レーザーオリジナル 3

高効率GaAlAs モノリシックレンズ LED

安部正幸*・浜口久志*・真田達行*
山腰茂伸*・山岡 豊*・遠山嘉一*

(昭和54年10月12日受理)

High Efficiency GaAlAs LED with Monolithic Lens

Masayuki ABE*, Hisashi HAMAGUCHI*, Tatsuyuki SANADA*,
Shigenobu YAMAKOSHI*, Toyoshi YAMAOKA*, and Yoshikazu TÖYAMA*

(Received October 12, 1979)

A New type GaAlAs monolithic lens coupled LED has been proposed and developed to achieve the highly efficient performance for fiber-optical communications. A GaAlAs lens monolithically formed on the LED surface and the spherical-ended fiber are efficiently coupled under the optimized design. Using the lensed LED having the magnification β of 2, the efficiency was improved 4 times better than that of flat LED. The lens radius of 80 μm and thickness of 60 μm are chosen. The improvement factor β^2 in efficiency was confirmed for β of from 1.6 to 2.2. For LED with the emitting diameter of 20 μm , at the forward current of 100mA, powers of 0.7 and 1.2mW were coupled into 0.16 N A, 85 μm core, and 0.28 N A, 100 μm core step index fibers, respectively.

1. まえがき

光通信用発光ダイオード(LED)は、短・中距離光ファイバ伝送用光源の一つとして重要な地位を占めている。LEDに要請される性能として、高効率(低消費入力で高い光パワを伝送路ファイバに入れること)、高速応答性、発光波長が光ファイバの低損失域にあり、発光スペクトル半値幅が狭い、高信頼性、取扱い易く、低価格、等があげられる。LEDの光通信用光源としての地位を確固たるものにするためには、上記性能の中でも特に高効率と高信頼性が重要であり、現在迄にさまざまなLED構造が提案

されてきた。

面発光型に関しては。光取出し面がフラット面であるウェル型¹⁻³⁾、厚膜ウインドウ型^{4,5)}、球面であるスフェリカルエミッタ⁶⁻⁸⁾、インテグラルレンズ型⁹⁾および球レンズ外付型¹⁰⁾等がある。端面発光型に関しては、スーパーluminescentダイオード(SLD)¹¹⁾、光ガイド型¹²⁻¹⁵⁾等がある。これらのダイオードは、発光波長が光ファイバの低損失域に適合するように3元素化合物半導体GaAlAsを用いて製作されている。現状では、低損失光ファイバに数百 μW の光パワを高効率で結合させることが出来るようになり、信頼性に関しては、室温連続通電で 4×10^7

*富士通研究所(〒211 川崎市中原区上小田中1015)

*Fujitsu Laboratories Ltd., Kamikodanaka, Nakahara-ku, Kawasaki 211

時間以上の寿命が推定され^{5,16)}、すでに短・中距離中容量伝送用光源として製品化されるに至っている。

LED における発光は、内部量子効率が通常かなり高く ($\sim 100\%$)、注入キャリアは再結合によりほとんどフォトンに変換されている。しかし、(1)結晶の屈折率が高いため LED 内での放射光は、大部分が全反射され外部量子効率は低くなり、さらに(2)光ファイバの受光角に制限されることによって、光ファイバへの結合パワはかなり小さくなる。上記の問題点を解決する際に重要なことは、結晶内の放射光をいかに多く光ファイバに結合させるかという点にあり、(1)、(2)の問題を同時に解決することが必要である。従来、種々提案されてきた LED 構造は、以上の点から考えて必ずしも十分なものであるとは言い難い。

本論文では、高効率化のための新構造 GaAlAs モノリシックレンズ LED を提案し、これを実現するための基本技術を開発することにより従来にない高効率特性を得ることが出来たので報告する。LED の光取出し面にモノリシックに形成された球面レンズと光ファイバの先端を球面にした先球ファイバのレンズ効果とを組み合わせることにより、LED と光ファイバとの高結合効率化を達成した。この結合方式は、すでに報告されているスフェリカルエミッタ⁶⁻⁹⁾とは異なり、上記両レンズによる複合レンズ系の設計を行ない光ファイバへの結合パワが最大になるようにしたものである。また、LED 性能を支配する活性領域のパラメータを最適化し素子製作を行なった。以下、結合原理と設計、構造と製作および得られた特性について記述する。

2. 結合原理と設計

2.1 新結合方式

Fig. 1 は、レンズ LED—先球ファイバ結合方式と、従来、著者等が開発してきたフラット LED—先球ファイバ結合方式⁴⁾とを比較したものである。フラット LED と先球ファイバとの

Fig. 1. New coupling technique

結合は、

- (1) 発光部の虚像が先球レンズの前側焦点面にあり、且つ
- (2) 虚像の直径 d_0 (この場合、像倍率 $\beta = 1$ で発光径 d と一致) が、光ファイバのコアクラッド境界での全反射によって伝送される光の臨界角 ϕ_c で定義される臨界径 d_c と等しい ($d_0 = d_c$) とし、

最適の状態になる。

光ファイバへの最大入射角 ϕ_m は、先球ファイバのコア径 d_1 と前側焦点距離で定められ、結合効率 η_c は、 $d_0 \leq d_c$ のとき $\eta_c \propto r^{-2}$ 、 $d_0 > d_c$ のとき $\eta_c \propto d^{-2}$ である^{4,17)}。像倍率 β 、角倍率 γ とすると、 $\beta\gamma = n_0$ (結晶の屈折率) が成り立つ。フラット LED ($\beta = 1$) の場合、発光部から光ファイバを見込む最大入射角 ϕ は、 $\gamma = n_0$ より $\phi = \phi_m / n_0$ となる。一方、レンズ LED ($\beta > 1$) においては、発光部の虚像 (直径 $d_0 = \beta d$) と光ファイバとの最適結合条件は、フラット LED の場合と同一であるが、Fig. 1 から明らかに、 β が大きくなるにつれて発光部が光ファイバ側に近づくため高結合が得られる。最大入射角 ϕ' は、 $\phi' = \beta \phi_m / n_0 = \beta \phi$ となり、すなわちフラット LED の場合に対して

β 倍になり, 光取出し効率 η (=光ファイバへの入射光/LED内放射光)は, 次節に述べるように β^2 倍向上する。

2.2 光取出し効率と改善率

光取出し効率 η の解析に際しては, 複合レンズ系の前側焦点面に発光部を, また後側焦点面にコア径 d_1 に相当する開口絞りをおいた場合のモデルをもとに幾何光学で解析した¹⁸⁾。前側および後側焦点距離 f および f' は,

$$f = \frac{-\{n_o r_o + s(n_o - 1)\}r}{r_o(n_1 - 1)} \quad (1)$$

$$f' = \frac{-n_1}{n_o} f \quad (2)$$

である。ここでLED結晶の屈折率 n_o , レンズウインドウの曲率半径 r_o , 発光面とレンズ頂点間の距離 $-s$ とし, また, 先球ファイバの曲率半径 r , 開口数NA, コア径 d_1 , コア屈折率 n_1 , クラッド屈折率 n_2 とする

Fig. 2は, 効率 η の $r_o/-s$ 依存性についての計算結果である。先球ファイバは, ステップインデックス, $NA = 0.16$ ($n_1 = 1.4618$, $n_2 = 1.4530$), $d_1 = 85\mu\text{m}$, $r = 75\mu\text{m}$, $n_o = 3.5$ を仮定している。 $r_o/-s \rightarrow \infty$ のときの効率は, $\eta = 0.00093$ となりこれはフラットLEDの場合に相当し図の横軸は, これに対応する。同図で $r_o/-s = 0.7$ の右側は, 虚像系, 左側は, 実像系を示し, 実線は $d \leq d_c$, 点線は $d > d_c$ の場合を意味する。虚像系において, $r_o/-s$ が小さくなるにつれ f は短くなり η は増大する。図中の実線と点線との交点は, $d = d_c$ の場合であり結合状態が最適となる。さらに, $r_o/-s$ が小さいとこの条件からずれるため η は小さくなる。レンズLEDと先球ファイバの頂点間距離 δ が, $\delta \geq 0$ の範囲で本レンズ系が構成出来る。フラットLEDに対する改善率 χ は, $d_1 \ll |2f|$ の近似が成り立つと仮定すると

$$\chi = \frac{\eta}{\eta_{r_o \rightarrow \infty}} \approx \left(\frac{f_{r_o \rightarrow \infty}}{f} \right)^2$$

Fig. 2. Efficiency η vs. $r_o/-s$, taking the emitting diameter d as a parameter.

$$= \left\{ \frac{n_o r_o}{n_o r_o + s(n_o - 1)} \right\}^2 \equiv \beta^2 \quad (3)$$

となる。

2.3 基本設計

LEDからの光出力は, 順方向電流 I_f に通常比例するが, ジュール熱による温度上昇で動作電流は, おのずから制限される。本節では, まず, 光ファイバへの結合パワと定格電流および発光径等の関係について検討し, ついで数値計算を行ない, 実験結果との対比により結合原理を確かめる。

動作領域での温度上昇は, 素子の熱抵抗と消費電力から求められる。発光径 d のLEDにおいて熱抵抗 $R_\theta \propto d^{-2}$ と仮定すると, 温度上昇はほぼ電流密度 J に比例すると考えられる。 $J = \text{一定}$ とした場合の定格電流 I は, $I = Jd^2 \propto d^2$ の関係がある。また発光径は, 定格電流および光ファイバとの結合は勿論, 信頼性の設計¹⁹⁾ (発光領域内の結晶の不均一, 転位密度との関連等)にも深く関係し設計上最も重要なパラメータの一つとなっている。

2.1節で述べたレンズLED—光球ファイバの結合検討のため, レンズLEDの曲率 $r_o \rightarrow \infty$ の場合, すなわちフラットLED($\beta = 1$)にお

Table I. Factors dominating coupled powers.

	Flat LED($\beta=1$)			Lensed LED($\beta>1$)	
	η_c	R_c	$P_f=\eta_c P_c$	$P=\chi P_f$	P_l
$d_0 \leq d_c$	r^{-2} (const)	d^2	d^2	$(\beta d)^2$	d_c^2 (const)
$d_0 > d_c$	d^{-2}	d^2	const	β^2	d^{-2}
remark	$d_l/2f \ll 1$ $d_c=2f \tan \theta$	$J: \text{const}$ $I \propto d^2$	fiber: fixed	$\chi=\beta^2$	opt. cond. $\beta d=d_c$ $\chi_{opt}=(d_c/d)^2$

ける結合パワとの比較を行なった。Table Iは、LEDから光ファイバへの結合パワに対する支配的な因子をまとめたものである。前節迄に述べた通り、 $d_0 \leq d_c$ または $d_0 > d_c$ に対して結合パワの発光径依存性は異なる。フラットLEDの結合パワ P_f は素子構造および光ファイバの仕様を定める(J —一定および r , NA , d_l —一定)と、 $d_0 \leq d_c$ のとき $P_f \propto d^2$, $d_0 > d_c$ のとき $P_f = \text{一定}$ である。2.2節で述べたように、レンズLEDは、フラットLED($r_0 \rightarrow \infty$)の場合に比して結合パワは χ 倍改善され $P = \chi P_f$ となる。 $\beta > 1$ の場合、拡大虚像の直径 d_0 は、 $d_0 (= \beta d) = d_c$ のとき結合が最適となるので改善率の最適値は、 $\chi_{opt} = (d_c/d)^2$ となる。従ってレンズLEDにおける最適結合パワ P_l は、表に示すように、 $d_0 \leq d_c$ のとき $P_l = \text{一定}$, $d_0 > d_c$ のとき $P_l \propto d^{-2}$ の関係を示す。以上の結果から、 $\beta > 1$ の場合、レンズLEDの発光径 d と β を、 $\beta d = d_c$ となるように設計することにより結合パワを一定に維持したまゝ、電流密度一定の条件のもとで定格電流を小さくしていくことが可能となる。

次に、結合パワ、定格電流の発光径依存性に関する数値計算および実験結果について述べる。数値計算に際しては、以下の仮定をした。

フラットLEDに関しては、

- (1) 外部量子効率は、3.9% (内部量子効率は100%、内部光吸収は零、裏面反射は100%)で、温度特性は20℃で係数-0.6%/℃である。
- (2) $d=40\mu\text{m}$ で熱抵抗 $R_\theta=110^\circ\text{C/W}$ である。

(3) 定格電流密度 $J=10\text{kA/cm}^2$ で一定とする。

(4) 先球ファイバは、ステップインデックス、 $NA=0.14$, コア径 $85\mu\text{m}$, $r=75\mu\text{m}$ で $\eta_c=6\%$, $d_c=46\mu\text{m}$ である。

このとき、結合パワは、 $d=35\mu\text{m}$ で $I=100\text{mA}$ において $P_f=353\mu\text{W}$ になる⁴⁾。

レンズLEDに関しては、改善率 χ_{opt} は Fig. 2における光取出し効率 η の実線と点線との交点の値をフラットLEDの値で比をとることにより求めた。Fig. 3は、結合パワ P_l , P_f , 定格電流 I , 改善率 χ_{opt} の発光径 d 依存性を示す。実線は計算結果、プロットと破線は実験結果を示す。同図より明らかなように、結合パワの包絡線に沿って、すなわち $d \leq d_c (=46\mu\text{m})$ のときは、レンズLED, $d > d_c$ のときは、フラットLEDによって高出力特性を得ることができる。 d が小さくなるにつれて β は大きい値が要求されるので f は小さくなる。従って $d_l \ll |2f|$ の近似が十分でなくなるので、(3)式 $\chi=\beta^2$ は成り立たなくなる。

Fig. 3. Coupled powers P_l for the lensed LED, P_f for the flat LED, the current I and the improvement factor χ_{opt} vs. emitting diameter d under a constant current density J of 10 kA/cm^2 .

実験に関しては、同一ウエハから P 電極径を 3 種類、10, 20, 30 μm とかえたフラットとレンズ LED を製作し、 $J=10\text{kA}/\text{cm}^2$ に対応する電流値 $I=8, 33, 73\text{mA}$ における結合パワの比較を行なった。3.1 節で述べる構造では、発光径 d は P 電極径より数 μm 拡がるので多少定格電流を大きく設定出来る。レンズ曲率半径は、 $r_0=80, 120\text{ }\mu\text{m}$ の 2 種類について実験した。同図における χ_{opt} は、 P_i, P_f の破線より $\chi_{opt}=P_i/P_f$ として求めた。上記の LED の像倍率を 3.2 節で述べる方法で測定し、 $\beta=1.6\sim 2.2$ の範囲で、 $\chi_{opt}\approx\beta^2$ を確かめた。実験では、 $\beta\approx 3$ を得ているので、フラット LED に対して約一桁の効率改善が図れると考えられる。

3. LED 構造と製作

本節では、素子の構造、製作および LED パラメータの最適化について述べる。

3.1 構造と製作

Fig. 4 にモノリシックレンズ LED の構造を

Fig. 4. Structure of GaAlAs monolithic lensed LED.

示す^{20,21)}。まず、GaAs 基板にパターンニングされた SiO_2 膜をマスクとして化学エッチング ($18\text{H}_2\text{SO}_4: 1\text{H}_2\text{O}_2: 1\text{H}_2\text{O}$) により曲率半径 r_0 の球面レンズリセスを形成する。結晶の屈折率 n_0 は、かなり大きいので所望の像倍率を得るためにはレンズ曲率は比較的緩やかでよい。通常、 $\langle 110 \rangle$, $\langle \bar{1}\bar{1}0 \rangle$ 方向で、リセスに異方性を生じるが、レンズ効果に支障をきた

さない程度の等方的なレンズ形成法を開発、適用した。等方的なレンズリセスの形成された GaAs 基板上に液相エピタキシャル成長により GaAlAs の厚膜ウインドウ層 ($l=50\text{ }\mu\text{m}$) を有する 3 層ダブルヘテロ (DH) 構造を構成する。レンズリセスを埋め込む成長条件は、リセスの開口径 w , 深さ h , 曲率半径 r_0 に依存するが、 $w\approx 100\text{ }\mu\text{m}$, $h\approx 10\text{ }\mu\text{m}$, $r_0\approx 100\text{ }\mu\text{m}$ 程度の寸法関係であれば平坦に埋めることが出来、従って 3 層 DH 構造を連続成長させることが可能である^{22,23)} DH 構造の各エピタキシャル層のパラメータは、第 1 層目、n 型ウインドウ層、厚さ 50 μm , Te ドープ, $X>0.2$, 第 2 層目、p 型活性層、厚さ 1 μm , Ge ドープ, $X=0.1$, 第 3 層目、p 型キャリア閉じ込め層、厚さ 2 μm , Ge ドープ, $X=0.3$ である。図に示された Al 成分 X 値の差 ΔX , 活性層の厚さ W , ウインドウ層の電子濃度 n , 活性層の正孔濃度 p は、Table II に示された範囲にわたり検討を行った。P 電極 Au メッキヒートシンクを形成した後、GaAs と $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$ の材料に対する選択性を利用した選択エッチング ($1\text{NH}_4\text{OH}: 30\text{H}_2\text{O}_2$) 技術により GaAs 基板を完全に取除きレンズウインドウを鏡面に仕上げる。Fig. 5 は、レンズウインドウの走査電子顕微鏡写真 (SEM) である。

Fig. 5. SEM of lensed window with a nearly isotropic spherical surface.

3.2 LED パラメータの最適化

光ファイバの結合パワが最大になるように、

複合レンズ系および活性領域のデバイスパラメータの検討を行なう。

レンズウインドウの最適寸法は、発光部の拡大虚像が光ファイバの臨界径と一致($d_c = d_o (= \beta d)$) するように βd をきめる。像倍率 β は L/r_o (L : レンズウインドウの頂点と発光部間距離) で制御出来る。Fig. 6 は、 $1/\beta$ の L/r_o 依存性

Fig. 6. Magnification of lensed window: $1/\beta$ vs. L/r_o .

を示す。実線は、図中の球面レンズにおける像倍率の式から求めた結晶屈折率 $n_o = 3.3$ の場合における計算結果である。○印は測定値である。像倍率の測定に際しては、レンズ開口径より大きいストライプパターン (幅 $5\mu\text{m}$) をレンズ面と相対する反対側の平面上に形成し、ストライプの虚像の大きさをフラット部とレンズ部で各々測定した。Fig. 7 は、 $\beta = 2$ の場合の一例を示す。(a) はフラット部、(b) はレンズ部のストライプ虚像に焦点を合わせて赤外線 TV カメラ付顕微鏡で観察したものである。Fig. 6 より明らかなように、 $\beta < 3$ の範囲では、安定に制御できる。素子製作に際しては、 $\beta = 2$, $L/r_o = 0.75$ とし、このときレンズウインドウは、 $r_o = 80\mu\text{m}$, $L = 60\mu\text{m}$ ($l = 50\mu\text{m}$) の寸法を目標とした。

活性領域のパラメータとして、Fig. 4 に示した ΔX , W , $n(\text{Te})$, $p(\text{Ge})$ に関して Table II に示した範囲にわたり実験検討を行ない最適化した。Fig. 8 は、フラット LED に関して得られた

(a) Focused in flat

(b) Focused in lens $20\mu\text{m}$

Fig. 7. Virtual images of the stripe pattern for magnification measurement: (a) focused in the flat part outside the lens, and (b) focused in the lens part.

Item	Experimented	Optimized
ΔX	0 ~ 0.17	0.1
$W \mu\text{m}$	0.2 ~ 1.5	1
$n(\text{Te}) \text{ cm}^{-3}$	$3 \times 10^{17} \sim 2 \times 10^{18}$	5×10^{17}
$P(\text{Ge}) \text{ cm}^{-3}$	$10^{16} \sim 10^{19}$	5×10^{18}

Table II. Parameters of active region for performance optimization.

LED チップ光出力 P_c と遮断周波数 (光出力 - 1.5 dB 低下の周波数) f_c の関係を示す。光出力と遮断周波数は、通常、相反関係にあるが、主に活性層のキャリア濃度 p で制御出来、 $p < p_{opt}$ では、 p を増加させると f_c は高くなるが光出力はかわらない。 $p > p_{opt}$ では、光出力が低下

Fig. 8. Output power vs. cutoff frequency for the flat LED.

する⁵⁾。レンズLEDの場合にも、レンズウィンドウの形成は、活性領域のパラメータに直接には影響しないためほぼ同一の結果となる。最適パラメータをまとめると以下の様になる。

- (1) 先球ファイバ：ステップインデックス， $NA = 0.16$ ，コア径 $85\mu\text{m}$ ， $r = 75\mu\text{m}$ 。
- (2) レンズウィンドウ：GaAlAs， $n_0 = 3.3$ ， $\beta = 2$ に関して， $r_0 = 80\mu\text{m}$ ， $L = 60\mu\text{m}$ ($l = 50\mu\text{m}$)。
- (3) 活性層と閉じ込め層：GaAlAs， $X = 0.1$ ，EL 中心波長 $\lambda_p = 800\text{nm}$ ， $\Delta X = 0.1$ ， $W = 1\mu\text{m}$ ， $n = 5 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ ， $p = 5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 。
- (4) 発光領域： $d = 17\mu\text{m}$ ， $I = 25\text{mA}$ ($J = 10\text{kA}/\text{cm}^2$)。

以上のパラメータを目標に素子製作を行ない，得られた特性について次節に述べる。

4. 特性

Fig. 9は光ファイバへの結合パワの順方向電流依存性を示す。図中のレンズLED($\beta = 2$)とフラットLEDは，各々同一ウエハから製作したものである。クラッドモードは，樹脂を用いて殆んど除去している。 $d = 35\mu\text{m}$ のフラットLEDは，従来開発してきたLEDに相当し⁵⁾，定格 $I = 100\text{mA}$ において $P_f = 300\mu\text{W}$ が平均的に得られており遮断周波数 $f_c = 30\text{MHz}$ ，発光中心波長 $\lambda_p = 830\text{nm}$ ，スペクトル半値中 $\Delta\lambda_{1/2} = 40\text{nm}$

Fig. 9. Coupled powers for the lensed and the flat LEDs as a function of the forward current.

の性能を有する。図から明らかなように， $d = 10\mu\text{m}$ のレンズLEDの場合， $I = 30\text{mA}$ において $P_l = 280\mu\text{W}$ が得られ，これは， $d = 10$ および $35\mu\text{m}$ のフラットLEDに比し約4倍の効率改善に相当する。遠視野像を測定した結果，レンズLEDとともにランバート型角度分布から大きくずれていない。光ファイバとの結合実験の結果によれば，虚像の最適位置は，レンズ，フラットLED両者ともに，光ファイバ先端からの光学距離は $95\mu\text{m}$ でありほぼ同じ位置にある。レンズLEDのレンズ効果により発光部位置は，フラットLEDの場合より $14\mu\text{m}$ 光ファイバ側に近い位置が最適となる。発光部から光ファイバへの最大入射角は $\varphi' = 10^\circ$ であり，これはフラットLEDの $\varphi = 5^\circ$ に対して2倍になっていることが確かめられた。Fig. 10は， $\beta = 2$ ，

Fig. 10. Powers coupled into 2 kinds of fiber as a function of the forward current.

$d=20\mu\text{m}$ のレンズ LED に関して、2 種類のステップインデックスファイバについての結合パワを示す。 $I=100\text{ mA}$ において、 $NA=0.16$, コア径 $85\mu\text{m}$ に対して 0.7mW , また $NA=0.28$ コア径 $100\mu\text{m}$ に対して 1.2mW という従来にない高出力特性を得ることが出来た。

5. あとがき

光通信用発光ダイオードの高効率化をめざし新構造の GaAlAs モノリシックレンズ LED を開発し、従来にない高効率特性が得られた。LED の光取出し面にモノリシックに形成された球面レンズと光ファイバの先端を球面にした先球ファイバのレンズ効果との組み合わせにより高結合効率化を図った。すでに報告されているスフェリカルエミッタと異なり、光ファイバへの結合パワが最大になるように両レンズによる複合レンズ系の設計を行なうとともに、LED 性能をきめる活性領域のパラメータを最適化した。結合原理を確かめるため、フラット LED とレンズ LED との効率の比較検討を行ない、像倍率 $\beta=1.6\sim 2.2$ の範囲で、幾何光学で得られた改善率 $\chi=\beta^2$ を確認した。駆動電流 30mA において、 $\beta=2$ のレンズ LED でほぼ 4 倍改善の光パワ $280\mu\text{W}$ を得た。

また、基本技術として、等方的なレンズ形成技術、レンズリセスを埋め込む厚膜エピタキシャル成長技術、レンズ鏡面形成における選択エッチング技術等を開発、素子製作に適用した結果、ステップインデックスファイバの $NA=0.16$, コア径 $85\mu\text{m}$ および $NA=0.28$, コア径 $100\mu\text{m}$ に対して、各々 0.7 および 1.2mW の高出力特性を駆動電流 100 mA という低消費入力のもとで得ることが出来た。以上のような高効率特性を示す LED は、光通信用その他の光源として、非常に適していると考えられる。

謝 辞

日頃御指導いただく電電公社武蔵野電気通信研究所藤本正友室長、古川吉孝室長ならびに富士通株式会社個別半導体技術部鮎了介部長代理

に感謝します。また、富士通研究所三杉隆彦所次長、トランスミッション研高梨裕文部長、半導体研福川幸夫部長、小谷健部長代理、半導体材料研柳山脩部長に感謝します。さらに有益な議論をしていただいた個別半導体技術部長谷川治氏、当研究室和田修氏、素子製作に関して石山武男氏、金勝好氏に深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) C. A. Burrus and B. I. Miller: Opt. Commun. **4** (1971) 307 .
- 2) R. C. Goodfellow and A. W. Mabbitt: Electron. Lett. **12** (1976) 50.
- 3) F. D. King, A. J. SpringThorpe, and O. I. Szentesi: Int. Electron Devices Meeting Dig. Tech. Papers (Washington, DC, 1975) 480 .
- 4) M. Abe, I. Umebu, O. Hasegawa, S. Yamakoshi, T. Yamaoka, T. Kotani, H. Okada, and H. Takanashi: IEEE Trans. Electron Devices **ED-24** (1977) 990 .
- 5) M. Abe, O. Hasegawa, Y. Komatsu, Y. Tōyama, and T. Yamaoka: IEEE Trans. Electron Devices **ED-25** (1978) 1344.
- 6) E. G. Dierschke, L. E. Stone, and R. W. Haisty: Appl. Phys. Lett. **19** (1971) 98.
- 7) K. Kurata, Y. Ono, M. Morioka, K. Ito, and M. Mori: IEEE J. Quantum Electron. **QE-13** (1977) 525.
- 8) Zh. I. Alferov, V. M. Andreev, B. V. Egorov, and A. V. Syrbu: Sov. Phys. Semicond. **11** (1977) 1123.
- 9) F. D. King and A. J. SpringThorpe: J. Electron. Mater. **4** (1975) 243.
- 10) S. Horiuchi, K. Ikeda, T. Tanaka, and W. Susaki: IEEE Trans. Electron Devices **ED-24** (1977) 986.
- 11) T. P. Lee, C. A. Burrus, Jr., and B. I. Miller: IEEE J. Quantum Electron. **QE-9** (1973) 820.
- 12) H. Kressel and M. Ettenberg: Proc. IEEE (Lett.) **63** (1975) 1360.
- 13) J. P. Wittke, M. Ettenberg, and H. Kressel: RCA Rev. **37** (1976) 159.
- 14) Y. Horikoshi, Y. Takanashi, and G. Iwane: Japan. J. Appl. Phys. **15** (1976) 485.
- 15) Y. Uematsu, T. Ozeki, and Y. Unno: IEEE J. Quantum Electron. **QE-15** (1979) 86.
- 16) S. Yamakoshi, O. Hasegawa, Y. Tōyama, and T. Yamaoka: 1978 Third IEEE Specialist Conf. on the Technology of Electroluminescent Diodes (San Francisco, 1978) B-4 .
- 17) O. Hasegawa, M. Abe, and T. Yamaoka: J. Appl. Phys. **49** (1978) 4353.
- 18) O. Hasegawa, R. Namazu, M. Abe, and Y. Tōyama: J. Appl. Phys. (to be published).

- 19) S. Yamakoshi, O. Hasegawa, H. Hamaguchi, M. Abe, and T. Yamaoka: Appl. Phys. Lett. **9** (1977) 627.
- 20) 安部, 浜口, 長谷川, 小松, 遠山: 電子通信学会技術研究報告 **OQE 79-44** (1979).
- 21) M. Abe, O. Hasegawa, Y. Komatsu, and Y. Tōyama: The 11th Conf. (1979 International) on Solid State Devices Dig. Tech. Papers (Tokyo 1979) B-2-4, 91.
- 22) 五十棲, 金田, 小松, 山岡: 第26回応用物理学会, 昭和54年春予稿 (1979) 29p-W-16, 197.
- 23) S. Isozumi, Y. Komatsu, M. Abe, T. Yamaoka, and T. Kotani: 1978 Third IEEE Specialist Conf. on the Technology of Electroluminescent Diodes (1978) C-1.