HDTV 波長多重光伝送システム

正会員 西岡 稔[†], 正会員 萩原 清和^{††}, 正会員 内村 潔[†],
 正会員 朝倉 宏之^{†††}, 正会員 松本 光二郎[†], 正会員 飯田 正憲^{†††},
 正会員 村瀬 宏一[†], 谷口 憲司[†]

HDTV WDM Optical Fiber Transmission System

Minoru Nishioka[†], Kiyokazu Hagiwara^{††}, Kiyoshi Uchimura[†],
 Hiroyuki Asakura^{†††}, Mitsujiro Matsumoto[†], Masanori Iida^{†††},
 Kouichi Murase[†] and Kenshi Taniguchi[†]

Abstract : This paper presents a 10-channel HDTV digital transmission system using wavelength-division multiplexing. We have developed an external-grating-cavity laser diode, made up into a compact module for a holographic diffraction grating and an aspherical lens, that operates at high speed. The optical multiplexer and demultiplexer have a narrow channel spacing of 1.9 nm, low polarization-sensitivity, and low optical crosstalk. We have also developed a new method of digital frequency-division multiplexing that transmits one HDTV signal at 668.25 Mb/s per optic channel. Transmission experiments through 3 km of GI fiber demonstrate its high performance.

1. ま え が き

CATV, 広帯域光加入者システム等, 映像を主体とした通信システムの開発が急速に進められており, 映像信号の多チャンネル伝送方式やサービス方式について様々な研究がなされている. 一方, 次世代テレビとして注目を集めている高品位テレビ(HDTV)は, 放送, 通信, 産業用など多方面への適用が検討されており, 各家庭への多チャンネルサービスという将来の映像環境の早期実現に向けて大きな期待が寄せられて

いる.

GHz オーダーのチャンネル間隔で多重を行う光周波数多重(光 FDM)伝送方式, あるいは nm オーダーの間隔で多重する波長多重(WDM)伝送方式は, 光の波長多重性に着目した光特有の伝送方式であり, 伝送路容量を飛躍的に増大させることができる. これらの方式を用いて, HDTV の多チャンネル伝送システム, 光加入者システム, 光 CATV システム等への適用が検討されている^{1)~4)}.

我々は, まずクロズドエリア内の比較的短距離な

キーワード : 波長多重光伝送, HDTV, 外部共振器型半導体レーザ, 光合波器, 光分波器, 符号化方式
 1989 年 10 月 26 日, テレビジョン学会技術報告, Vol. 13, No. 51 に発表
 1990 年 12 月 3 日受付

[†] 松下電器産業株式会社 映像音響研究センター映像研究所 (〒540 大阪市中央区城見 2-1-61, TEL 06-949-2418)

^{††} 松下電器産業株式会社 映像音響研究センター企画室 (〒571 門真市大字門真 1006, TEL 06-900-9601)

^{†††} 松下電器産業株式会社 映像音響研究センター材料デバイス研究所 (同上, TEL 06-900-9624)

[†] Image Technology Research Laboratory, Audio Video Research Center, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd. (2-1-61, Shiomi, Chuo-ku, Osaka 540, Japan)

^{††} Planning Office, Audio Video Research Center, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd. (1006, Kadoma, Kadoma-shi, Osaka 571, Japan)

^{†††} Materials and Devices Research Laboratory, Audio Video Research Center, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd. (ditto)

システムを想定し、実用化フェーズに近く、低コストでしかも高多重化が可能な高密度波長多重伝送システムの構築を目指した。要素デバイスとして、線スペクトル幅が極めて狭く高速変調特性の優れた $0.8\ \mu\text{m}$ 帯の外部共振器型半導体レーザ⁵⁾と、急峻な波長分離特性を有する高密度多重可能な光合・分波器⁶⁾を開発した。また HDTV 信号を効率良く伝送する符号化方式として、デジタル-周波数多重方式(D-FDM 方式)⁷⁾を開発し、これらの要素技術を用いて、10 チャンネルの HDTV 波長多重光伝送システムを開発した。

本稿では、HDTV 波長多重光伝送システムの構成と要素技術について述べ、波長多重光伝送実験の結果について報告する。

2. システム構成

図1に10チャンネルHDTV波長多重光伝送システムの構成を示す。10個の外部共振器型半導体レーザ(EGC-LD)は、各々1.9nmの間隔で波長が設定されており、668.25 Mb/sの速度でデジタル変調される。各信号光($\lambda_1 \sim \lambda_{10}$)は、光合波器によって多重され、GI型光ファイバで伝送される。多重された光信号は、受信側で光分波器により各波長の光信号に分波される構成になっている。外部共振器型半導体レーザはモジュール化されており、駆動ユニットに組み込まれている。さらに装置全体は、光合・分波器をも含めてラックに納められている。

写真1に10チャンネルHDTV波長多重光伝送システムの外観を、表1にシステムの主要諸元を示す。

3. 要素技術

3.1 外部共振器型半導体レーザ

(1) 要請される条件

波長多重光伝送用光源として要請される条件として、

表1 システム主要諸元

Main items of 10-channel HDTV WDM transmission system.

光 学 系	光 源	外部共振器型半導体レーザ ($0.8\ \mu\text{m}$ 帯)
	受光素子	Si-APD
	光合波器	ホログラフィック回折格子型
	光分波器	ホログラフィック回折格子型
符 号 化 部	光ファイバ	GI ファイバ, 伝送帯域: $>1.5\ \text{GHz} \cdot \text{km}$
	符号化方式	D-FDM 方式
	映 像	サンプリング: 74.25 MHz 8 ビット PCM
	音 声	サンプリング: 48.34 kHz 16 ビット PCM $\times 2$ ch
シ ス テ ム	チャンネル数	10 チャンネル
	波長間隔	1.9 nm
	伝送速度	668.25 Mb/s
	伝送距離	3 km

EGC-LD : 外部共振器型半導体レーザ
ENC : エンコーダ
DEC : デコーダ

図1 システムの構成
Configuration of 10-channel HDTV WDM transmission system.

写真 1 伝送システムの外観
Appearance of 10-channel HDTV WDM transmission system.

- ① 発振スペクトル幅が十分に狭いこと。
- ② 波長設定の範囲が広く、しかも精度良く設定できること。
- ③ 動作環境に対し波長が安定していること。
- ④ 変調時において単一モードを保持していること。
- ⑤ 高速変調可能なこと。

等があげられる。これらの条件を満足させる光源として、我々は回折格子とレンズにより構成される共振器を付加した外部共振器型半導体レーザを開発した。

(2) EGC-LD モジュール

図 2 に EGC-LD モジュールの構成を示す。

波長制御用素子には 2 光束干渉露光法で作成したホログラフィック回折格子を、コリメータレンズには非球面単体レンズ ($NA=0.4$, 焦点距離 6 mm) を用いた。レーザチップ ($\lambda=0.84 \mu\text{m}$) は片面に AR コートを施したもので、反射率は 1% である。他端の出力光は非球面フォーカシングレンズでファイバに結合される。戻り光の影響を回避するためにファイバ端面は斜め研磨されている。共振器長は 10 mm である。ケースの一部にはサーミスタが埋め込まれ、モジュール全体はペルチェ素子上に構成されている。

(3) EGC-LD 駆動ユニット

図 3 に EGC-LD 駆動ユニットの構成を示す。

NRZ のデータとクロックを入力し、NRZ/RZ 変換した後、EGC-LD を直接変調する。データ入力およびクロック入力、ECL レベルとした。NRZ/RZ 変換部と EGC-LD 駆動部はディスクリートの GaAs-MESFET で構成した。EGC-LD モジュールは、温度センサとペルチェ素子で温度制御している。

図 2 EGC-LD モジュール
EGC-LD module.

図 3 駆動ユニットの構成
Configuration of EGC-LD driving unit.

(4) 発振特性

EGC-LD の発振閾値は 30 mA、結合損失は 1~2 dB、波長可変範囲は 45 nm で、発振波長は精度良く設定できた。パルス変調時においても単一モード発振 (副モード抑圧比 -35 dB 以下) を保持し、戻り光の影響も認められなかった。緩和振動周波数は 1.4 GHz であった。また、駆動電流のバイアスは 50 mA、振幅は 20 mA_{p-p} とし、パルス立ち上がり時間 T_r 、パルス立ち下がり時間 T_f は各々 100 ps であった。光出力パルスの T_r 、 T_f は各々 500 ps であり、1 Gb/s までの動作を確認した。さらに発振波長の温度依存性は、15°C から 40°C までの範囲で $\pm 0.05 \text{ nm}$ 以内に抑えられた。

図 4 に 668.25 Mb/s で変調したときの光出力波形を、図 5 にパルス変調時の発振スペクトルを示す。

3.2 光合・分波器

(1) 構成

光合波器および光分波器の構成を図 6 に示す。

回折格子には、EGC-LD モジュールで用いたホログラフィック回折格子と同じものを用いており、溝本数は 1200 本/mm、回折効率 0.8 μm 帯で無偏光で 85% である。またコリメータレンズには $NA=0.25$ 、焦点距離 $f=50 \text{ mm}$ の低収差レンズを用いている。レンズ表面には AR コートを施している。光合波器

(横軸: 500 ps/div)

図4 変調波形 (668.25 Mb/s)
Waveform of optic output (668.25 Mb/s).

図5 発振スペクトル
Spectrum of optic output.

のファイバアレイは、アイソレーション特性をより重視し、入出力ともコア径 $50\text{ }\mu\text{m}$ の GI ファイバを用いている。一方、光分波器のファイバアレイは、低損失特性をより重視し、入力用としてコア径 $50\text{ }\mu\text{m}$ の GI ファイバを、出力用としてコア径 $80\text{ }\mu\text{m}$ の GI ファイバをそれぞれ用いている。これらの素子を専用の調整治具を用いて同一基板上にアSEMBルし、樹脂で固定することにより構成している。

(2) 光合波・分波特性

図7に光合成波の波長フィルタ特性を、図8に光分波器の波長分離特性を示す。

波長間隔は、 1.9 nm と狭く、挿入損失、フィルタの選択波長域 (3 dB 帯域) ともチャンネル間のばらつきはほとんどなかった。またファイバ間の結合状態は良好で、しかも各波長は安定な単一モード発振をしており、合分波器によるモードノイズの影響は認められなかった。

表2に光合・分波器の諸特性を、図9に10チャンネルの合成スペクトルを示す。

図6 光合・分波器の構成
Configuration of optical multiplexer/demultiplexer.

図7 光合成器の波長フィルタ特性
Filtering performance of optical multiplexer.

図8 光分波器の波長分離特性
Filtering performance of optical demultiplexer.

3.3 符号化方式

(1) D-FDM 方式

EGC-LDの変調特性を考慮し、HDTV信号を効率良く伝送する方式として、デジタル-周波数多重方式 (D-FDM方式)を開発した。

図10にD-FDM方式による符号化部と復号化部の構成を示す。

符号化部において、HDTV信号は、輝度信号Yと色信号P_B、P_Rのコンポーネント信号として入力される。輝度信号は24 MHzで帯域制限され、色信号はライン交番信号により線順次化された後に8 MHzに帯域制限され、それぞれスタジオ規格のサンプリング周波数f_s(=74.25 MHz)でA/D変換される。なお、

表 2 光合・分波器の諸特性
Characteristics of optical multiplexer and demultiplexer.

	光合波器	光分波器
GIファイバのコア径 (μm)	入力用：50 出力用：50	入力用：50 出力用：80
挿入損失 (dB)	5 以下	4 以下
アイソレーション (dB)	-35 以下	—
クロストーク (dB)	—	-30 以下
3 dB 帯域 (nm)	0.7	1.0

図 9 合波スペクトル
Spectrum of 10-channel multiplexed output.

色信号の垂直方向の帯域制限については、ハードウェア簡略化のために省略している。デジタル化された色信号は、周波数 $f_s/2$ の搬送波により振幅変調された後に輝度信号に加算される。

復号化部では、符号化された HDTV 信号を D/A 変換した後、24 MHz の LPF により輝度信号 Y を分離して出力される。色信号は、再び $f_s/2$ の搬送波を掛け合わせることで復調され、ラインメモリにより伝送されないラインが補間再生された後、D/A 変換され、8 MHz の LPF により分離後出力される。

D-FDM 方式による HDTV 信号多重化スペクトルを図 11 に示す。

なお、音声信号 (L/R) については、フレーム構成を簡単にするために、映像のサンプリング周波数 74.25 MHz から分周した 48.34 kHz を音声のサンプリング周波数とし、16 ビットのデジタル信号に変換した後、誤り訂正などの処理を行っている。

(2) 多重化と伝送符号化

符号化された映像と音声信号およびフレーム信号は、マルチプレクサにより図 12 に示すフレーム構成に多重化される。MSB 側 6 ビットは同期型、LSB 側

(a) 符号化部

(b) 復号化部

図 10 符号・復号化部の構成
Configuration of D-FDM encoder and decoder.
(a) D-FDM encoder, (b) D-FDM decoder.

図 11 HDTV 信号多重化スペクトル
Spectrum of HDTV signal multiplexed by D-FDM.

2 ビットは自己同期型でスクランブル処理され、映像信号の相関性の抑圧を図るとともに、自己同期特有の誤り波及の影響を軽減している。

以上のように伝送符号化された信号は 668.25 Mb/s の速度で伝送され、復号化部においてデスクランブル・デマルチプレックスされて映像信号、音声信号およびフレーム信号に分離される。

図 12 フレーム構成
Frame format.

4. 伝 送 実 験

これまで述べてきた要素技術により、10 チャンネルの HDTV 信号波長多重光伝送実験を行い、光の損失特性、誤り率特性、映像系・音声系の伝送特性などシステムの評価を行った。

4.1 光損失配分

表 3 にシステムの光損失配分を示す。光ファイバは伝送帯域 1.5 GHz・km 以上の GI ファイバを用いた。誤り率 $BER \leq 10^{-9}$ を満たす最小受光レベルは、-25 dB 以下であり、送受信間レベル差として 27 dB 以上を得ている。また総合損失は、 20 ± 2 dB に抑えられており、システムマージンとして 5 dB 以上を得ている。

4.2 誤り率特性

図 13 に誤り率特性を示す。波長は $\lambda = 840.2$ nm (チャンネル 5) である。光受信部は AGC 機能により約 20 dB の範囲で $BER \leq 10^{-9}$ を満足している。誤り率特性はチャンネルにより若干のパラツキがあるが、最小受光レベルは最悪チャンネルで -25 dB であった。また波長間隔 1.9 nm、10 チャンネルの波長多重伝送を行った場合の総合クロストークは最悪チャンネルで -30 dB であり、10 波長多重伝送しても誤り率特性は変わらず、チャンネル間のクロストークの影響はないことが確認できた。

4.3 映像・音声系伝送特性

表 4 に映像・音声系の伝送特性を示す。D-FDM 方式の採用により、再生信号帯域幅が輝度信号で 24 MHz、色信号で 8 MHz、さらに輝度信号・色信号間のクロストークのない、高画質の HDTV 信号伝送が実現できた。映像系の S/N で 48 dB 以上を達成している。音声系についても良好な伝送特性が得られた。

表 3 光損失配分
Power budget.

ファイバ内入力レベル		$+4 \pm 2$ dBm
最小受光レベル		-25 dBm 以下
送受信間レベル差		27 dB 以上
損 失 系	ファイバ伝送損失	8 dB (3 km)
	コネクタ損失	3 dB
	合波損失	5 ± 1 dB
	分波損失	4 ± 1 dB
	総合損失	20 ± 2 dB
システムマージン		5 dB 以上

図 13 誤り率特性
Error performance.

表 4 伝送特性
Transmission characteristics.

シ ス テ ム	チャンネル数	10 ch, 波長間隔: 1.9 nm
	伝送速度	668.25 Mb/ps
	総合クロストーク	-30 dB 以下
	伝送距離	3 km, マージン: 5 dB 以上
映 像 系	映像帯域幅	Y: 24 MHz, P _B /P _R : 8 MHz
	S/N	48 dB 以上
	DG, DP	0.5% 以下, 1' 以下
音 声 系	音声帯域幅	20 Hz ~ 20 kHz
	S/N	72 dB 以上
	音声歪み	0.028% 以下

5. む す び

高多重化が可能な高密度波長多重伝送方式を用い

て、10 チャンネル HDTV 波長多重光伝送システムを開発した。

要素デバイスとして外部共振器型半導体レーザおよび光合・分波器を、符号化方式として D-FDM 方式を開発し、これらを用いて、0.8 μm 帯で波長間隔 1.9 nm, 1 チャンネルあたりの伝送速度 668.25 Mb/s という高速・高密度多重伝送を実現した。これは総伝送路容量約 6.7 Gb/s に相当する。さらに 3 km の GI ファイバを用いて伝送実験を行った結果、良好な伝送特性が得られた。

現在、要素デバイスの性能、信頼性を高めるとともに、長波長帯の波長多重用デバイスの開発を行っている⁸⁾⁹⁾。今後、これらを用いて、より大容量で長距離の波長多重光伝送システムの検討を進める方針である。

最後に、本研究を進めるにあたり、御指導いただいた映像音響研究センター 長澤所長、映像研究所 長岡所長はじめ、関係各位に深く感謝いたします。

【参 考 文 献】

- 1) H. Kobrinski, R. M. Bulley, M. S. Goodman, M. P. Vecchi, C. A. Brackett: "Demonstration of High Capacity in the LAMBDANET Architecture: A Multiwavelength Optical Network", Electron. Lett., **23**, 16, pp. 824-826 (July 1987)
- 2) 渋谷, 山崎, 下坂, 村田, 小野, 鹿田: "コヒーレント光 CATV -10 チャンネル FDM 伝送実験-", 信学技報, **88**, 239, OQE 88-70, pp. 45-52 (Oct. 1988)
- 3) 近間, 渡辺, 内藤, 尾中, 清水, 桑原: "コヒーレント光通信による多チャンネル HDTV 信号伝送実験", 信学技報, **88**, 102, OCS 88-14, pp. 31-36 (June 1988)
- 4) 西岡, 萩原, 朝倉, 飯田, 長岡: "外部共振器型半導体レーザを用いた波長多重映像伝送実験", 昭 62 信学総全大, 分冊 10, 2436, p. 314 (Mar. 1987)
- 5) 朝倉, 萩原, 長岡: "ホログラフィックグレーティングを用いた外部共振器型半導体レーザ", 昭 61 信学光・電波部門全大, 分冊 2, 194, p. 23 (Sep. 1986)
- 6) 萩原, 朝倉, 長岡: "正弦波ホログラフィックグレーティングを用いた光合分波器", 昭 61 信学光・電波部門全大, 分冊 2, 241, p. 70 (Sep. 1986)
- 7) 内村, 松本, 谷口: "HDTV 信号伝送装置", 1989 テレビ全大, 12-1, pp. 257-258 (July 1989)
- 8) 飯田, 萩原, 朝倉: "長波長帯用ホログラフィック回折格子", 昭 63 信学春全大, 分冊 C-1, C-469, p. 174 (Mar. 1988)
- 9) 朝倉, 松井, 田中, 飯田, 萩原: "直接変調用 1.3 μm 外部共振器型半導体レーザ", 1989 信学秋全大, 分冊 4, C-168, p. 108 (Sep. 1989)

にしおか みのる
西岡 稔 昭和 58 年, 大阪大学工学部通信工学科卒業。59 年, 松下電器産業(株)に入社。映像伝送システム, 光通信システムの研究開発に従事。現在, 同社映像研究所に勤務。正会員。

はぎわら きよかず
萩原 清和 昭和 44 年, 松下電器産業(株)に入社。51 年, 大阪工業大学電子工学科卒業。圧電セラミックフィルタ, 水晶振動子, 光通信用デバイスおよび伝送システムの研究開発に従事。現在, 松下電器産業(株), 映像音響研究センター企画室主任技師。正会員。

うちくら きよし
内村 潔 昭和 53 年, 京都工芸繊維大学大学院電子工学専攻修士課程修了。同年, 松下電器産業(株)に入社。文字放送受信機, MUSE 受信機, ED/IDTV 受信機などの研究開発に従事。現在, 同社映像研究所にてハイビジョン光伝送装置およびシステムの研究開発に従事。正会員。

あさくら ひろゆき
朝倉 宏之 昭和 58 年, 大阪大学大学院応用物理専攻修士課程修了。同年, 松下電器産業(株)に入社。60 年まで, ビデオカメラ用オートフォーカスシステムの開発に従事。現在, 同社材料・デバイス研究所において, 波長多重光通用デバイスの開発に従事。正会員。

まつもと りょうじ
松本光二郎 昭和 57 年, 九州工業大学電気工学科卒業。同年, 松下電器産業(株)に入社。テレビ信号のデジタル処理に関する研究に従事。現在, 同社映像研究所において, 映像信号の伝送に関する研究に従事。正会員。

いいだ まきのり
飯田 正憲 昭和 61 年, 大阪大学大学院応用物理専攻修士課程修了。同年, 松下電器産業(株)に入社。光通信用光学デバイスの研究に従事。現在, 同社材料デバイス研究所に勤務。正会員。

むらせ ひろあき
村瀬 宏一 昭和 62 年, 大阪大学大学院工学研究科修士課程修了。同年, 松下電器産業(株)に入社。画像光通信システムの研究開発に従事。現在, 同社映像研究所に勤務。正会員。

たにぐち けんし
谷口 憲司 昭和 63 年, 熊本大学工学部電気工学科卒業。同年, 松下電器産業(株)に入社。以来, 映像伝送システムの研究開発に従事。現在, 同社映像研究所に勤務。