

# 研究

## 集積型半導体レーザーの発振モード制御

篠崎 啓助・古川 量三・福永 敏明・野中 敏夫

沖電気工業(株)半導体技術研究所 〒193 八王子市東浅川町 550-5

(1989年6月27日受理)

### Supermode Control of Phase-Locked Laser Arrays

Keisuke SHINOZAKI, Ryoza FURUKAWA, Toshiaki FUKUNAGA and Toshio NONAKA

Research Laboratory, OKI Electric Industry Co., Ltd.,  
550-5, Higashiasakawa, Hachioji 193

Phase-locked array lasers with large optical waveguide structure are demonstrated. The refractive index guides of the laser array are evanescently coupled and offset-coupled. The evanescently coupling structure makes the modal gain of in-phase locked mode (fundamental supermode) higher than that of other supermodes. The optical power loss with offset-coupling structure compares well to that without it. The laser arrays emit with fundamental supermode operation and produce a single narrow far-field lobe. The full widths at half-maximum of the three-element, the 2/3-element (It consists of 2 lasers offset-coupled to 3 lasers) and the 4/5-element laser arrays are nearly diffraction-limited. The root mean-square phase-aberration is less than  $\lambda/14$  ( $\lambda=830$  nm), and is constant with varying power, which satisfy the requirement of the Maréchal's rule. The output power increases almost linearly up to 200 mW.

#### 1. ま え が き

回折限界の単峰性遠視野像が得られる高出力 (>100 mW) 位相同期レーザーアレイ (レーザーアレイ) は、光導波路が1本から成る従来の半導体レーザー (LD) では達成できない数百 mW 以上の出力が得られる光源として注目されている。レーザーアレイの開発目標は、単一の位相同期モードで安定して発振し、かつその出射光の波面収差が十分に小さく、高出力光源として従来のLDと置換え可能なものを作ることである。

レーザーアレイの出射光の性質は、光導波路の構造によってほぼ決定し、出力によらず安定したモードで発振させるには、利得導波構造よりも屈折率導波構造を用いるほうが、有効である。屈折率導波構造は、光導波層の厚さを変えること、あるいは光吸収層を隣接して設けて実効屈折率差を生じさせることにより、形成される。レーザーアレイでは、このようにして形成された光導波路を、減衰場を介して結合するか<sup>1-6)</sup>、あるいはY分岐型構造で直接結合することにより<sup>7-10)</sup>、発振光を位相同期させている。この場合、横モード数は一般に光導波路の

本数と同数存在し、このうち単峰性遠視野像の得られるのは、すべての導波路を伝播する光が同位相に同期している基本スーパーモード (最低次スーパーモード) に限られる。減衰場結合型位相同期レーザーアレイは、単一横モード発振を得やすいが、高次のスーパーモード発振になりやすく、高出力時まで基本スーパーモード発振を維持することは難しい<sup>6)</sup>。またY分岐型位相同期レーザーアレイは、有効に高次のスーパーモード発振が抑圧され安定した基本スーパーモード発振が得られるが、発振モードの選択性が弱いため、発振光の遠視野像の拡がり角は回折限界値よりも広くなりやすい<sup>10)</sup>。

そこでわれわれは、高出力時 (~200 mW) まで基本スーパーモード発振が維持され、ほぼ回折限界の遠視野像が得られる、位相同期レーザーアレイを開発したので報告する。まず基本スーパーモードに対するモード利得が最大になる、減衰場結合型アレイ導波路の設計を行なった。3本の導波路を集積した減衰場結合型導波路から成る、位相同期レーザーアレイ (3-LA) で 200 mW まで安定した基本スーパーモード発振を実現することができた<sup>11)</sup>。このように、減衰場結合型集積導波路で、基本

スーパーモードに対するモード利得を最小にするという設計方針が有効であることがわかったので、この導波路をさらにY分岐結合することを試み、発振モードの選択性の強化を図った。Y分岐結合構造を形成するうえでのポイントは、この部分での光散乱損失を小さくすることと、この結合領域を狭くすることである。われわれは、このために独自のY分岐結合構造の形成方法を考案した。ここでは、従来のY分岐構造と区別するために、この構造をオフセットカップル構造と呼ぶことにする。この構造を採用することによって、4本/5本オフセットカップル導波路構造の位相同期レーザーアレイ(4/5-OFLA)で150 mWまで安定したパルス基本スーパーモード発振が得られた<sup>12)</sup>。また2/3-OFLAで、200 mWまで安定した連続基本スーパーモード発振が得られた<sup>13)</sup>。

このように単峰性遠視野像が安定して得られる、位相同期レーザーアレイを開発したので、さらに発振光の波面収差を干渉計を用いて調べた。ここで、光導波路が1本から成る従来の半導体レーザーの発振光の波面収差と比較することにより、位相同期レーザーアレイの有用性を確かめた。本論文では、位相同期レーザーアレイの光導波路の設計方針、および素子の基本特性について述べ、とくに発振光の波面収差特性を従来の半導体レーザーと比較して述べることにする。

## 2. 素子構造と設計

高出力時でも安定した基本スーパーモード発振するレ

ーザーアレイを作るには、高次のスーパーモード発振が遮断される集積導波路を設計すればよい。しかしこの条件を満足する集積導波路を作ることは、現在の微細加工技術では難しい。もう一つの方法は、発振モード利得を制御することである。すなわち基本スーパーモードに対するモード利得が高次のスーパーモードに対するモード利得より大きくなるように(基本スーパーモードに対する閾値利得が高次のスーパーモードに対する値より小さくなるように)、導波路を設計することである。以下で位相同期レーザーアレイの製造方法について触れ、発振モード制御について詳しく述べる。

### 2. 素子構造と製作方法

位相同期レーザーアレイの断面構造図をFig. 1に示す。p型GaAs基板に液相成長法(LPE)で1.0  $\mu\text{m}$ の厚さのn型GaAs( $n=2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ; Snドープ)電流阻止層を成長し、続いて有機金属気相成長法で0.2  $\mu\text{m}$ の厚さのn型Al<sub>0.10</sub>Ga<sub>0.90</sub>As( $n=5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ; Siドープ)メルトバック阻止層、0.08  $\mu\text{m}$ の厚さのn型GaAs( $n=5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )メルトバック層を成長した。この後、V溝を〈01 $\bar{1}$ 〉方向にウェットエッチング法で形成した。V溝の間隔は、5  $\mu\text{m}$ である。この後ひきつづいてp-Al<sub>0.41</sub>Ga<sub>0.59</sub>Asクラッド層、p-Al<sub>0.39</sub>Ga<sub>0.67</sub>As光ガイド層、p-Al<sub>0.06</sub>Ga<sub>0.94</sub>As活性層、n-Al<sub>0.50</sub>Ga<sub>0.50</sub>As光反射層、n-Al<sub>0.38</sub>Ga<sub>0.62</sub>Asクラッド層、n-GaAsキャップ層をLPEで形成した。Fig. 2は5  $\mu\text{m}$ 間隔で光導波路が形成されているレーザーアレイの断面の走査型電子顕微鏡(SEM)像を示す。この素子構造で大切な点は、光ガ

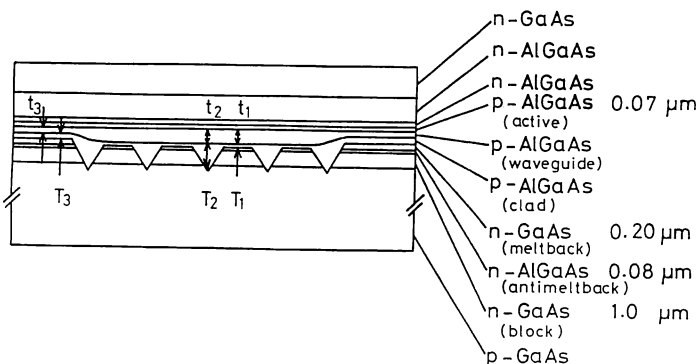


Fig. 1 Schematic cross section of the laser array.  $t_1$ : optical waveguide layer thickness at the antiguide regions (between the optical waveguides),  $t_2$ : optical waveguide layer thickness at the guide regions,  $t_3$ : optical waveguide layer thickness at the antiguide regions (both sides of the array waveguide),  $T_1$ : p-cladding layer thickness at the antiguide regions (between the optical waveguides),  $T_2$ : p-cladding layer thickness at the guide regions,  $T_3$ : p-cladding layer thickness at the antiguide regions (both sides of the array waveguide).

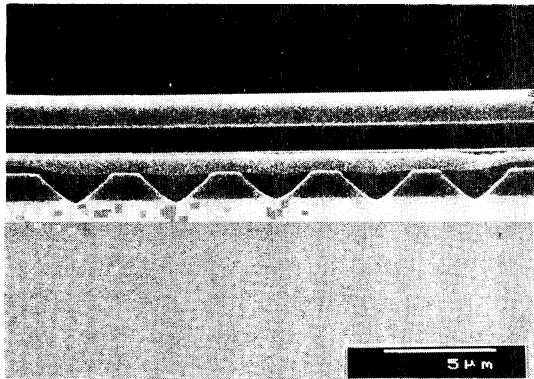


Fig. 2 Micrograph of the stained cross section of a  $5 \mu\text{m}$  period phase-locked laser array.

イド層の厚さが,  $(t_2 - t_1) < (t_2 - t_3)$  なる関係を満足していることと, p 型クラッド層の厚さが,  $T_1 < T_3 < T_2$  なる関係を満足していることの 2 点である。ここで,  $t_1, t_2, t_3$  は, 非導波路領域 (導波路と導波路との間の領域), 導波路領域, 非導波路領域 (アレイ導波路の両側の領域) における光導波層のそれぞれの厚さであり,  $T_1, T_2, T_3$  は, 同じくそれぞれ p 型クラッド層の厚さである。この構造において, 基本スーパーモードに対するモード利得を最大にすることができる。次の節でこのことを説明する。

## 2.2 モード利得

p-n 接合に垂直な方向の光電場を求めることにより,

この光電場に対する実効屈折率をまず求める。ここで, 光反射層 p-Al<sub>0.50</sub>Ga<sub>0.50</sub>As, 活性層 p-Al<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.94</sub>As, 光導波路層 p-Al<sub>0.33</sub>Ga<sub>0.67</sub>As, クラッド層 p-Al<sub>0.41</sub>Ga<sub>0.59</sub>As のそれぞれの屈折率を 3.31, 3.61, 3.46, 3.42 とし, n-GaAs 層の屈折率を 3.64, 吸収係数を  $8000 \text{ cm}^{-1}$  とした<sup>14)</sup>。また活性層の厚さを  $0.07 \mu\text{m}$  とした。

光導波路中を伝播する光電場  $E_i(x)$  ( $i=r, a, g, c, ab$ ) は次の Maxwell の方程式を満たす (座標については, Fig. 3 を参照)。

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} E(x) + [n_i(x)^2 k_0^2 - \beta^2] E(x) = 0 \quad (1)$$

ここに,  $n_i(x)$  は各層の屈折率,  $E_r, E_a, E_g, E_c, E_{ab}$  はそれぞれ光反射層, 活性層, 光ガイド層, クラッド層, n 型 GaAs 層中の光電場を示す。 $\lambda_0$  は真空中の波長,  $k_0$  は伝播定数で  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  である。また

$$\beta = k_0 \times n_{\text{eff}}$$

$$k_i^2 = n_i^2 k_0^2 - \beta^2$$

で  $n_{\text{eff}}$  は実効屈折率である。(1)式の解は次のように与えられる<sup>15-17)</sup>。

$$E_r = A_r \exp(k_r x)$$

$$E_a = A_a \cos(k_a x) + B_a \sin(k_a x)$$

$$E_g = A_g \cos[k_g(x - d_a)] + B_g \sin[k_g(x - d_a)]$$

$$E_c = A_c \cos[k_c(x - d_a - d_g)] + B_c \sin[k_c(x - d_a - d_g)]$$

$$E_{ab} = A_{ab} \exp[-k_{ab}(x - d_a - d_g - d_c)]$$

ここで, 光の伝播方向を  $z$  軸方向とし, p-n 接合面を  $x$

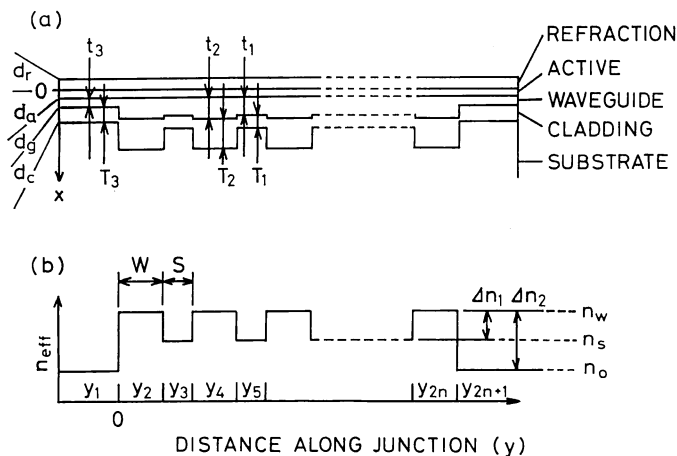


Fig. 3 (a) Schematic cross section of the analytical model of the phase-locked array laser.  $d_r$ : refraction layer thickness,  $d_a$ : active layer thickness,  $d_g$ : optical waveguide layer thickness,  $d_c$ : p-cladding layer thickness. (b) Effective guide index distribution as a function of distance along the p-n junction.  $n_w$ : effective index at the guide regions,  $n_s$ : effective index at the antiguide regions (between the optical waveguides),  $n_0$ : effective index at the antiguide regions (both sides of the array waveguide).

軸に垂直にとる. そして GaAs 層の屈折率については複素数として扱い, その他の層の屈折率については, 虚数部を無視する. また  $d_a, d_g, d_c$  はそれぞれ活性層, 光導波層, p 型クラッド層の厚さである. 係数  $A_i, A_a, A_g, A_c, A_{ab}, B_a, B_g, B_c$  は境界条件から求められる. 伝播定数と, 伝播モード (基本モード) の関係は, 次式 (2) で与えられる.

$$k_c d_c = \tan^{-1} \left( \frac{k_c M_2 - k_{ab} L_2}{k_{ab} M_2 - k_c L_2} \right) \quad (2)$$

ここに,

$$M_1 = (k_a/k_g) [-\sin(k_a d_a) + (k_t/k_a) \cos(k_a d_a)]$$

$$M_2 = (k_g/k_c) [L_1 \sin(k_g d_g) + M_1 \cos(k_g d_g)]$$

$$L_1 = \cos(k_a d_a) + (k_t/k_a) \sin(k_a d_a)$$

$$L_2 = L_1 \cos(k_g d_g) - M_1 \sin(k_g d_g)$$

である. (2) 式から,  $d_a, d_g$  を与えれば  $\beta$  が求まり,  $E_i, n_{\text{eff}}$  が決定される.

Fig. 4 は,  $d_c = 0.4, 0.6, 0.8 \mu\text{m}$  の場合について, p 型クラッド層の厚さに対する実効屈折率を示す. ただし活性層の厚さを  $0.07 \mu\text{m}$  とした. Fig. 4 にもとづいて  $(t_2 - t_1) < (t_2 - t_3)$ ,  $T_1 < T_3 < T_2$  の場合について実効屈折率プロファイルを考えて, Fig. 3(b) のようになることがわかる. モード利得は, 局所的利得  $g(y)$  と光導波路中の光電場  $E(y)$  の積を積分して与えられ,  $g(y)$

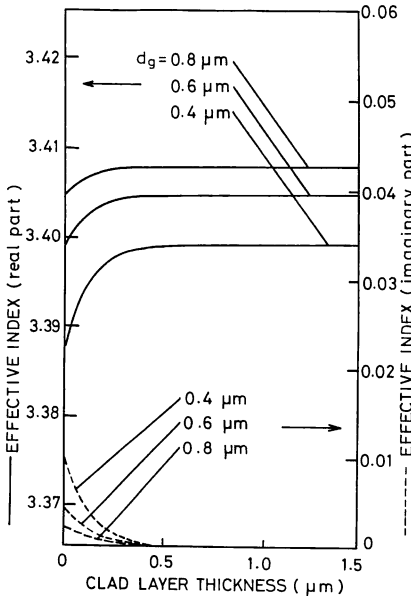


Fig. 4 Effective guide indices vs. cladding layer thickness. Active layer thickness:  $0.07 \mu\text{m}$ . Waveguide layer thickness,  $d_g$ :  $0.4, 0.6,$  and  $0.8 \mu\text{m}$ .

は, 次式 (3) で与えられる<sup>18)</sup>.

$$g(y) = \Gamma(y) [a N(y) - b] \quad (3)$$

ここに  $a = 1.08 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$ ,  $b = 146 \text{ cm}^{-1}$  であり,  $\Gamma(y)$  は閉込め係数で,  $N(y)$  は注入電流密度である.  $N(y)$  は, Yonezu らの式<sup>18-20)</sup>を用いた. 求めるモード利得  $G_v$  は次式 (4) で与えられる.

$$G_v = \int_{-\infty}^{\infty} g(y) |E^{(\nu)}(y)|^2 dy / \int_{-\infty}^{\infty} |E^{(\nu)}(y)|^2 dy \quad (4)$$

ここに  $E^{(\nu)}(y)$  は  $\nu$  次スーパーモードに対応する光電場で,  $y$  軸を p-n 接合面に平行にとっている. 光電場  $E^{(\nu)}(y)$  は次の方程式 (5) を満たす (座標については Fig. 3 を参照).

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} E^{(\nu)}(y) + [n^2(y) k_0^2 - \beta^2] E^{(\nu)}(y) = 0 \quad (5)$$

ここに,

$$n(y) = \begin{cases} n_s & \text{if } y = y_{2i+1} \\ n_w & \text{if } y = y_{2i} \\ n_0 & \text{if } y < 0, y > n(W+S) \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$\beta = k_0 N_{\text{eff}}$$

$$k_{2i+1}^2 = \beta^2 - n^2(y_{2i+1}) \cdot k_0^2$$

$$k_{2i}^2 = n^2(y_{2i}) k_0^2 - \beta^2 \quad i = 1, 2, \dots, n-1$$

$$k_1^2 = \beta^2 - n_0^2 k_0^2$$

$$k_{2n}^2 = n_0^2 k_0^2 - \beta^2$$

$$E_1 = A_1 \exp(k_1 y_1)$$

$$E_2 = A_2 \cos(k_2 y_2) + B_2 \sin(k_2 y_2)$$

$$E_3 = A_3 \cosh(k_3 y_3) + B_3 \sinh(k_3 y_3)$$

$$E_{2i-1} = A_{2i-1} \cosh(k_{2i-1} y_{2i-1}) + B_{2i-1} \sinh(k_{2i-1} y_{2i-1})$$

$$E_{2i} = A_{2i} \cos(k_{2i} y_{2i}) + B_{2i} \sin(k_{2i} y_{2i})$$

$$E_{2n} = A_{2n} \cos(k_{2n} y_{2n}) + B_{2n} \sin(k_{2n} y_{2n})$$

$$E_{2n+1} = A_{2n+1} \exp(k_{2n+1} y_{2n+1})$$

$$y_{2i+1} = y - [iW + (i-1)S]$$

$$y_{2i} = y - i(W+S) \quad i = 1, 2, \dots, n$$

である. 係数  $A_1, A_2, \dots, A_{2n+1}, B_2, \dots, B_{2n}$  は境界条件から次のように求まる.

$$A_1 = A_2 + L_2$$

$$B_2 = (k_1/k_2) A_1 = M_2$$

$$A_3 = L_2 \cos(k_2 W) + M_2 \sin(k_2 W) = L_3$$

$$B_3 = (k_2/k_3) [-L_2 \sin(k_2 W) + M_2 \cos(k_2 W)] = M_3$$

$$A_4 = L_3 \cosh(k_3 S) + M_3 \sinh(k_3 S) = L_4$$

$$B_4 = (k_3/k_4) [L_3 \sinh(k_3 S) + M_3 \cos(k_3 S)] = M_4$$

$$A_{2i+1} = L_{2i} \cos(k_{2i} W) + M_{2i} \sin(k_{2i} W) = L_{2i+1}$$

$$B_{2i+1} = (k_{2i}/k_{2i+1}) [-L_{2i} \sin(k_{2i} W)$$

$$+ M_{2i} \cos(k_{2i} W)] = M_{2i+1}$$

$$A_{2i+2} = L_{2i+1} \cosh(k_{2i+1} S) + M_{2i+1} \sinh(k_{2i+1} S) = L_{2i+2}$$

$$B_{2i+2} = (k_{2i+1}/k_{2i+2}) [L_{2i+1} \sinh(k_{2i+1}S) + M_{2i+1} \cosh(k_{2i+1}S)] = M_{2i+2}$$

$$A_{2n+1} = L_{2n} \cos(k_{2n}W) + M_{2n} \sin(k_{2n}W)$$

$$B_{2n+1} = (k_{2n}/k_{2n+1}) [-L_{2n} \sin(k_{2n}W) + M_{2n} \cos(k_{2n}W)]$$

これから伝播定数  $k_{2n}$  と伝播モードの関係は、次式(6)で与えられる。

$$k_{2n}W = \tan^{-1} \left( \frac{k_{2n}M_{2n} - k_{2n+1}L_{2n}}{k_{2n}L_{2n} - k_{2n+1}M_{2n}} \right) + 2\pi(\nu - 1) \quad (6)$$

ここに、 $\nu = 1, 2, \dots, n$  である。

$S = 1 \mu\text{m}$ ,  $W = 4 \mu\text{m}$ ,  $\Delta n_1 = 0.05\%$ ,  $\Delta n_2 = 0.35\%$  の場合について、モード利得を計算した結果を Fig. 5 に示す。この図では、基本スーパーモードに対するモード利得を1に規格化して示してある。基本スーパーモードに対するモード利得が最大であることがわかる。

### 2.3 オフセットカップル構造

一般に減衰場結合型レーザーアレイは、利得の空間的ホールバーニングのために、高注入時に出力が不安定になりやすい。一方Yカップル型レーザーアレイは発振モードの選択性が強く、安定した発振が得られるが、光損失の小さい構造を作ることが難しい。われわれは、まずYカップル構造のこのような問題を解決し、減衰場結合型導波路にYカップル型構造を作りつけ、安定した単一基本スーパーモード発振の得られる、レーザーアレイを試作した。

モード選択性に優れるYカップル構造を作るには、この結合部の面積を小さくすることが必要である。また光損失を小さくするには、この結合部で活性層を平坦に形成することと、光導波路を滑らかに結合する必要がある。このために、Fig. 6(a)に示すマスクパターンを用いた。このパターンを用いると、Fig. 6(b)に示す従来のパターンを用いた場合と異なり、結合部の面積を小さ

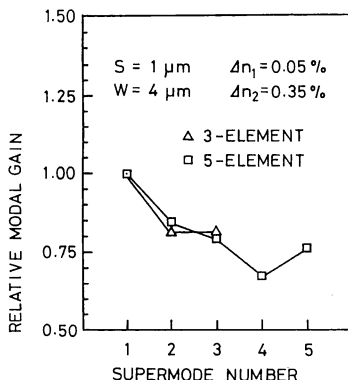


Fig. 5 Relative modal gains  $G_r$  for the supermodes of the arrays described in Fig. 3.

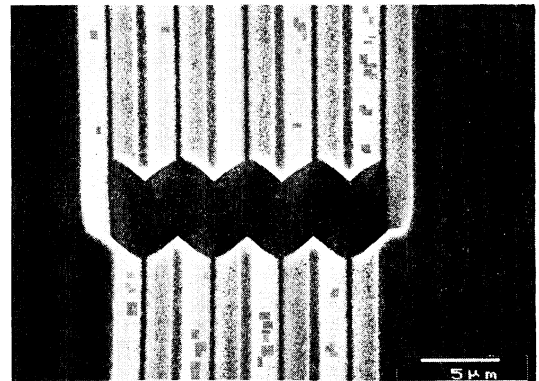
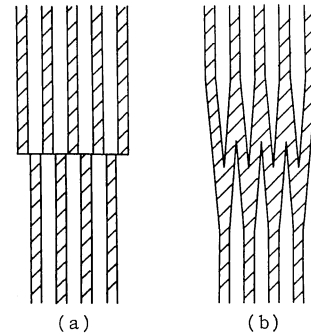


Fig. 6 (a) The photolithographic mask pattern of the offset-coupled structure. (b) The photolithographic mask pattern of the Y-coupled structure. (c) Micrograph of a top view of the V-channeled substrate around the symmetrical branching waveguide region (the offset-coupled region).

く形成でき、結果的に活性層を平坦に形成できる。また結合部における両導波路の先端部をどれだけ近づけるか(この図では両先端部は一致させてある)によって導波部の結合の滑らかさと、結合部の面積をコントロールできる。われわれは、この構造を従来のYカップル型構造と区別するために、以後オフセットカップル構造と呼ぶことにする。Fig. 6(c)にオフセットカップル構造を形成するためのV溝パターンのSEM像を示す。このV溝の上にLPEで光導波路を形成する。

## 3. 素子特性

### 3.1 光出力特性

室温下での光出力特性を Fig. 7 に示す。(a)3本のレーザーアレイ、(b)2/3-OFLA、(c)4/5-OFLA についてそれぞれ示してある。レーザーの共振器長は、いずれも  $250 \mu\text{m}$  である。また端面の反射率は、出射側 5%、反出射側 95% になるように、コーティング処理してあ

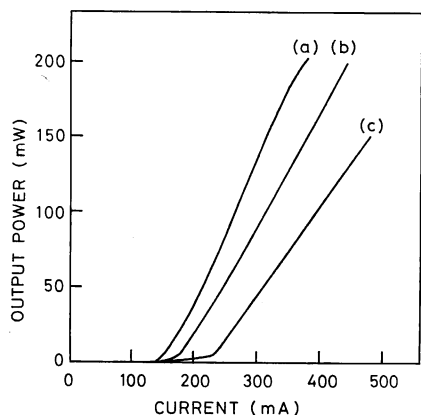


Fig. 7 Light output vs. current characteristics: (a) three-LA, (b) 2/3-OFLA, (c) 4/5-OFLA.

る。発振閾値電流は、(a) 148 mA, (b) 175 mA, (c) 240 mA で、発振波長は、いずれも 830 nm である。外部発光効率、(a) 0.90 W/A, (b) 0.75 W/A, (c) 0.62 W/A である。最大出力は、(a) 200 mW, (b) 200 mW, (c) 150 mW である。外部発光効率を集積数の等しい(a), (b)について、オフセットカップル構造を作りつけていない場合(a) 0.90 W/A と、ある場合(b) 0.75 W/A とを比較するとほとんど変わらない。すなわち、オフセットカップル部における光損失が十分に小さいことを示している。閾値電流値が(a), (b)よりも(c)が高く、最大光出力が(a), (b)よりも(c)が低いのは、光導波路の集積数が(a), (b)よりも(c)が多いため、今後素子構造を改良することで改善されるものと考えられる。

### 3.2 遠視野像

Fig. 8 に(a) 3-LA, (b) 2/3-OFLA, (c) 4/5-OFLA に対する遠視野像を示す。(b), (c)図においては、それぞれ 3 本、5 本導波路側からの出射光に対するものである。導波路幅  $W$  は  $4 \mu\text{m}$ 、導波路間の非導波路領域の幅は  $1 \mu\text{m}$  である。単峰性遠視野像で、拡がり角の半値幅は、(a)  $3.2^\circ$ , (b)  $3.2^\circ$ , (c)  $2.5^\circ$  であり、ほぼ回折限界の値である。高電流注入時 (3-LA では、閾値の 2.2 倍、2/3-OFLA では、閾値の 2.2 倍、4/5-OFLA では、1.8 倍以上) に、主ピークの両端の副ピークが増大するが、これは、高次のスーパーモード成分がわずかに混入したためと考えられる。

### 3.3 等位相波面の測定

遠視野像や近視野像の観測から、レーザーアレイの出射光のおよその性質がわかるが、さらに詳しく調べるため、Mach-Zender 干渉計を用いて出射光の等位相波面の観測をした。一般的にレーザーアレイの出射光は、レンズ系により集光されて使われるので、その集光特性に関心もたれる。すなわち波面収差の小さい出射光が望まれる。

いままで、レーザーアレイの出射光の波面収差の測定の報告が、いくつかある。たとえば、Carlson らは、10 本の導波路を集積した利得導波型レーザーアレイ<sup>21)</sup>、8 本の導波路を集積した屈折率導波型レーザーアレイ<sup>22)</sup>について報告している。しかしこれらの報告は、安定した基本スーパーモード発振が得られるレーザーアレイに対して行なわれたものではない。われわれは、以上説明してきた、レーザーアレイについて、その出射光の等位相

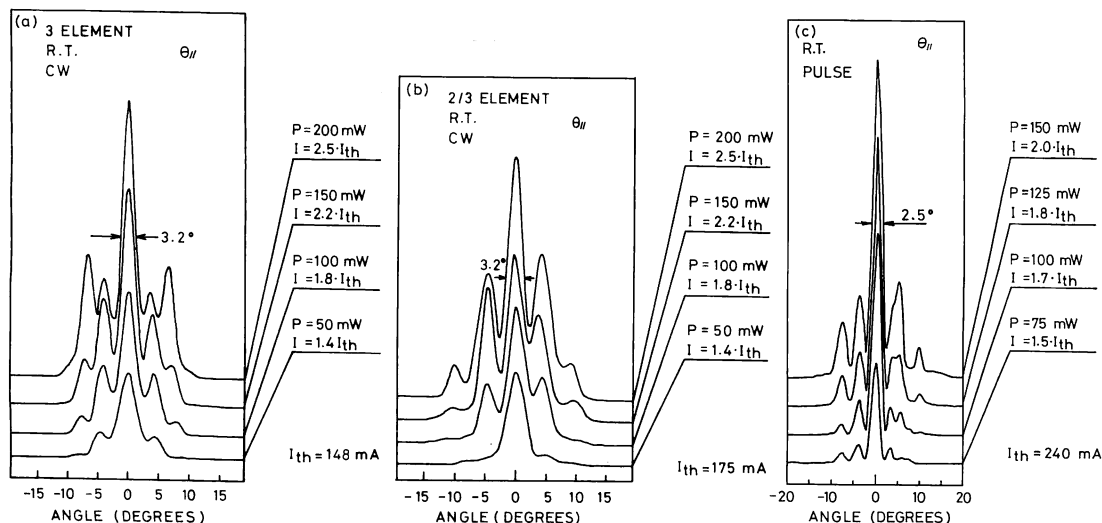


Fig. 8 Far-field intensity patterns: (a) three-LA, (b) 2/3-OFLA, (c) 4/5-OFLA.

波面の観測を行ないその特性を詳しく調べた。

遠視野像の強度が最大になる点(回折焦点)の強度は、収差  $\Phi(x, y)$  が存在すると、無収差の場合を 1 とした場合次式(7)で与えられるように減少する。

$$S_t = \frac{1}{A^2} \left| \int_A \exp \left[ i \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \Phi(x, y) \right] dx dy \right|^2 \quad (7)$$

ただし  $\Phi(x, y)$  は、射出瞳面における収差関数であり、 $A$  は射出瞳面の面積、 $\lambda$  は出射光の波長である。規格化された強度  $S_t$  は Strehl 強度と呼ばれる値である。ここで、収差関数  $\Phi(x, y)$  が小さければ、この値は次式(8)で与えられるように近似され、収差の性質に依存せず、波面収差の自乗平均値に比例する量だけ 1 より小さい。

$$S_t = 1 - (2\pi/\lambda)^2 (\Delta\Phi_{rms})^2 \quad (8)$$

ここに  $\Delta\Phi_{rms}$  は、波面収差の自乗平均値である。ここで、 $S_t$  が 0.8 以上であれば十分に波面収差が小さく、実用上ほとんど問題がないとする Maréchal の基準を採用すれば、 $\Delta\Phi_{rms}$  は  $\lambda/14$  以下に対応することになる<sup>23)</sup>。

波面収差測定には、Mach-Zender 干渉計 (LADITE-800: Wyko 社製) を用いた。これは、参照光路長を 1/2 位相変化させる間に複数回干渉縞を測定し、等位相波面を求める、いわゆる位相シフト干渉計の構成をとっている。ここでは、1/8 位相ごとの干渉縞の強度分布  $I_1(x, y)$ ,  $I_2(x, y)$ ,  $I_3(x, y)$  を測定し、次式(9)によって  $\Phi(x, y)$  を決定した<sup>24)</sup>。

$$\Phi(x, y) = \frac{\lambda}{2\pi} \tan^{-1} \frac{I_3(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_2(x, y)} \quad (9)$$

測定光を数値開口比 (NA) 0.5 のレンズを用いて平行光にして干渉計に入射させた。測定は、連続駆動の下に行なった。

Fig. 9 に、2/3-OFLA の等位相波面の 3 次元鳥瞰図

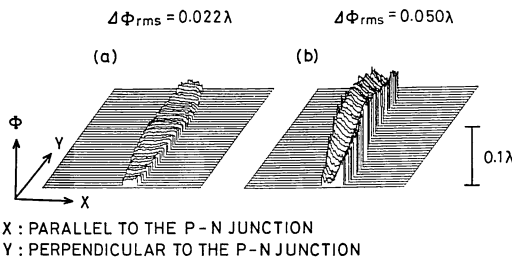


Fig. 9 Three-dimensional perspective phase aberration plots of the collimated output of 2/3-OFLA (a) 50 mW, (b) 150 mW with an NA = 0.5 collimating lens are shown. The  $x$  direction is parallel to the p-n junction, the  $y$  direction is perpendicular to the p-n junction, and the  $z$  direction is the magnitude of the phase.

を示す。自乗平均収差  $\Delta\Phi_{rms}$  は、50 mW, 150 mW 出力時にそれぞれ  $0.022\lambda$ ,  $0.050\lambda$  である。2/3-OFLA の  $\Delta\Phi_{rms}$  はいずれも  $\lambda/14$  以下である。Fig. 10 は、同様に  $\Delta\Phi_{rms}$  の出力依存性を示す。黒丸(●)白丸(○)はそれぞれ、3-LA, 2/3-OFLA に対する値を示す。測定誤差は、 $\lambda/50$  である。3-LA の収差が 2/3-OFLA のものより大きいのは、発振モードの選択性が弱いためと考えられる。すなわちオフセットカップル構造が発振モードの選択に有効に寄与しているものと考えられる。2/3-OFLA の  $\Delta\Phi_{rms}$  は、出力 200 mW 以下の範囲で  $\lambda/14$  以下であり、十分に小さい。出力の増大とともに  $\Delta\Phi_{rms}$  も増大しているが、これは電流注入のために光導波路の光閉込め効果が弱まり、利得導波路モードが少しずつ現われたためと考えられる<sup>25)</sup>。

ここで本報告における位相同期レーザーアレイの波面収差がいかに小さいかを感覚的に示すために、以前に筆者が開発した SCI (semi-cylindrical shaped inner stripe) レーザ<sup>26)</sup> のものと比較して示す。Fig. 11 に

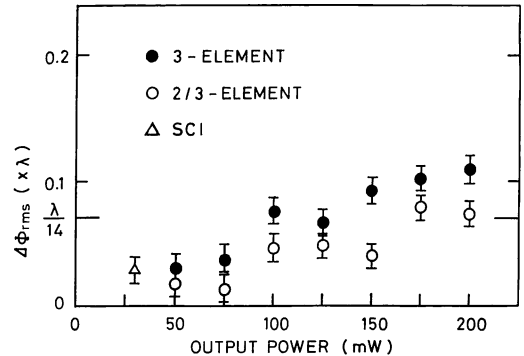


Fig. 10 Output power dependence of the rms phase aberration of (●) three-LA, (○) 2/3-OFLA, (△) SCI-LD.

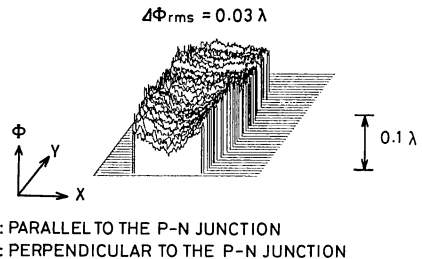


Fig. 11 Three-dimensional perspective phase aberration plots of the collimated output of SCI-LD with an NA = 0.5 collimating lens are shown. The  $x$ ,  $y$ , and  $z$  directions are the same as Fig. 9.

30 mW 出力時の等位相波面の 3 次元鳥瞰図を示す. この SCI レーザーは, 光導波路が 1 本からなるいわゆる従来型のレーザーで, PCW (planer convex waveguide)<sup>17)</sup> 等と同様の低波面収差特性を有する. Fig. 10 中に SCI レーザーの  $\Delta\phi_{rms}$  を三角形の記号で示したが, 本報告の位相同期レーザーアレイの波面収差特性は, 従来型のレーザーと比較して遜色のないものであることがわかる.

次に 4/5-OFLA について, 同様の結果を示す. ここではパルス駆動での発振しか得られなかったが, 波面収差特性は, 優れたものが得られた. Fig. 12 は, NA=0.5 のレンズでコリメートされた 4/5-OFLA の 5 本側からの出射光の等位相波面の三次元鳥瞰図である. 出力は 150 mW である. 自乗平均収差は  $0.11\lambda$  で, Strehl 強度は 0.62 である.

Fig. 13 は, 4/5-OFLA の自乗平均収差を出力の閾値として表わしたものである. 収差の大きさが 75 mW から 150 mW までほとんど変化のないことがわかる. すなわち, 安定した基本スーパーモード発振しているといえる. Fig. 14 は, 4/5-OFLA の出射光をコリメートするレンズの NA を変えた場合の自乗平均収差の値の変化を示したものである. NA が 0.3 以下のレンズ

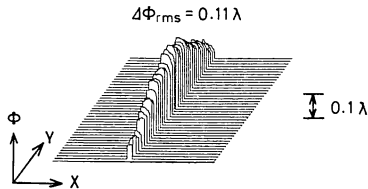


Fig. 12 Three-dimensional perspective phase aberration plots of the collimated output of 4/5-OFLA with an NA=0.5 collimating lens are shown. The  $x$ ,  $y$ , and  $z$  directions are the same as Fig. 9.

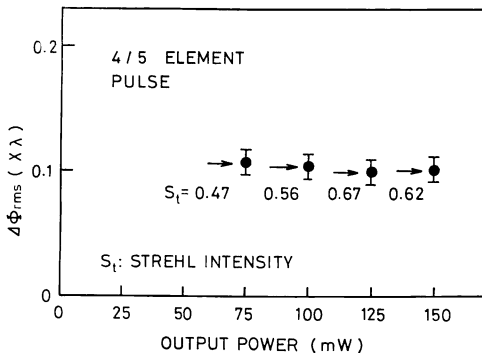


Fig. 13 Output power dependence of the rms phase aberration of 4/5-OFLA with an NA=0.5 collimating lens.

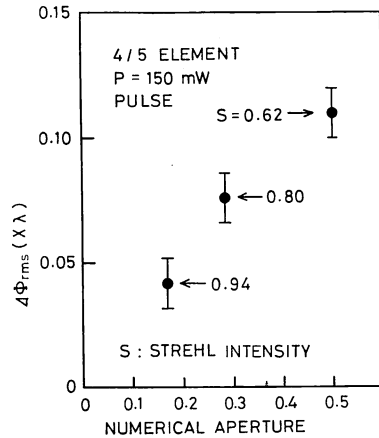


Fig. 14 RMS phase aberrations as a function of the numerical aperture of the collimator lens for the 4/5-OFLA operated at 150 mW.

でコリメートすれば, 自乗平均収差が  $\lambda/14$  以下の低収差波面となることを示している. この場合, NA の大きなレンズを用いた場合と比べ光強度は減少するが, レーザーアレイは単一導波路の従来のレーザーダイオードより高出力が得られるので, これで十分に補うことができる.

#### 4. ま と め

回折限界の単峰性遠視野像が得られる位相同期レーザーアレイを開発した. 3-LA, 2/3-OFLA で, 200 mW (cw 駆動) まで安定した基本スーパーモード発振を確認した. また 4/5-OFLA でやはり 150 mW (パルス駆動) まで安定した基本スーパーモード発振を確認した. これらレーザーアレイの出射光の等位相波面を Mach-Zehnder 干渉計によって観測した結果, 従来の単一光導波路から構成されたレーザーの出射光と同程度の低収差であった. モード利得の制御に加えて, オフセットカップル構造を作りつけることにより, 発振モードの制御が確実に行なわれ, 十分な低収差出力が得られることがわかった. 本報告のレーザーアレイは, 高出力光源として従来のレーザーと置き換えることができるものと考えられる.

#### 文 献

- 1) E. Kapon, J. Katz and A. Yariv: "Supermode analysis of phase-locked arrays of semiconductor lasers," *Opt. Lett.*, **10** (1984) 125-127.
- 2) M.O. Vassel: "Structure of optical guided modes in planar multilayers of optically anisotropic materials," *J. Opt. Soc. Am.*, **64** (1974) 166-173.



- 3) E. Kapon, V. Lindsey, J. Katz, S. Margalit and A. Yariv: "Chirped arrays of diode lasers for supermode control," *Appl. Phys. Lett.*, **45** (1984) 200-202.
- 4) W. Streifer, A. Hardy, R.D. Burnham and D.R. Scifres: "Single-lobe phased-array diode lasers," *Electron. Lett.*, **21** (1985) 118-119.
- 5) W. Streifer, A. Hardy, R.D. Burnham and D.R. Scifres: "Criteria for design of single-lobe phased-array diode lasers," *Electron. Lett.*, **21** (1985) 505-506.
- 6) S. Mukai, C. Lindsey, J. Katz, E. Kapon, Z. Ravnoy, S. Margalit and A. Yariv: "Fundamental mode oscillation of a buried ridge waveguide laser array," *Appl. Phys. Lett.*, **45** (1984) 834-845.
- 7) K.L. Chen and S. Wang: "Single-lobe symmetric coupled laser arrays," *Electron. Lett.*, **21** (1985) 347-349.
- 8) D. Botez, L. Mawst, P. Hayashida, T.J. Roth and D.R. Scifres: "Stable, single-(array)-mode operation from phase-locked, interferometric arrays of index-guided AlGaAs/GaAs diode lasers," *Appl. Phys. Lett.*, **52** (1988) 266-268.
- 9) M. Taneya, M. Matsumoto, S. Matsui, S. Yano and T. Hijikata: "0° phase mode operation in phased-array laser diode with symmetrically branching waveguide," *Appl. Phys. Lett.*, **47** (1985) 341-343.
- 10) D.F. Welch, P.S. Cross, D.R. Scifres, W. Streifer and R.D. Burnham: "High-power (cw) in-phase locked "Y" coupled laser arrays," *Appl. Phys. Lett.*, **49** (1986) 1632-1634.
- 11) K. Shinozaki, R. Furukawa, T. Fukunaga and N. Watanabe: "Phase front measurements of AlGaAs 830 nm phase-locked lasers with a real-refractive-index waveguide," *Appl. Phys. Lett.*, **54** (1989) 2654-2655.
- 12) K. Shinozaki, R. Furukawa, T. Fukunaga and N. Watanabe: "Supermode control and phase front measurements of phase-locked offset-coupled laser arrays with a large optical waveguide structure," *J. Appl. Phys.*, **66** (1989) 1057-1064.
- 13) K. Shinozaki, R. Furukawa, T. Fukunaga and N. Watanabe: "Low phase-aberration output of 830 nm AlGaAs offset-coupled laser arrays," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **28** (1989) L1426-L1428.
- 14) H.C. Casey, Jr., D.D. Sell and M.B. Panish: "Refractive index of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As between 1.2 and 1.8 eV," *Appl. Phys. Lett.*, **24** (1974) 63-65.
- 15) J.K. Butler: "Theory of transverse cavity mode selection in homojunction and heterojunction semiconductor diode lasers," *J. Appl. Phys.*, **42** (1971) 4447-4457.
- 16) T. Kuroda, M. Nakamura, K. Aiki and J. Umeda: "Channeled-substrate-planar structure Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As lasers: an analytical waveguide study," *Appl. Opt.*, **17** (1978) 3264-3267.
- 17) K. Sakai, F. Tanaka, Y. Noda, Y. Matushita, S. Akiba and T. Yamamoto: "Transverse mode controlled InGaAsP/InP lasers at 1.5 μm range with buffer-layer loaded plano-convex waveguide (BL-PCW) structure," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-17** (1981) 1245-1247.
- 18) W.T. Tsang: "The effects of lateral current spreading, carrier out-diffusion, and optical mode losses on the threshold current density of GaAs-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As stripe-geometry DH lasers," *J. Appl. Phys.*, **49** (1978) 1031-1044.
- 19) H. Yonezu, I. Sakuma, K. Kobayashi, T. Tanejima, M. Ueno and Y. Nannichi: "A GaAs-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As double heterostructure planar stripe laser," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **12** (1973) 1585-1593.
- 20) H.C. Casey, Jr. and M.B. Panish: *Heterostructure Lasers*, 1st ed. (Academic, New York, 1978) p. 217.
- 21) N.W. Carlson and V.J. Masin: "Phase front measurements of high-power diode lasers for optical systems," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-22** (1986) 2079-2083.
- 22) B. Goldstein, N.W. Carlson, G.A. Evans, N.A. Dinkel and V.J. Masin: "Performance of a channelled-substrate-planar high-power phase-locked array operating in the diffraction limit," *Electron. Lett.*, **23** (1987) 1136-1137.
- 23) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics*, 5th ed. (Pergamon, Oxford, 1975) p. 469.
- 24) J.H. Bruning, D.R. Herriott, J.E. Gallagher, D.P. Rosenfeld, A.D. White and D.J. Brangaccio: "Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses," *Appl. Opt.*, **13** (1974) 2693-2703.
- 25) D.D. Cook and F.R. Nash: "Gain-induced guiding and astigmatic output beam of GaAs lasers," *J. Appl. Phys.*, **46** (1975) 1660-1672.
- 26) K. Shinozaki, A. Watanabe, R. Furukawa and N. Watanabe: "High-power operation of 830 nm AlGaAs laser diodes," *J. Appl. Phys.*, **65** (1989) 2907-2911.