

研究速報

マルチミラー共振器を用いた狭帯域
KrF エキシマレーザー

嶋田 恭博・和迩 浩一・三升 陸己・河原 英仁・三木 忠明・尾形 芳郎

松下電子工業(株)電子総合研究所 〒569 高槻市幸町 1-1

(1989年9月21日受理)

A Spectrally Narrowed KrF Excimer Laser
Using a Multimirror Laser CavityYasuhiro SHIMADA, Koichi WANI, Mutsumi MIMASU, Hidehito KAWAHARA,
Tadaaki MIKI and Yoshiro OGATAElectronics Research Laboratory, Matsushita Electronics Corporation,
1-1, Saiwai-cho, Takatsuki 569

A spectrally narrowed KrF excimer laser using a multimirror laser cavity has been developed. The laser cavity is divided into an amplifying branch and a spectral-narrowing branch. The spectral bandwidth was narrowed to 3 pm with intracavity etalons in the spectral-narrowing branch. Theoretical calculations indicate that the laser intensity incident on the etalons is 20-30% of that in the Fabry-Perot laser cavity. This simple optical arrangement gives an advantage of lower incident intensity on the etalons and provides a reliable spectral performance.

1. はじめに

光リソグラフィプロセスの光源として用いられる KrF エキシマレーザーでは、レーザーの高出力化に伴い、光学系の耐久性が重要な課題となっている。とくに、レーザースペクトル線幅の狭帯域化¹⁾に用いられるグレーティング、プリズムまたはエタロンなどの共振器内スペクトル狭帯域化素子の光学的劣化はスペクトル特性に著しく影響する。また、共振器内に配置された狭帯域化素子に入射するレーザー強度はレーザーの飽和強度に匹敵するほど強いので、狭帯域化素子の熱的歪によるレーザー波長のドリフトは無視できないほど大きくなる^{2,3)}。

われわれは、マルチミラー共振器で狭帯域発振する KrF エキシマレーザーを開発し、共振器内エタロンにかかる熱的負荷を低減できることを示した^{4,5)}。本報告では共振器内のレーザー強度分布を記述する解析モデルについて述べ、実験結果との比較を与える。さらに、このモデルによって、共振器内エタロンに入射するレーザ

ー強度を解析的に求め、マルチミラー共振器の効果を検討する。

2. 実験方法

Fig. 1 に、互いに異なる共振器構成をもつ狭帯域 KrF レーザーを示す。Fig. 1 (a) に示したレーザーはひろく用いられている狭帯域化方法によるもので、Fabry-Perot 共振器内の後部にエタロンを挿入してある。Fig. 1 (b) に示したレーザーは、共振器の両端を全反射ミラーで結合し、共振器内に付加したビームスプリッターによって出力を取り出すマルチミラー共振器で構成してある。この図では、共振器をビームスプリッターで増幅ブランチと狭帯域化ブランチとに分割し、互いに直交配置してある。狭帯域化のためのエタロンは、狭帯域化ブランチ内に設置した。狭帯域化ブランチで狭帯域化されたレーザービームは、増幅ブランチの種ビームとしてビームスプリッターを介して増幅ブランチへ折り返される。レーザー出力は、ビームスプリッターをとおして増幅ブランチの光軸方向へ取り出す。この、マルチミラー共

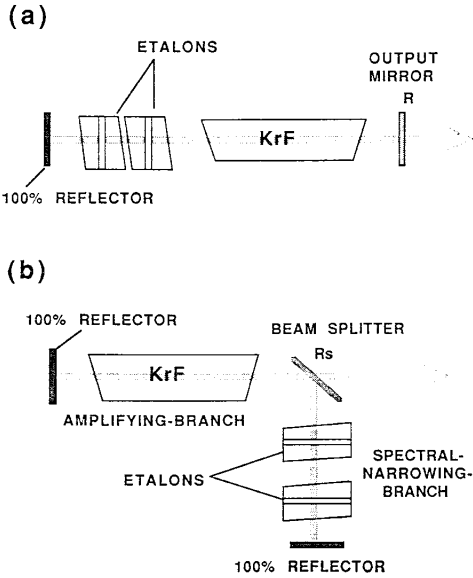


Fig. 1 Optical arrangement of a spectrally narrowed KrF excimer laser with intracavity etalons: (a) Fabry-Perot laser cavity, (b) multimirror laser cavity.

振器では、共振器内エタロンに入射するレーザー強度をビームスプリッタの反射率によって調節できる。

実験では、3 pm FWHM 以下のスペクトル幅を得るために、誘電体を石英母材にコーティングしたエアスペースエタロン2個を組にして用いた。一つは、粗狭帯域化エタロンで、FSR (自由スペクトル領域) = 430 pm, もう一つは微狭帯域化エタロンで、FSR = 43 pm である。レーザー発振器は、放電体積 $2 \times 1 \times 45 \text{ cm}^3$ をもつ UV 予備電離容量移行型 KrF レーザー⁶⁾ を用いた。レーザーガスは He バッファ中で 0.25% F₂, 5% Kr の混合比で 1.8 atm に充填した。レーザーは 20 Hz の繰り返し周波数で動作させ、レーザー出力は Molelectron 社 J 50 HR エネルギーディテクタで測定した。レーザーのビーム断面積は、バーンパターンで測定した。レーザースペクトルは、焦点距離 1.5 m, 3600 g/mm のグレーティングをもつ高分解能分光器 (JOBIN-YVON 社 THR-1500) で観測した。

3. 共振器特性の解析

KrF エキシマの放射寿命は 6.5 ns ⁷⁾ であるが、衝突脱励起などによって実効放射寿命は $2 \sim 3 \text{ ns}$ であると推定される。これに対して、レーザーパルスの持続時間は $15 \sim 20 \text{ ns}$ FWHM なので、共振器特性の解析に定常発振近似が使える。われわれの解析モデルは、Rigrod⁸⁾ によって与えられた定常発振レーザー伝播モデルに基づい

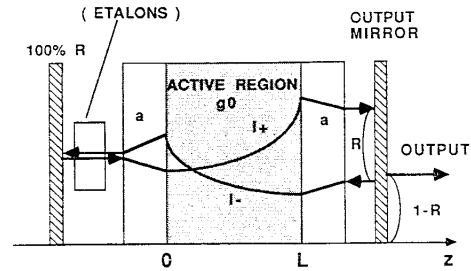


Fig. 2 Schematic representation of the laser propagation model for the Fabry-Perot laser cavity.

ている。

Fig. 2 に、共振器内エタロンをもたない Fabry-Perot 共振器内を伝播するレーザー強度 I の分布モデルを示す。レーザー活性領域の両側は、吸収率 a をもつ励起されていない領域を表している。レーザー窓、ミラー、および空気の吸収損失は無視してある。レーザー強度 I は、共振器内のすべての位置 z に対して相互に伝播する二つの強度成分 I_+ と I_- との和である。これらは、レーザー活性領域内を進むにつれて、微分方程式

$$\pm \frac{1}{I_{\pm}} \frac{dI_{\pm}}{dz} = \frac{g_0}{1 + (I_+ + I_-)/I_s} \quad (1)$$

にしたがって強くなる。ここで g_0 は小信号利得係数、 I_s は飽和強度である。レーザー活性領域内の分布損失は無視した。これらの式は境界条件

$$I_+(0) = I_-(0)R_a, \quad I_-(L) = I_+(L)R_b \quad (2)$$

で定義されるレーザー活性領域全体について積分される。ここで、パラメータ R_a および R_b はレーザー活性領域から見たレーザー共振器両端の有効反射率⁹⁾ で、 L はレーザー活性領域の長さである。以上の式を連立して解くと、レーザーの定常状態の解

$$\frac{I_-(0)}{I_s} = \frac{r_b}{(r_a + r_b)(1 - r_a r_b)} \{g_0 L + \ln(r_a r_b)\} \quad (3)$$

$$\frac{I_+(L)}{I_s} = \frac{r_a}{(r_a + r_b)(1 - r_a r_b)} \{g_0 L + \ln(r_a r_b)\}$$

を得る。ここで、 $r_a = \sqrt{R_a}$, $r_b = \sqrt{R_b}$ である。有効反射率はレーザー共振器の構成を考慮して決定される。レーザーパラメータ g_0 および I_s がわかれば、レーザー共振器内のすべての位置 z についてレーザー強度を知ることができる。

レーザーパラメータ g_0 および I_s は、出力ミラーの反射率に対する広帯域発振時のレーザー出力の実測データに、Fig. 2 に示したモデルについての式(3)による計算結果がフィットする値に決定した。計算に用いたビーム断面積およびレーザーパルス持続時間は実測から求めた

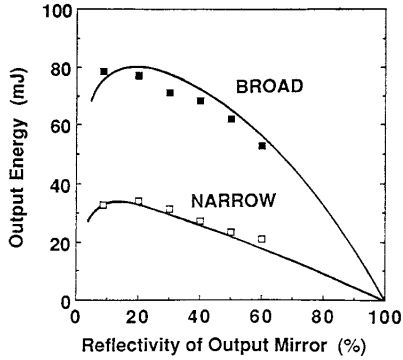


Fig. 3 Laser output energy vs reflectivity of the output mirror for the Fabry-Perot laser cavity. The traces are calculated from Eqs. (3), (4) and (5). Upper trace: broad band laser output without intracavity etalons. Lower trace: narrow band laser output with intracavity etalons.

値で、それぞれ 2 cm^2 , 18 ns FWHM である。このときの有効反射率は

$$R_a = (1-a)^2, \quad R_b = (1-a)^2 R, \quad (4)$$

ここで R は出力ミラーの反射率である。計算結果は **Fig. 3** の上側の曲線に示すように $g_0 = 8.5\%/ \text{cm}$, $I_s = 1.4 \text{ MW}/\text{cm}^2$, $a = 0.2$ のときに最もよく実験データにフィットした。

このレーザー共振器に、**Fig. 1(a)** に示す位置にエタロンを挿入して狭帯域化するとレーザー出力は低下する。これは、挿入されたエタロンが共振器内損失として働くため、光学的に結合された二つのエタロンの共振器内における有効透過率 T_e (≤ 1) を定義すると、共振器内エタロンを含む Fabry-Perot 共振器の有効反射率は

$$R_a = (1-a)^2 T_e^2, \quad R_b = (1-a)^2 R \quad (5)$$

となる。これを式(3)に代入して計算した結果が、狭帯域化した Fabry-Perot 共振器レーザーの出力データにフィットするようなエタロンの組の有効透過率 T_e を決定できる。結果は **Fig. 3** の下側の曲線に示すように、 $T_e = 45\%$ のとき実験値とよく一致した。

つぎに、これまでに求めたレーザーパラメータ g_0 , I_s および a と共振器内エタロンの有効透過率 T_e を用いてマルチミラー共振器レーザーの特性を評価してみる。マルチミラー共振器のレーザー伝播モデルを **Fig. 4** に示す。この共振器の有効反射率は

$$R_a = (1-a)^2, \quad R_b = (1-a)^2 R_s^2 T_e^2 \quad (6)$$

で表される。ここで R_s はビームスプリッタの反射率である。有効透過率 T_e は、狭帯域化プランチにエタロン

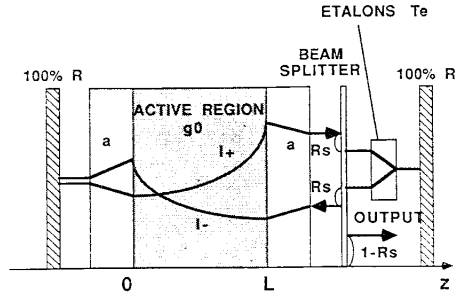


Fig. 4 Schematic representation of the laser propagation model for the multimirror laser cavity.

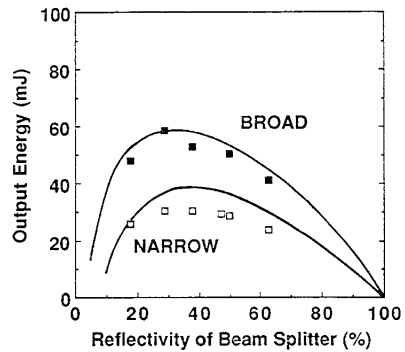


Fig. 5 Laser output energy vs reflectivity of the beam splitter for the multimirror laser cavity. The traces are calculated from Eqs. (3) and (6). Upper trace: broad band laser output without intracavity etalons. Lower trace: narrow band laser output with intracavity etalons.

を挿入したときは 45% 、エタロンを用いないときは 100% である。このモデルについて計算した結果を実験データとともに **Fig. 5** に示す。曲線で示した計算結果は実験結果とよく一致しており、上で求めたパラメータを用いたマルチミラー共振器レーザーの伝播モデルが、レーザー出力特性の解析的評価に有効であることを示している。

4. 考 察

Fig. 3 および **Fig. 5** によって、Fabry-Perot 共振器とマルチミラー共振器によるレーザー出力特性の違いを検討してみる。レーザーの広帯域発振時の出力は、Fabry-Perot 共振器で最大 80 mJ 、マルチミラー共振器で最大 60 mJ で、マルチミラー共振器によるほうが低い値を示すが、レーザーが狭帯域化されたときは、どちらも最大 30 mJ 程度を得ている。レーザーを狭帯域化したときの出力に対する最適な出力ミラーまたはビー

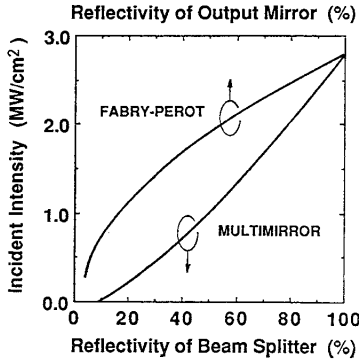


Fig. 6 Laser intensity incident on the intracavity etalons vs reflectivity of either output mirror or beam splitter.

ムスプリッタの反射率は、どちらの共振器に対しても10~40%の範囲にある。

レーザーを狭帯域化したとき、共振器内に定在するレーザー光はエタロンの通過によって損失を受ける。エタロンでの損失は、おもに誘電体コーティングと母材の吸収による。エタロンでの吸収損失の大きさは、エタロンを通過するレーザー強度に依存すると考えられるので、エタロンに入射するレーザー強度によって、エタロンへの熱的負荷を評価することができる。そこで、レーザー管側からエタロンへ入射するレーザー強度を計算した。その結果を Fig. 6 に示す。

出力ミラーまたはビームスプリッタの反射率の全領域にわたって、マルチミラー共振器内のエタロンに入射するレーザー強度は、Fabry-Perot 共振器内のエタロンに入射するレーザー強度より低い。とくに、最適な反射率領域 10~20% では、マルチミラー共振器内のエタロンに入射するレーザー強度は、Fabry-Perot 共振器内のエタロンに入射するレーザー強度の 20~30% しかない。どちらの共振器を用いても、この反射率領域ではほぼ同じ出力が得られるので、マルチミラー共振器を用いることによって、レーザー出力を損うことなく共振器内エタロンに入射するレーザー強度を大幅に低減できることがわかる。

共振器内エタロンに入射するレーザー強度が低減できれば、エタロンの光学的損傷を緩和できる。さらに、エタロンにかかる熱的負荷も低減でき、エタロンの熱的歪によるレーザー波長のドリフトを小さく抑えることができる⁵⁾。

5. おわりに

われわれは、共振器内エタロンに入射するレーザー強度を低減する目的で、マルチミラー共振器を用いた狭帯域 KrF エキシマレーザーを開発した。マルチミラー共振器レーザーの出力特性は、Fabry-Perot 共振器レーザーのレーザー伝播モデル解析から得たパラメータを用いて予測した結果とよく一致した。さらに、このレーザー伝播モデルによって、Fabry-Perot 共振器内とマルチミラー共振器内のエタロンに入射するレーザー強度を見積もった。その結果、マルチミラー共振器を採用することによって、共振器内エタロンに入射するレーザー強度を大幅に低減できることを明らかにした。このマルチミラー共振器構成による KrF レーザーのスペクトル狭帯域化は、共振器内狭帯域化素子の光学的損傷や熱的負荷の低減に有効な方法であると期待できる。

文 献

- 1) T. J. McKee: "Spectral-narrowing techniques for excimer laser oscillator," *Can. J. Phys.*, **63** (1985) 214-219.
- 2) 嶋田恭博, 三升睦己, 河原英仁, 三木忠明, 和辻浩一, 尾形芳郎: "狭帯域 KrF エキシマレーザーの波長安定化(II)", 第36回応用物理学関係連合講演会予稿集, 2p-Y-9 (1989) p. 851.
- 3) Y. Shimada, K. Wani and Y. Ogata: "Pressure-controlled wavelength stabilization of a KrF excimer laser with narrowed bandwidth," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **28** (1989) 2354-2356.
- 4) 和辻浩一, 嶋田恭博, 河原英仁, 三升睦己, 三木忠明, 尾形芳郎: "自己インジェクション形共振器による KrF エキシマレーザーの狭帯域発振 I-発振特性", 第50回応用物理学学会学術講演会予稿集, 29p-ZK-12 (1989).
- 5) 三升睦己, 和辻浩一, 嶋田恭博, 河原英仁, 三木忠明, 尾形芳郎: "自己インジェクション形共振器による KrF エキシマレーザーの狭帯域発振 II-エタロンの負荷特性", 第50回応用物理学学会学術講演会予稿集, 29p-ZK-13 (1989).
- 6) K. Wani, Y. Ogata, Y. Watarai, T. Ono, T. Miyata, R. Sano and Y. Têrui: "Narrow-band KrF excimer laser—tunable and wavelength stabilized," *Proc. SPIE*, **998** (1988) 2-8.
- 7) T. H. Dunning, Jr. and P. J. Hay: "The covalent and ionic states of the rare gas monofluorides," *J. Chem. Phys.*, **69** (1978) 134-149.
- 8) W. W. Rigrod: "Saturation effects in high-gain lasers," *J. Appl. Phys.*, **36** (1965) 2487-2490.
- 9) J. K. Rice, G. C. Tisone and E. L. Patterson: "Oscillator performance and energy extraction from a KrF excimer laser pumped by a high-intensity relativistic electron beam," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-16** (1980) 1315-1326.