形効果およびバンド間非線形効果による光信号劣化を最小化し、100 nm を越える超広波長域 W D M 伝送を実現するための設計指針を提案したので、これを詳述する。最後に、この指針に基づいて、S バンド、C バンド、L バンド（C バンドの長波長側）を同時に利用し、240 km の分散シフトファイバ上で 10 Gbps × 54 波長の W D M 伝送が実現できることを示す。

3．超広波長域WDM伝送のための光デバイス技術

超広波長域 W D M 伝送を実現するためには、上記の伝送技術に加えて、光デバイス技術の研究開発が重要となる。具体的には、S バンドでこれまでに報告されていない 30 nm 以上の広帯域光増幅技術、および、波長数の増加に伴って種類が増えることを回避するための、波長可変レーザ技術に関して検討を行った。

S バンドの広帯域光増幅技術に関しては、T D F A の特性である、波長に対する利得の傾きを補正するとともに、増幅帯域を大幅に拡大する技術について検討した。T D F A とラマン増幅を併用するハイブリッド光増幅方式を提案し、これにより、1460～1510 nm において、平坦な利得を有する超広帯域光増幅器を実現できたのでこの結果を示す。

波長可変レーザ技術については、従来用いられている分布帰還型（D F B）レーザでは、2～3 nm 毎に異なる種類のレーザを用いる必要があったために、より広い範囲で波長を可変するための広帯域リングレーザ技術について検討した。設計パラメータ明確化し、これにより、20 nm に渡る広帯域において、低雑音（相対強度雑音 < -130 dB / Hz）および高波長設定精度（±1.5 GHz）の特性を実現できたのでこの結果を示す。

4．コヒーレンス多重伝送技術

事業者ビルと各加入者を繋ぐアクセスネットワークにおいても、波長軸の活用による高度化が期待される。WDM技術を適用し、各ユーザが異なる波長を占有する方式が提案されているが、コスト要求の厳しいアクセスネットワークにおいては、波長合波器や波長指定光源の経済化が課題となる。このため、経済的な光源と簡単な光回路によって、WDMとは異なる方法で広大な波長帯域を利用でき、分岐点に光スプリッタを用いた既存設備を有効活用できる技術として、光源のコヒーレンス長を利用して光信号の多重を行うコヒーレンス多重伝送技術の可能性について検討した。

最初に、コヒーレンス多重伝送において光信号を劣化させる雑音要因を体系的に明らかにする。これをもとに、実現可能な伝送速度、多重数、伝送距離を定量化し、7 kmのシングルモードファイバ上で、155 Mbps \times 8 ~ 12 多重のコヒーレンス多重伝送が可能であることを示す。

次に、コヒーレンス多重を適用したアクセスネットワークのシステム構成について述べる。エンコーダ/デコーダを兼用し、1つの光回路で双方向通信を行うシステム構成を提案したので、これについて述べる。

最後に、検証実験について述べる。7 kmのシングルモードファイバ上で、155 Mbps \times 8 ユーザのコヒーレンス多重伝送を実現できることを示す。

5．まとめ

以上に述べたように、本論文では、広大な波長帯域を有効に活用するという視点で、光ファイバ伝送技術に関して行った研究結果をまとめる。本研究と対照的なアプローチとして、限られた帯域を効率的に活用する検討（例えばWDMの波長間隔を12.5 ~ 25 GHz 間隔に狭める検討）も進んでいる。また、短距離伝送に用途を限定し、光増幅器の帯域にとらわれずに波長間隔を非常に広く（20 nm）設定するとともに、本論文で述べるよりさらに広い波長域を利用してWDMを行う方式も登場している。波長間隔の拡大で、従来WDM伝送で用いてきた温度による光源波長の安定化を不要化し、光源の経済化を実現できる。

このような中で、第2章、第3章で検討した超広波長域WDM伝送は、光増幅器を複数種類利用するという点でコスト面の課題があるが、光増幅器を利用する既存の中長距離WDM伝送に柔軟に拡張性を提供できる点が特色である。最近では、Cバンドに加えてLバンドを利用した中長距離WDM伝送システムが開発され、実用に供している。将来的にはSバンドまでの拡張が行われ、そこで本研究で確立した技術が活用されることが期待される。また、第4章で取り上げたコヒーレンス多重伝送は、ギガ以上の高速信号の多重には課題があるが、経済的な構成で、TDMで必要となる時間スロット制御、および、WDMで必要となる光源の波長指定を、共に不要化できることが特色である。以上に述べた本研究の成果が、光伝送システムのさらなる進展への一助となることを確信している。

研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	<p>J. Kani, K. Iwatsuki, "A wavelength-tunable optical transmitter using semiconductor optical amplifiers and an optical tunable filter for metro/access DWDM applications," IEEE Journal of Lightwave Technology, 23, pp. 1164-1169, March, 2005. (本論文)</p> <p>J. Kani, K. Iwatsuki, N. Takachio, N. Fujii, "A simple broad-band coherence multiplexed optical access network and its scalability," IEEE Journal of Lightwave Technology, 19, pp. 456 -464, April 2001. (本論文)</p> <p>J. Kani, M. Jinno, T. Sakamoto, S. Aisawa, M. Fukui, K. Hattori, K. Oguchi, "Interwavelength-band nonlinear interactions and their suppression in multiwavelength-band WDM transmission systems," IEEE Journal of Lightwave Technology, 17, pp. 2249 -2260, November 1999. (本論文)</p> <p>J. Kani, K. Hattori, M. Jinno, T. Kanamori, K. Oguchi, "Triple-wavelength-band WDM transmission over cascaded dispersion-shifted fibers," IEEE Photonics Technology Letters, 11, pp. 1506 -1508, November 1999. (レター)</p> <p>【招待論文】 J. Kani, T. Sakamoto, M. Jinno, K. Hattori, M. Yamada, T. Kanamori, K. Oguchi, "Novel 1470-nm-band WDM transmission and its application to ultra-wide-band WDM transmission," IEICE Transaction on Communications, vol.E82-B, pp. 1131-1140, August 1999. (本論文)</p> <p>J. Kani, M. Jinno, "Wideband and flat-gain optical amplification from 1460 to 1510 nm by serial combination of a thulium-doped fluoride fibre amplifier and fibre Raman amplifier," IEE Electronics Letters, 35, pp. 1004-1006, June 1999. (レター)</p> <p>J. Kani, M. Jinno, T. Sakamoto, K. Hattori, K. Oguchi, "Bidirectional transmission to suppress interwavelength-band nonlinear interactions in ultrawide-band WDM transmission systems," IEEE Photonics Technology Letters, 11, 376-378, March 1999. (レター)</p> <p>J. Kani, K. Hattori, M. Jinno, S. Aisawa, T. Sakamoto, K. Oguchi, "Trinal wavelength band WDM transmission over dispersion-shifted fibre," IEE Electronics Letters, 35, pp. 321-322, February 1999. (レター)</p> <p>J. Kani, M. Jinno, K. Oguchi, "Fibre Raman amplifier for 1520 nm band WDM transmission," IEE Electronics Letters, 34, pp. 1745-1747, September 1998. (レター)</p> <p>J. Kani, T. Sakamoto, M. Jinno, T. Kanamori, M. Yamada, K. Oguchi, "1470 nm band wavelength division multiplexing transmission," IEE Electronics Letters, 34, pp. 1118-1119, May 1998. (レター)</p>
国際会議 (査読あり)	<p>【IEEE LEOS Japan Chapter Young Scientist Award】 J. Kani, M. Teshima, K. Iwatsuki, "A wavelength-tunable optical transmitter using semiconductor optical amplifiers and an optical tunable filter for metro/access DWDM applications," OSA 14th Topical Meeting on Optical Amplifiers and Their Applications (OAA), 6-9 July 2003, Otaru, Japan, ThB5.</p> <p>【招待講演】 J. Kani, H. Suzuki, M. Teshima, N. Takachio, K. Iwatsuki, "Triple-wavelength-band WDM transmission technologies," Optical Fiber Communication Conference (OFC), 17-22 March 2002, Anaheim, U.S., TuR-5 (pp. 122-123).</p> <p>J. Kani, K. Iwatsuki, N. Takachio, N. Fujii, "A simple broadband optical access network using coherence multiplexing," 13th International Symposium on Services and Local accesS (ISLS), 18-23 June 2000, Stockholm, Sweden, Session 14-4.</p> <p>J. Kani, K. Hattori, M. Jinno, T. Kanamori, K. Oguchi, "Triple-wavelength-band WDM transmission over cascaded dispersion-shifted fibers," OSA 10th Topical Meeting on Optical Amplifiers and Their Applications (OAA), 9-11 June 1999, Nara, Japan, WC2 (pp. 26-29).</p>

研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
国際会議 (査読あり、 続き)	<p>J. Kani, K. Hattori, M. Jinno, S. Aisawa, T. Sakamoto, K. Oguchi, "Trinal-wavelength-band WDM transmission over dispersion-shifted fiber," Optical Fiber Communication Conference (OFC), 21-26 Feb. 1999, San Diego, U.S., vol.2, pp. 159-161.</p> <p>【Best Paper Award】 J. Kani, T. Sakamoto, M. Jinno, T. Kanamori, M. Yamada, K. Oguchi, "Novel 1470 nm band wavelength division multiplexing transmission," 3rd Optoelectronics and Communications Conference (OECC), 12-16 July 1998, Chiba, Japan, pp. 406-407.</p> <p>J. Kani, M. Jinno, T. Sakamoto, K. Hattori, K. Oguchi, "Bi-directional transmission to suppress inter-wavelength-band nonlinear interactions in ultra-wide band WDM transmission systems," 3rd Optoelectronics and Communications Conference (OECC), 12-16 July 1998, Chiba, Japan, pp. 412-413.</p>
講演	<p>可児、岩月、高知尾、藤井、「PLC 型光エンコーダ/デコーダを用いたコヒーレンス多重光アクセスネットワーク」、電子情報通信学会 光エレクトロニクス研究会, OPE2001-9.</p> <p>可児、岩月、高知尾、藤井、「コヒーレンス多重を用いたシンプルな広帯域光アクセスネットワークとその実現規模」、電子情報通信学会 交換システム研究会(光通信研究会共催), SSE2000-212.</p> <p>可児、岩月、高知尾、藤井、「コヒーレンス多重を用いたシンプルな広帯域光アクセスネットワーク」、電子情報通信学会 2000 年秋季通信ソサイエティ大会, 2, 288 (B-10-65).</p> <p>可児、服部、神野、相澤、阪本、小口、「3 波長帯域を利用した分散シフトファイバ上 WDM 伝送」、電子情報通信学会 1999 年春季全国大会, 2, 490-490.</p> <p>可児、神野、「1520nm 帯 WDM 増幅用ファイバラマン増幅器の検討」、電子情報通信学会 1998 年秋季通信ソサイエティ大会, 2, 482-482.</p> <p>可児、神野、阪本、福井、小口、「超広帯域 WDM 伝送における非線形光学効果とその抑圧技術」、電子情報通信学会 1998 年春季全国大会, 2, 566-566.</p>
その他	<p>【招待講演】 J. Kani, "Next-generation optical access network," Broadband World Forum Asia, 30 May 2 June 2005, Yokohama, Japan, Half-Day Workshop 2, Speaker 4. (国際会議ワークショップ)</p> <p>【招待講演】 J. Kani, R. Davey, "Optical access network technologies in the next generation," ITU-T All Star Network Access Workshop, 2-4 June 2004, Geneva, Switzerland, Session 5, No. 2. (国際会議ワークショップ)</p> <p>J. Kani, K. Iwatsuki, K. Sano, "Gigabit WDM-PON system for advanced broadband services," 15th International Symposium on Services and Local accesS (ISSLS), 21-24 March 2004, Edinburgh, U.K., Paper 21. (国際会議)</p> <p>J. Kani, M. Teshima, K. Akimoto, N. Takachio, H. Suzuki, K. Iwatsuki, M. Ishii, "A WDM-based optical access network for wide-area gigabit access services," IEEE Communication Magazine, vol. 41, issue 2, S43-S48, February 2003. (本論文)</p> <p>J. Kani, K. Akimoto, M. Fukui, M. Teshima, M. Fujiwara, K. Iwatsuki, "Asymmetric bandwidth wide-area access network based on super-dense WDM technologies," IEICE Transaction on Communications, vol.E85-B, No.8, pp.1426-1433, August 2002. (本論文)</p> <p>J. Kani, M. Teshima, M. Fujiwara, K. Iwatsuki, "1000-channel SD-WDM light source employing optical multicarrier generation scheme using sinusoidal amplitude-phase hybrid modulation," IEE Electronics Letters, vol 38, No. 12, pp. 575-576, June 2002. (レター)</p>

研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
その他 (続き)	<p>J. Kani, M. Teshima, K. Akimoto, M. Ishii, N. Takachio, K. Iwatsuki, "Super-Dense WDM Access Network for Wide-area Gigabit Access Services," 14th International Symposium on Services and Local accessS (ISSLS), 14-17 April 2002, Seoul, Korea, Session 9-2 (pp. 277-283). (国際会議)</p> <p>可児、手島、藤原、岩月、「超広帯域 SD-WDM 伝送用 1000 チャンネル光 CSM」、電子情報通信学会 2002 年春季全国大会, B-10-110.(国内学会講演)</p> <p>【APCC&IEEE Joint Best Paper Award】 J. Kani, K. Akimoto, M. Fukui, M. Teshima, M. Fujiwara, K. Iwatsuki, "100 Mbps / 1 Gbps asymmetric bandwidth wide area access network based on super-dense WDM technologies," 7th Asia Pasific Conference on Communications (APCC), 17-20 Sept. 2001, Tokyo, Japan, T63-3 (pp. 388-391). (国際会議)</p> <p>可児、神野、坂本、山田、「1580nm 帯波長多重伝達技術(II)多中継伝送特性」、電子情報通信学会 1997 年秋季通信ソサイエティ大会,B-10-79. (国内学会講演)</p> <ul style="list-style-type: none"> • K. Iwatsuki, <u>J. Kani</u>, H. Suzuki, and M. Fujiwara, "Access and Metro Networks based on WDM Technologies," IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 22, No. 11, pp. 2623-2630, November 2004. (本論文) • T. Nakamura, <u>J. Kani</u>, M. Teshima, K. Iwatsuki, "A quarternary amplitude shift keying modulator for suppressing initial amplitude distortion," IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 22, No. 3, pp 733-738, March 2004. (本論文) • K. Akimoto, <u>J. Kani</u>, M. Teshima, and K. Iwatsuki, "Super-dense WDM transmission of spectrum-sliced incoherent light for wide-area access network," IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 21, No. 11, pp 2715-2722, November 2003. (本論文) • M. Fujiwara, M. Teshima, <u>J. Kani</u>, H. Suzuki, N. Takachio, and K. Iwatsuki, "Optical carrier supply module using flattened optical multicarrier generation based on sinusoidal amplitude and phase hybrid modulation," IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 21, No. 11, pp 2705-2714, November 2003. (本論文) • S. Aisawa, <u>J. Kani</u>, M. Fukui, T. Sakamoto, M. Jinno, S. Norimatsu, M. Yamada, H. Ono, K. Oguchi, "A 1580-nm band WDM transmission technology employing optical duobinary coding," IEEE Journal of Lightwave Technology, 17, 191 -199, February 1999. (本論文) •【招待論文】 M. Jinno, M. Fukui, T. Sakamoto, S. Aisawa, <u>J. Kani</u>, K. Oguchi, "WDM transmission technologies for dispersion-shifted fibers," IEICE Transaction on Electronics, vol.E81-C, 1264-1275, August 1998. (本論文) <p>このほか、</p> <ul style="list-style-type: none"> • レター(査読あり, 連名) 12 件 • 国際会議(査読あり, 連名) 21 件 <ul style="list-style-type: none"> 1998 年 European Conference on Networks and Optical Communications (NOC) Best Paper Award、および、1997 年 Optoelectronics and Communications Conference (OECC) Best Paper Award を含む。 • 国内学会講演(連名) 13 件 • 国内研究会講演(連名) 1 件。