



高周波電流重畳法による半導体レーザー搭載 ビデオディスクプレーヤのレーザーノイズ低減化

有本 昭*・尾島 正啓*・茅根 直樹*・大石 昭夫*・後藤 敏彦**

*(株)日立製作所中央研究所 〒185 国分寺市東恋ヶ窪 1-280

**(株)日立製作所家電研究所 〒244 横浜市戸塚区吉田町 292

(1985年4月24日受理)

Noise Reduction of Diode Laser Video Disc Players with High Frequency Current Superposition

Akira ARIMOTO,* Masahiro OJIMA,* Naoki CHINONE,* Akio OOISHI* and Toshihiko GOTOH**

*Central Research Laboratory, Hitachi Ltd.,
1-280, Higashi-Koigakubo, Kokubunji 185

**Consumer Research Center, Hitachi Ltd.,
292, Yoshida-cho, Totsuka-ku, Yokohama 244

Noise reduction of a diode laser in video disc players is realized by high frequency current superposition. Frequency of superposed current must be higher than 600 MHz and more than 140% modulation is necessary. In these conditions, the diode laser oscillates in multimodes and the noise level can be reduced to less than $3 \times 10^{-14} \text{ Hz}^{-1}$. Removal of interference on signal detectors and relation between the frequency of current and the optical path length must be taken into consideration to reduce the noise.

1. はじめに

半導体レーザーを用いたコンパクトディスクは1982年に製品化された。また、ビデオディスクへの半導体レーザーの本格的採用は1983年秋であった。半導体レーザーは小型、省電力という大きな長所を有している。1978年に気体レーザーを用いて製品化されたビデオディスクに半導体レーザーを適用するのが遅れた最大の要因は、半導体レーザーに起因するノイズによるものである。すなわちアナログ記録を行なうビデオディスクでのノイズの許容基準が、ディジタル記録を行なうコンパクトディスクにくらべてはるかに厳しいため実用化できなかつた。

半導体レーザーを原因とするノイズは大きくわけて2種類（モードホッピングノイズおよび光帰還ノイズ）あることはよく知られている¹⁾。また、半導体レーザーノイズのビデオディスクへの影響（ビデオディスク信号帯域および制御信号帯域への影響）についてはおののか

なり詳しく調べられてきた^{2,3)}。

しかしながら、ノイズを低減する良い解決策がなく、ビデオディスクへの適用が遅れていた。ところが、レーザーのノイズを低減する二つの手段が1983年に相次いで提案された。その一つは、屈折率ガイド型レーザーを高周波電流で駆動する方法であり、他の一つは、自励発振レーザーを用いるものである⁴⁾。

本研究は、前者に関するものであり、ノイズの最適な低減法、レーザーの特性について報告する。

2. ビデオディスクにおけるレーザーノイズ

半導体レーザーのノイズのビデオディスクへの影響は現在までいくつか報告されている。

屈折率ガイド型縦シングルモードレーザーを用いたときの問題点は、温度変化によるモードホッピング、およびレーザー共振器へのレーザー光の光帰還によって、縦モードの不安定状態が生じ、そのためレーザー光の出力変動および干渉性の変化がひき起こされ、2~13 MHzの

ビデオ信号帯域、および 20 kHz 以下の自動焦点およびトラッキング信号帯域にノイズが発生し、白い斑点状のノイズが再生テレビ画面上に現われたり、焦点ずれ、トラッキングずれが発生する点にあった。一方、利得ガイド型の縦マルチモードレーザーを用いる場合は、数本から 10 本以上のモードがつねにたっており、干渉性はつねに低く変動しないため、制御信号帯域における雑音は発生しないし、特定の温度および光帰還によるノイズの著しい増加はないものの、ビデオ信号帯域のノイズレベルは、相対雑音強度 (RIN, relative intensity noise) で 10^{-13} Hz^{-1} 以上であり、ビデオディスクでの許容値 $5 \sim 6 \times 10^{-14} \text{ Hz}^{-1}$ には達せず採用が見送られてきた。

半導体レーザーに許容される条件としては前述のように RIN が $5 \sim 6 \times 10^{-14} \text{ Hz}^{-1}$ であることと、制御信号帯域でのノイズ発生を防ぐため、レーザーの可干渉性の変化を少なくすることが必要である。

縦シングルモードレーザーを用いて上記許容条件を満足するものとして、クラッド層の Te 不純物濃度を高くして、Te による光の吸収層を設け、共振モードに相応した、 $1/2$ 波長ごとの吸収層によって疑似的な DFB 構造をつくり、縦シングルモードの安定性を増加させる案も考えられた⁵⁾。しかし、実験の結果では、効果は認められたものの、ノイズの許容量を満足するレーザーの歩留りが低く量産化には適さなかった。

そこで、われわれはシングルモード発進状態の半導体レーザーを用いる方法の他に、マルチモード発振状態でレーザーノイズの低減ができるないかという検討をした。その一つとして、屈折率ガイド型レーザーを高周波電流駆動する方法を有力候補と考えた。高周波電流重畠によるノイズ低減については、アイディア自体は既知であったが⁶⁾、ビデオディスクでの適用が可能かどうかという検討は、まだであった。われわれは、各種条件を満足すれば、ビデオディスクに十分本方法が使用できるという結論に達した。

次章以降その検討結果について述べる。

3. 高周波電流の重畠方法

Fig. 1 に半導体レーザーの駆動方法を示す。レーザーの電流・光出力特性の特定のバイアス点 P_0 を中心で交流的に電流を変化させる。もし、高周波重畠電流の下限値が、レーザーの発振閾値を下回れば、得られるレーザー光の出力波形は Fig. 1 に示すようにパルス状態となる。

本研究に用いた半導体レーザーは日立製の屈折率ガイ

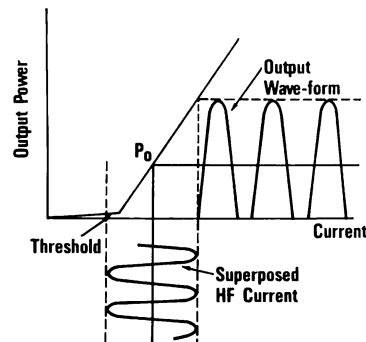


Fig. 1 Driving method of a diode laser with high frequency current superposition.

ド型 MCSP レーザー (modified channelled substrate planer laser) HL 7801 E である。通常光帰還がない状態では縦シングルモードで発振する。

4. 高周波電流重畠法による半導体レーザーのノイズ測定

本方法によるノイズの測定を行なうために、測定光学系として、ビデオディスクの光学系に近い、Fig. 2 のような測定光学系を構成した。半導体レーザーを出たレーザー光はコリメートレンズおよび絞り込みレンズを通ってディスク盤に達する。ディスク盤で反射したレーザー光は再びレーザーに戻る。レーザーへの戻り光量は中间に配置した ND フィルターで調整される。また、レーザーの温度を変化させるため、ペルチェによる温度調整装置がついている。コリメートレンズを出たレーザー光の一部はハーフミラーによってきりだされ、ノイズの測定系に導かれる。その一部は RIN の測定に用いられ、他の部分は分光器に導かれ縦モードの観測に使用される。

以下、各評価項目について述べる。

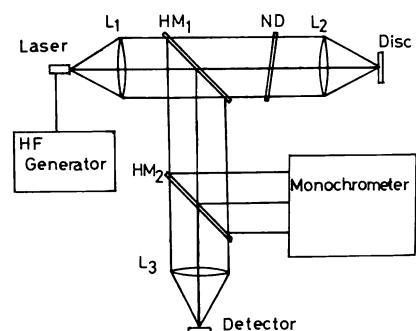


Fig. 2 Schematic of measuring diode laser noise and longitudinal modes.

4.1 重畠電流周波数依存性

まず最初に重畠電流の周波数とノイズの関係を調べる。変調の深さを示す変調度は4.2節で定義する値でもって、十分にノイズが低減される値 $M=140\%$ に設定した。レーザーの直流光出力は3mWである。

そのときに、周波数とノイズとの関係を示す。周波数が低いときは、モードホップによるノイズの急激な上昇が特定の温度でみられるが、周波数が上昇するにつれてスパイク状のノイズはなくなり、温度依存性が少ない平坦なノイズ特性となる(Fig. 3)。

このようにして測った20~50°Cにおける、光帰還量が0%と5~6%のときのノイズの周波数依存性をFig. 4に示す。このときのレーザー-ディスク間距離は70mmと85mmである。この結果から600MHz以上あればノイズのレベルは $3 \times 10^{-14} \text{ Hz}^{-1}$ 以下になり、かつ光帰還があっても変化は認められない。Fig. 4で周波数が900MHz~1GHz付近でノイズレベルが上昇しているが、この理由については5.1節でのべるごとく、レーザー電流の駆動周波数とレーザーディスク間光路長との関係によるものであって、両者の関係を適切に保てばノイズの上昇はない。またレーザー光の一部を分光器に導き縦モードの観測をした。周波数が300MHzであっても、縦モードはすでにマルチモードになっているが、モード全体のプロファイルはなめらかではない(Fig. 5)。

周波数を高めるにつれて、縦モード本数は増加し、プロファイルの包絡線もガウス型に近づいていることがわかる。

4.2 変調度依存性

次に、重畠した電流の変調の深さとノイズとの関係を調べる。ここで変調の深さを示す変調度を本論文では次の式で定義する。

$$P_0 = 3 \text{ mW}$$

$$M = 140\%$$

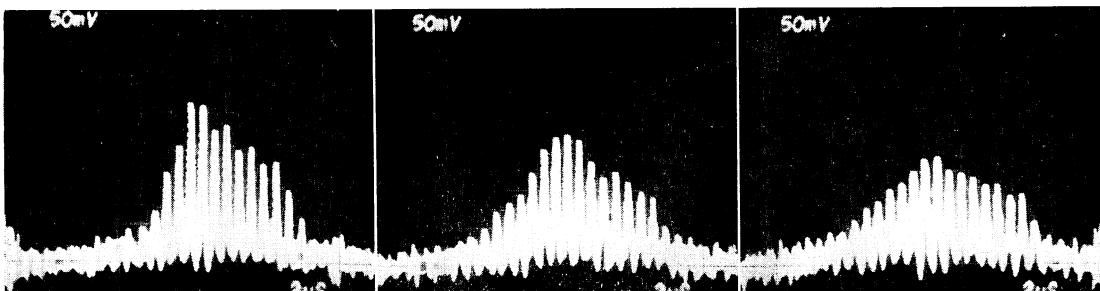


Fig. 5 Mode profile of diode laser vs. superposed drive current frequency.

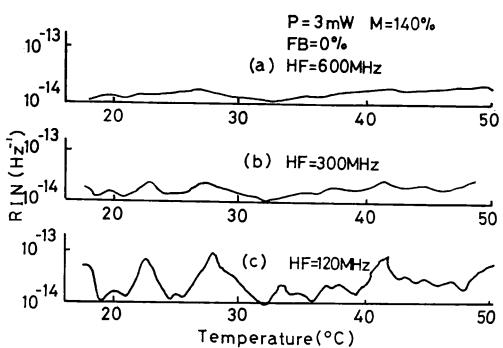


Fig. 3 Temperature dependence properties of the high frequency current superposition noise reduction method.

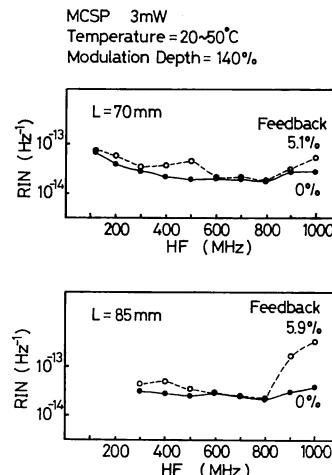


Fig. 4 Drive current frequency dependence of diode laser noise.

(a) 100%以上のとき

$$\text{変調度 } M = \frac{\text{高周波電流重畠時の直流光出力}}{\text{無変調時の直流光出力}}$$

$$\times 100(\%) \quad (1)$$

重畠高周波電流の下限値がレーザーの発振閾値を下回るとレーザーはパルス発振することは3章でのべた。このときにはレーザーの直流通じる光出力は、無変調時の場合にくらべ上昇する。したがって M は 100% を越す。 M が 100% は、高周波電流の下限がレーザーの発振閾値にあることを示し、100% 以上は高周波電流の振幅がそれより大きく、パルス発振のレーザー出力が得られる。

(b) 100% 以下のとき

高周波電流の下限値がレーザー発振閾値を上回ることを意味する。このときのレーザー発振出力波形は理論的には正弦波となり、パルス発振とはならない。したがって変調を加えても光出力の平均値は変化しない。このようなときは次式でもって変調度を定義した。

変調度 M

$$= \frac{\text{変調時に } 100\% \text{ の変調度となるようにバイアス電流を小さくしたときの直流光出力}}{\text{無変調時の場合の直流光出力}} \times 100(\%) \quad (2)$$

このように定義したときの変調度とノイズとの関係を調べた。その結果を Fig. 6 に示す。このときの重畠電流周波数は 600 MHz である。変調電流が閾値をきらない $M=50\%$ 程度であると、600 MHz の周波数であっても、ノイズは十分に低減されず、かつ光帰還があるとノイズはさらに増える。

ノイズを十分に抑制するには 120% 以上の変調度にすることが必要で、このときには光帰還の影響も受けず、 $RIN = 3 \times 10^{-14} \text{ Hz}^{-1}$ となる。実用上はレーザーの特性ばらつきを考えて、140% 以上の変調度にすれば問題ないと考える。

また、縦モードの状態を分光器でみてみると、100% 以下の変調度では、縦モードのマルチ化の程度が不十分で、600 MHz 以上の周波数で変調しても、特定のモードが強く発振しており、モードのプロファイルはなめらかでない。また光帰還があるとさらにその傾向は強くなり、先ほどの特定の1本のモードがますます強くなっている。

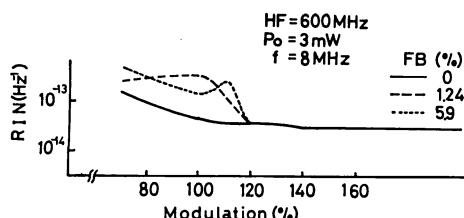


Fig. 6 Modulation dependence of diode laser noise.

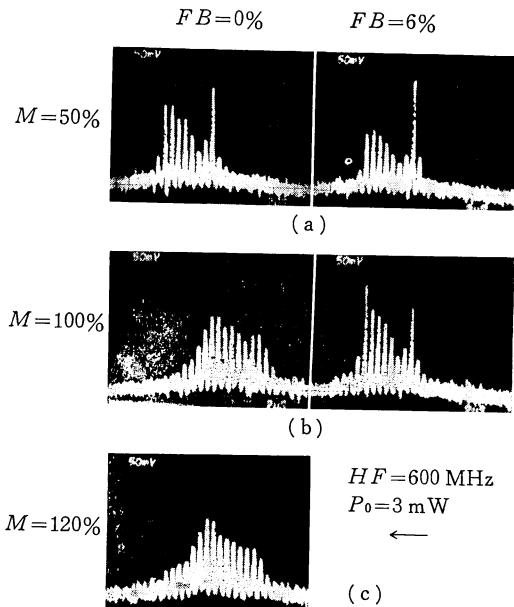


Fig. 7 Mode profile of diode laser vs. modulation depth.

いる (Fig. 7)。

それに対して変調度が 100% を越すと縦モードの本数は増え、かつ光帰還によっても、モードの変化が少なくなり、120% を越すと変化は認められなくなる。

4.1 および 4.2 節の縦モードの観測から、ノイズを十分に低下させるには、なるべくたくさんのモードが均等の強度で発振することが必要である。

5. ビデオディスク実装上の問題点

4 章ではおもに半導体レーザー自体のノイズ特性を調べてきた。本章ではビデオディスク光学系に実装する場合の、光学系とノイズの係り合いについて検討する。

5.1 重畠電流周波数とレーザー・ディスク間光路長との関係

4.1 節でレーザーのノイズが周波数が 600~800 MHz 付近で極小値を示し、900 MHz~1 GHz で上昇することをのべた。この原因是 1 GHz もの高周波になると、浮遊容量等の関係で印加エネルギーがレーザーに有効に加えにくいことと同時に、次の実験から周波数とレーザー・ディスク間光路長には相関のあることがわかった。

周波数を固定した状態でレーザー・ディスク間光路長を変化させていくと、特定の周期ごとにノイズが増加する。Fig. 8 に変調周波数が 600 MHz と 900 MHz の場合の、光路長の変化に伴うノイズ特性を示す。

図中の θ は

$$\theta = 2\pi HF(2L/C) \quad (3)$$

という規格化した量を示す。600 MHz と 900 MHz の両者とも、 θ が 2π の整数倍より少し手前でノイズが大きくなっている。 L は光路長、 HF は重畠周波数、 C は光速である。Fig. 9 は θ をパラメータとして、ノイズが大きくなる状態と、小さくなる状態を示す。ここで実線は、レーザーの発振パルス、斜線で示された部分は、レーザーが光ディスクで反射し、再びレーザー出射端面に戻る光パルスのタイミングを示す。この状態の物理的解釈は、ノイズが大きくなる状態とは、パルス発振をしたレーザー光が再び出射端面に戻ってきたときが、それ以降のパルスの立ち上り時間と一致するときであることがわかる。

Fig. 4 で 1 GHz 付近でノイズが増加したのは、そのような状態に、周波数と光路長との関係があつたためである。

ノイズ低減効果を十分にだすには Fig. 9(a) のような状態に周波数と光路長の関係を保つ必要がある。

5.2 干渉の影響

高周波電流を重畠し、レーザーの縦モードをマルチ化することで、干渉性を低減させて、光帰還やモードホッピングによるノイズを低減させているのが本方式の特徴であるが、本方式においても干渉の影響を無視できないことがわかった。

干渉によるノイズの増加を測定するために、Fig. 10

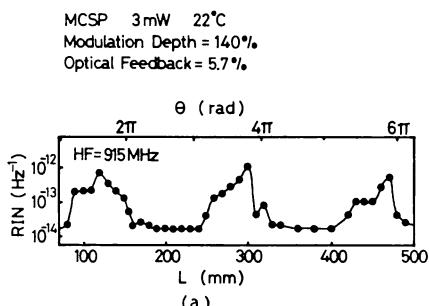


Fig. 8 Optical path dependence of diode laser noise.

のようなマイケルソン干渉計を用いた。干渉計のアームの長さをおのおの L_1, L_2 として二つの光路差による影響を調べた。ノイズはわけられた二つのレーザー光を再び合成し干渉させたところにノイズ測定用光検出器を置き測定した (Fig. 11)。二つのレーザー光の強度比は 1 : 1 である。変調周波数は 600 MHz、変調度は 140% である。光路差 $\Delta L = L_1 - L_2$ とするとき、 ΔL が 1.2 mm ごとにノイズの鋭い変化があり、それ以外の光路差では、干渉をさせないときのノイズの値にくらべて RIN でもって約 3 倍の増加が観測される。1.2 mm という値は、半導体レーザーの等価共振器長に相当する。このように、くしの歯状にノイズが変化するのは、Narrow Stripe 型縦マルチモードレーザーで Petermann が干渉の影響を測定した結果と似ている⁷⁾。彼の理論解析に従

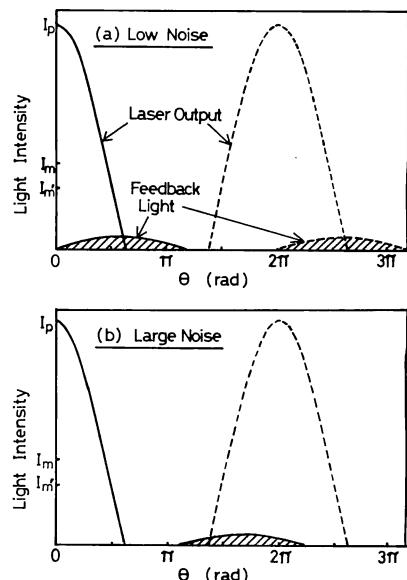


Fig. 9 Diode laser noise vs. normalized optical path length.

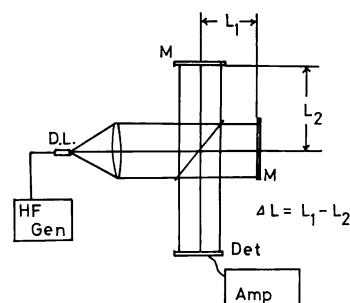


Fig. 10 Schematic of measuring interference effect of diode laser noise.

えば、ノイズの増大は各縦モードの干渉の差によるモード分配雑音によるものと考えられる。

次に、光路差 ΔL を半導体レーザーの共振器長 1.2 mm の非整数倍に設定し、二つの光量比を変化させたときのノイズ量を測定した。その結果を Fig. 12 に示す。約 100 分の 1 の光が、メインの光と干渉するとノイズは RIN でもって約 1 衍上昇する。これらの結果から、高周波電流重量方式においても、光学部品で反射してくる迷光と、メインの信号光を光検出器上で干渉をさせないように十分に配慮する必要がある。

ビデオディスクシステムでの具体的な影響例を示す。信号を受けとる光検出器には、表面保護用のカバーガラスがついている。この光検出器を光軸に対して正対させた位置から徐々に傾けていくと、ノイズが減少していくことがわかった。光軸から 7° 傾けると約 1 衍ノイズが低減する (Fig. 13)。これは光検出器上に到達した光が、反射してカバーガラスにぶつかり再び反射して光検出器に到達し、干渉をひき起こしたものと考えられる。傾けるとカバーガラスからの反射光は再び光検出器には到達しないため、ノイズが抑制される。他にも反射迷光をつ

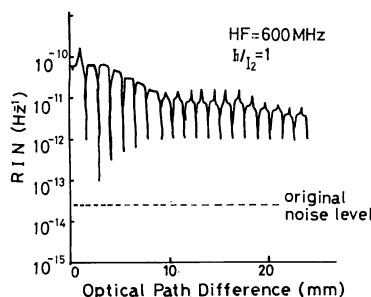


Fig. 11 Optical path difference properties of diode laser noise under interference. Intensity ratio of two beams is unity. Dashed line shows the laser noise without interference.

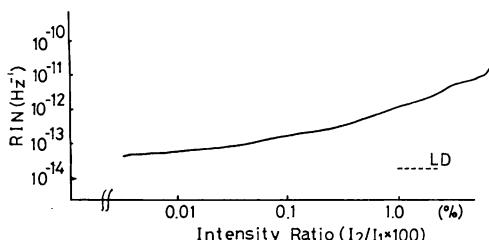


Fig. 12 Diode laser noise properties under interference vs. the intensity ratio of two beams. Dashed line shows the diode laser noise without interference.

くりだす光学部品がビデオディスクには数多く配置されおり、これらの光が検出器上に到達しないようにしな

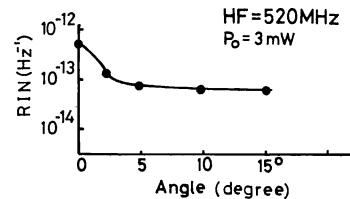


Fig. 13 Interference effect of diode laser noise due to the glass cover on the detector.

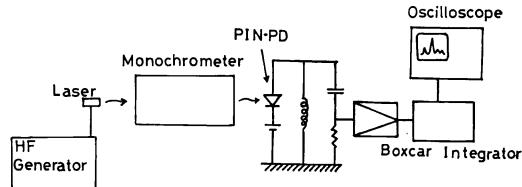


Fig. 14 Schematic of measuring longitudinal modes in a short time.

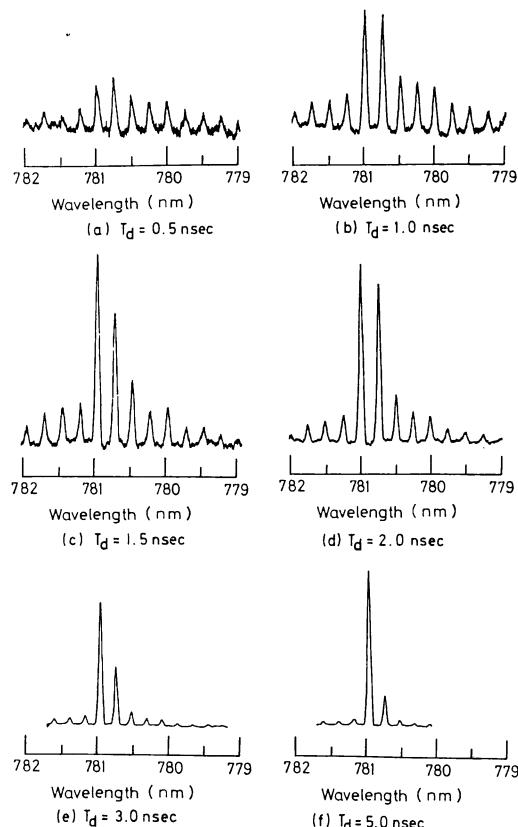


Fig. 15 Longitudinal mode behaviour, when short pulses are applied. T_d denotes the period between oscillation start time and observation time.

ければならない。

このようにビデオ帯域では干渉によるノイズの増加がみられるが、20 kHz 以下の帯域である制御信号にはノイズの混入がみられない。これは干渉性が縦シングルモード発振の場合にくらべて低いことによるものと考えられる³⁾。

6. 半導体レーザー発振モードの詳細な観察

屈折率ガイド型レーザーを高周波電流駆動し、縦モードをマルチモード化することでノイズの低減化を図ることの有効性を述べてきた。ここでは高周波電流駆動による縦モードの成り立ち方の詳しい観測をする。

Fig. 14 に測定系を示す。

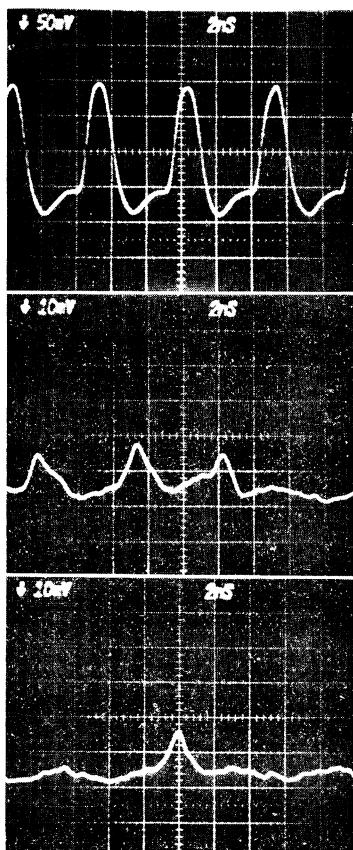
(a) 発振モードの立ち上り

電流の大きさ 24 mA、幅 24 ns の矩形電流を発振閾値の 0.9 倍の直流電流に重畠して加える。電流が閾値を越し、レーザー発振が開始して 0.5 ns 以内では縦モードは 10 本近くのマルチモード発振を行なっているが、時間の経過とともに特定のモードが強く発振するよう

なり、5 ns になるとほぼ 1 本のモードになることがわかる(Fig. 15)。したがってパルス発振の繰り返し時間 1.5 ns、すなわち、約 600 MHz 以上の高周波電流でドライブすると、レーザーがつねに縦マルチモード発振をすることになり、4 章での実験結果で 600 MHz 以上で駆動するとノイズの低減が図れるという事実と強い関係があると思われる。300 MHz 程度の周波数でノイズの低減が不十分なのは、シングルモードになる傾向が強くなり、光帰還によるノイズが誘起されるためである。

(b) 主モードの観察

ここでは最強発振をしている主モードのふるまいについて観察する。この実験においては Fig. 14 におけるボックスカーチューブは取り除き、PIN 光検出器の出力はオシロスコープに直接入力した。高周波電流を重畠したときの全光出力の実時間波形を Fig. 16(a) に示す。このときはすべての電流パルスに対する光出力パルスが観測される。また、マルチモード発振しているモード中で最強発振をしている主モードの実時間光出力を分光器を用いて観測した例を Fig. 16(b) と 16(b') に示す。



(a) Total light output

(b) Main peak only 1st scan

(b') Main peak only 2nd scan

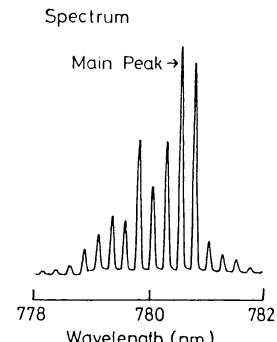


Fig. 16 Output response of main mode:

Fig. 16(b) と **16(b')** では観測した時間が異なる。

Fig. 16(b) では4個の電流パルスに対して、3個の光パルスが観測され **Fig. 16(b')** では4個の電流パルスに対して、1個の光パルスが観測される。最も強く発振している主モードでさえ、すべての高周波電流パルスに対して、つねに発振をしているわけではなくランダムな発振をしている。これは主モード以外の他のモードについてもいえる。これはつねにすべてのモードが発振している利得ガイド型マルチモードの発振の様子とは異なるところであり、同じマルチモード発振でもノイズ量に差があるのは、このようなモードのつくられ方の差によるものではないかと考えている。

ただし詳しい理由は解明されていない。

7. 実験結果のまとめ

4章から6章までに示したごとく、高周波電流重畠法によりレーザーのノイズの低減ができるることを述べた。

Fig. 17 にまとめの意味のグラフを示す。すなわち20~50°C の範囲で、屈折率ガイド型シングルモードレーザー (MCSP レーザー) では光帰還量が増えるにつれてノイズが増え許容基準を満足することは一般にむずかしい。一方、屈折率ガイド型マルチモードレーザーは光帰還によるノイズの変化はないものの、 $RIN > 10^{-13} \text{ Hz}^{-1}$ であり、ビデオディスクでのノイズ許容基準を満足しない。それに対して、高周波電流重畠法では $RIN < 3 \times 10^{-14} \text{ Hz}^{-1}$ でかつ、光帰還による変化も少なく安定であり実用化できることがわかった。本報告での結果をまとめてみる。

(1) 重畠電流の周波数は 600 MHz 以上が必要である。

(2) 変調度は 140% 以上にする必要がある。

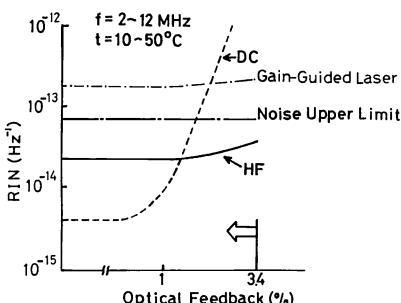


Fig. 17 Noise characteristics of three different type lasers. HF: MCSP laser with high frequency current superposition. DC: Te high-doped MCSP laser without HF superposition.

すなわち、重畠した高周波電流は発振閾値を十分に切り込み、得られるレーザー出力はパルス発振をする必要がある。

(3) 重畠電流の周波数とレーザーディスク間の光路長には、 $\theta = 2\pi HF(2L/C)$ とおいたとき、 θ が $2m\pi$ 近傍で光誘起ノイズが増加する。

ノイズ低減には、 θ の選択に注意する必要がある。

(4) 信号を受ける光検出器上で、信号光と光学部品から反射された迷光との間で干渉があるとビデオディスク域でノイズが増加することがわかった。ノイズの抑制のためには、光学系実装に干渉を避けるような配慮をしなければならない。

8. おわりに

ビデオディスクプレーヤに半導体レーザーを搭載する際に問題となっていた半導体レーザーのノイズの低減を行なう一つの方法として、高周波電流重畠法を検討した。

その結果、ノイズの低減に対する理論的な解析はまだ不明な点が多いが、実験的に、ビデオディスクプレーヤの光源として十分に実用に用いることができる事を、証明した。

この方法は、ビデオディスクプレーヤのみならず、追記型および可逆の光ディスクメモリにおけるノイズの低減法としても有効であると思われる。

本研究に際して、ご指導、ご助言をたまわった、中央研究所の千葉、堤、中村各部長、横浜工場の赤津部長に謝意を表します。

文 献

- 1) 有本 昭：“半導体レーザーの光学的使用法”，光学，13 (1984) 125.
- 2) T. Gotoh, A. Arimoto, M. Ojima and N. Chinone: “Characteristics of laser diodes and picture quality,” Proc. SPIE, 329 (1982) 11.
- 3) A. Arimoto and M. Ojima: “Diode laser noise at control frequencies in optical videodisc players,” Appl. Opt., 23 (1984) 2913.
- 4) 林 寛、松井完益、種谷元隆、山本三郎、矢野盛規、土方俊樹：“VSIS レーザーにおける自励発振の発生要因制御と低雜音化”，昭59春季応用物理学関係連合講演会予稿集 (1984) p. 172 (29 p-M-4).
- 5) 黒田崇郎、大歳創、梶村俊、阿高三郎、茅根直樹、大内博文：“可視半導体レーザーのモードホッピング雑音の低減”，昭57秋季応用物理学学会学術講演会予稿集 (1982) p. 120 (28 p-B-4).
- 6) 特願昭 53-113515 (1978).
- 7) K. Petermann and E. Weidel: “Semiconductor laser noise in an interferometer system,” IEEE J. Quantum Electron., QE-17 (1981) 125.