

# 埋込みヘテロ形InGaAsP/InP長波長半導体レーザ

## InGaAsP/InP Buried Heterostructure Semiconductor Lasers

光ファイバの伝送損失が最も小さくなる波長帯(1.3~1.5 $\mu\text{m}$ )での光通信用の光源として、埋込みヘテロ構造で横モードを安定化したInGaAsP/InP半導体レーザを開発した。

InGaAsP活性領域の組成は、発振波長が1.3 $\mu\text{m}$ となり、更に格子定数がInP基板結晶と一致するように調節した。活性領域幅を1~2 $\mu\text{m}$ と狭くすることにより、低しきい電流動作(室温連続動作時で約50mA)と同時に、しきい電流値の2倍以上にわたって、光出力-電流特性に折れ曲がりのない安定な横基本モード動作を達成できた。変調特性は2GHzまで平坦であり、また、二次ひずみ(変調度30%, 光出力5mW, 周波数100MHzのとき)は50dB以下であった。

土居功年\* Doi Atsutoshi

中村道治\*\* Nakamura Michiharu

### 1 緒言

シリカ系光ファイバが、長波長領域(波長1.3~1.5 $\mu\text{m}$ )で最小の光伝送損失を示す<sup>1)</sup>ことから、この波長帯は将来の光ファイバ通信の主流になるものと予想され、名所で光通信用光源として半導体レーザの研究開発が進められている<sup>2), 3)</sup>。現在最も開発の進んだGaAs/GaAlAs半導体レーザは波長0.8 $\mu\text{m}$ 付近で発振するが、この波長帯での光ファイバの損失は約3dB/kmである。これと比較して0.8 $\mu\text{m}$ 帯よりも長波長帯の1.3 $\mu\text{m}$ 帯及び1.5 $\mu\text{m}$ 帯での光ファイバの損失は、それぞれ0.5dB/km、及び0.2dB/kmと小さく、更に、材料分散は1.3 $\mu\text{m}$ 帯で0になるため、上記長波長帯の半導体レーザは、長距離光通信用光源に最適である。InGaAsP四元半導体を用いたレーザは上記長波長帯全域をカバーできるため、この研究ではInGaAsP/InPダブルヘテロ形半導体レーザを製作した。また、InGaAsP結晶組成は、発振波長が、損失・分散共に小さい1.3 $\mu\text{m}$ となるように調節した。

一方、半導体レーザを光通信用光源に用いる場合、半導体レーザの横モード安定化が必須の条件となる。すなわち、横

モードが安定化されていない半導体レーザでは、異常雑音の増大や、光ビーム出射方向の変動などの、光通信用光源として不適当な異常特性を示す。日立製作所ではこれらの異常特性をなくすため、GaAs/GaAlAs半導体レーザで、作り付けの光導波路をもつ埋込みヘテロ構造<sup>4)</sup>を開発した。この研究では埋込みヘテロ構造を、InGaAsP/InP長波長半導体レーザに適用し、横モードの安定化を行なった。新しく開発したInGaAsP/InP埋込みヘテロ形半導体レーザは、安定な横基本モード動作が可能であると同時に、しきい電流値は22mAと低く、これまでの報告<sup>5), 6)</sup>のうち最低値を記録した。

### 2 素子構造

新しく開発した埋込みヘテロ形長波長半導体レーザの構造を図1に示す。InGaAsP活性領域は、これより屈折率の小さいInP結晶で周囲を囲まれており、しっかりとした導波路を形成している。そのため、活性領域の幅及び厚さを最適化することにより、容易に横基本モード動作を得ることができる。

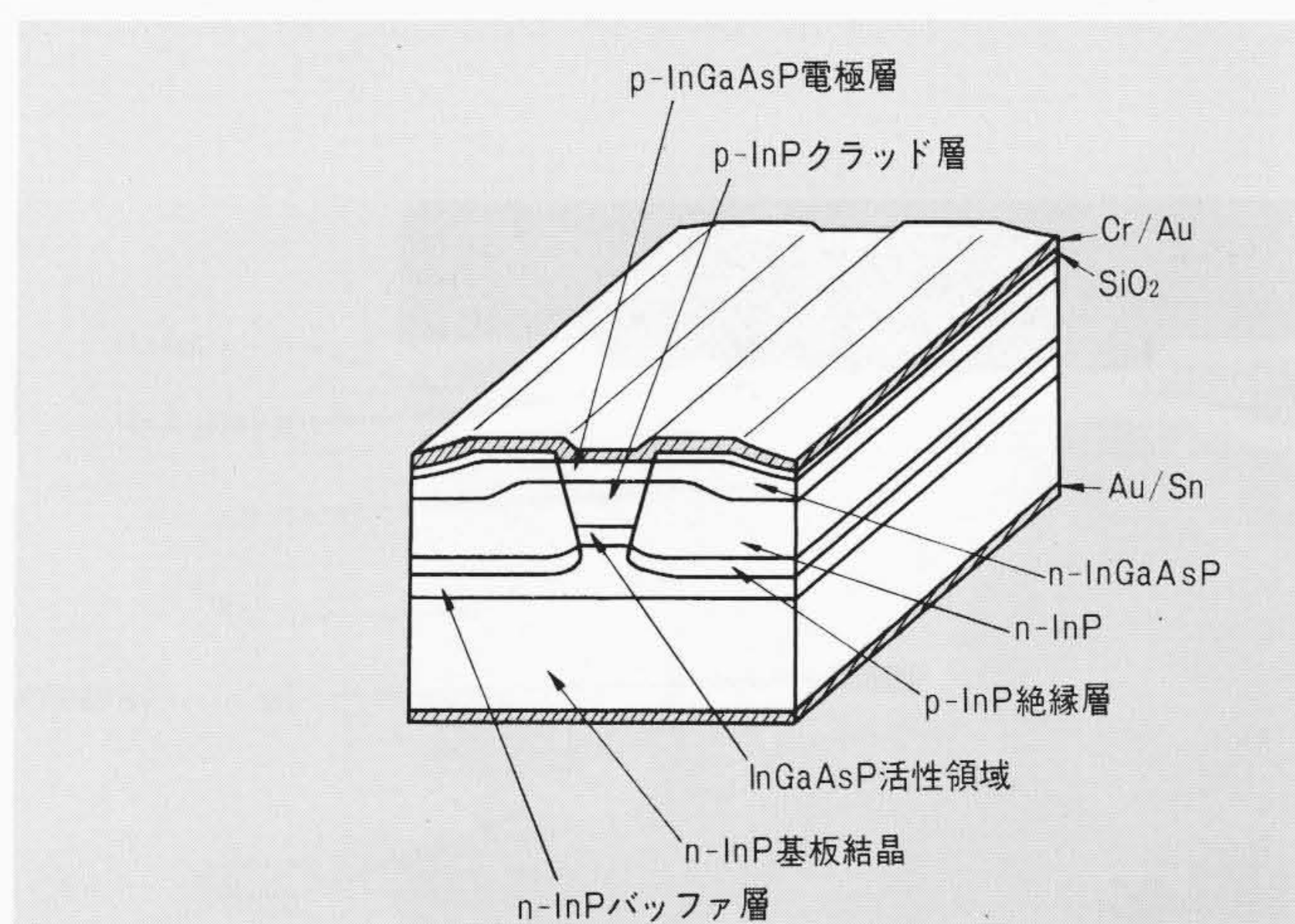


図1 埋込みヘテロ形InGaAsP/InP長波長半導体レーザの構造  
活性領域は、作り付けの導波路を形成し、絶縁層は漏れ電流を防ぐ。

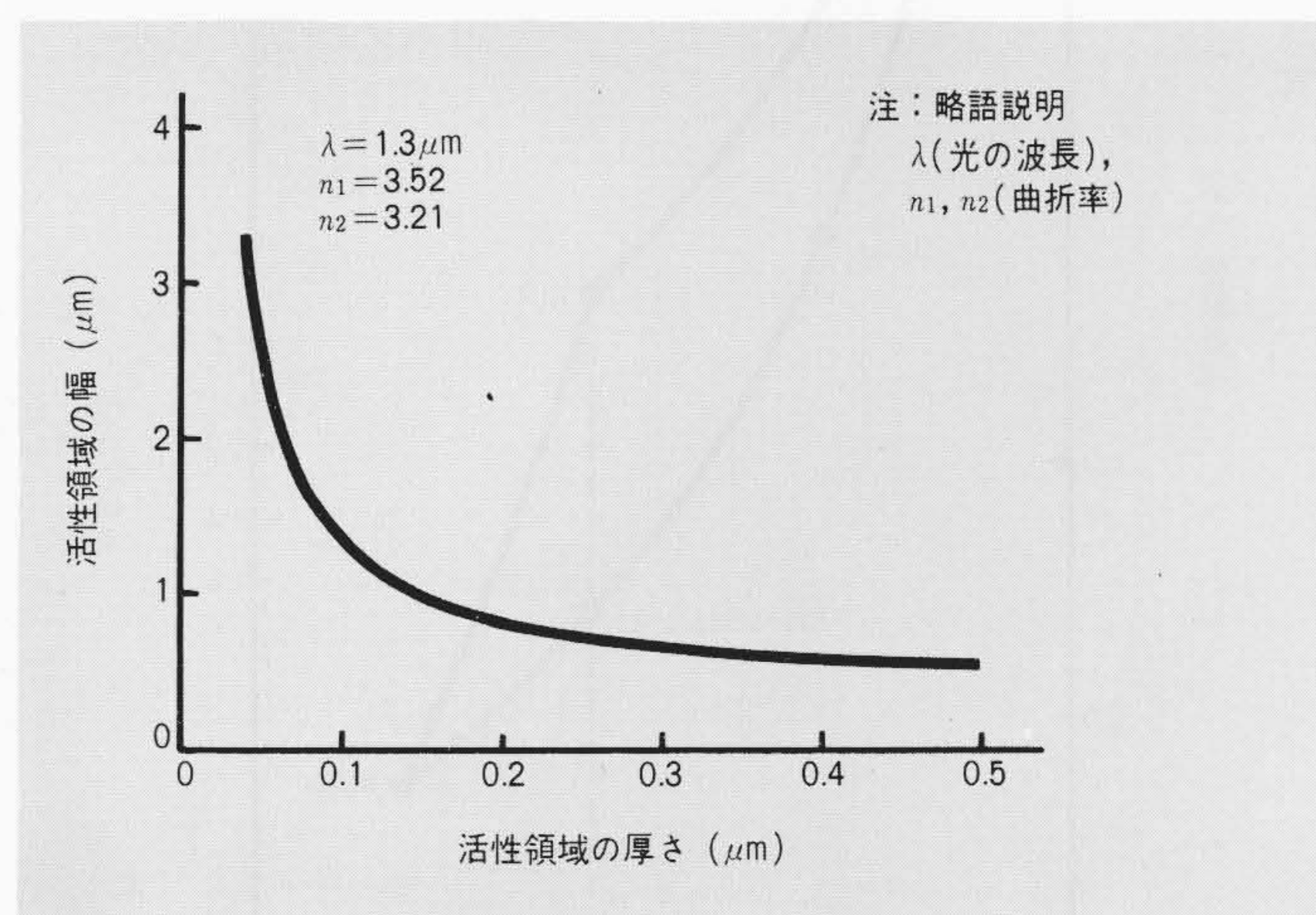


図2 埋込みヘテロ形InGaAsP/InP長波長半導体レーザの横基本モード伝搬条件  
曲線から下側が横基本モードだけが伝搬する領域を示す。

\* 日立製作所中央研究所 工学博士 \*\* 日立製作所中央研究所 理学博士

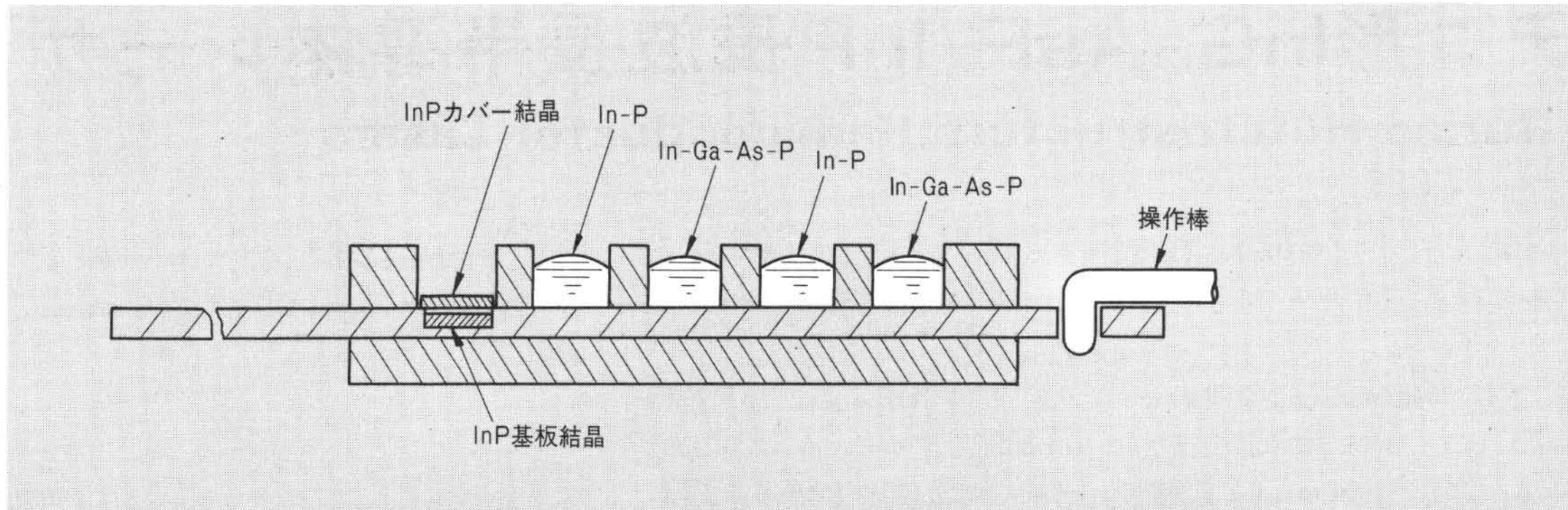


図3 液相成長用ボートの断面構造 InP基板結晶の熱分解を防ぐため、InPカバー結晶で保護されている。

図2は、実効屈折率近似を用いて計算した高次モードのカットオフ条件を示す。計算に用いたInGaAsP活性層の屈折率( $n_1$ )は、波長 $1.3\mu\text{m}$ での4種類の二元結晶(InAs, GaAs, InP, GaP)の屈折率から推定して求めた。この実験では、図2を参考にして、活性領域の幅及び厚さを $1\sim 2\mu\text{m}$ 及び $0.2\sim 0.3\mu\text{m}$ の範囲で変化させ、寸法の最適化を図った。

### 3 素子製法

以下に図1に示した半導体レーザの製作手順を示す。まずn-InP基板結晶〔 $n=1\sim 2\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ , 方位(100)〕の上に、ダブルヘテロ成長層を液相成長法により形成した。図3は液相成長に用いたボートの断面構造を示す。ボートを水素ガス中で $630^\circ\text{C}$ に加熱し、各溶液を溶質で飽和させた後、 $0.5^\circ\text{C}/\text{min}$ の冷却速度で冷却しながら、基板結晶を第一のIn-P溶液と接触させてn-InPバッファ層(Teドーパ)を成長させた。各

溶液を飽和させるとき、InP基板結晶からリンが蒸発し、結晶表面が損傷を受けやすいため、InP結晶で基板結晶を保護した。次に操作棒を移動させて各溶液と基板結晶を順に接触させ、InGaAsP活性層、p-InPクラッド層(Znドーパ)及びp-InGaAsP電極層を成長させた。

図4は、InGaAsP四元層の禁制帯幅(レーザ発振波長に対応する)と格子定数の関係を示す。この図で、曲線で囲まれた領域がInGaAsP四元層を示す。この実験では成長温度を一定とし、図3の四元溶液の組成を調節することにより、InGaAsP層の格子定数をInP基板結晶の格子定数と一致させ、更に、InGaAsP活性層の組成は、レーザ発振波長が $1.3\mu\text{m}$ となるように調節した。このときの活性層組成は $\text{In}_{0.73}\text{Ga}_{0.27}\text{As}_{0.63}\text{P}_{0.37}$ である。また、格子不整合による結晶欠陥の導入を少なくするために、活性層と基板結晶の格子不整合はできるだけ小さくする必要があるが、この実験で得られた結晶の格子不整合は、X線回折で測定した結果 $\pm 0.03\%$ 以下であった。

第一の液相成長後、 $\text{SiO}_2$ 膜をCVD(Chemical Vapor Deposition)法で形成し、次に $\text{SiO}_2$ 膜をマスクとしてBr-メタノール液で化学エッチングし、メサ構造を形成する。Br-メタノール液では、(111)InP面はほとんどエッチングされないため、(110)方向に設けた比較的広い $\text{SiO}_2$ マスクから、狭い活性領域を形成することができる。次に、2度目の液相成長により、p及びn-InP層並びに表面保護用四元層を成長した。

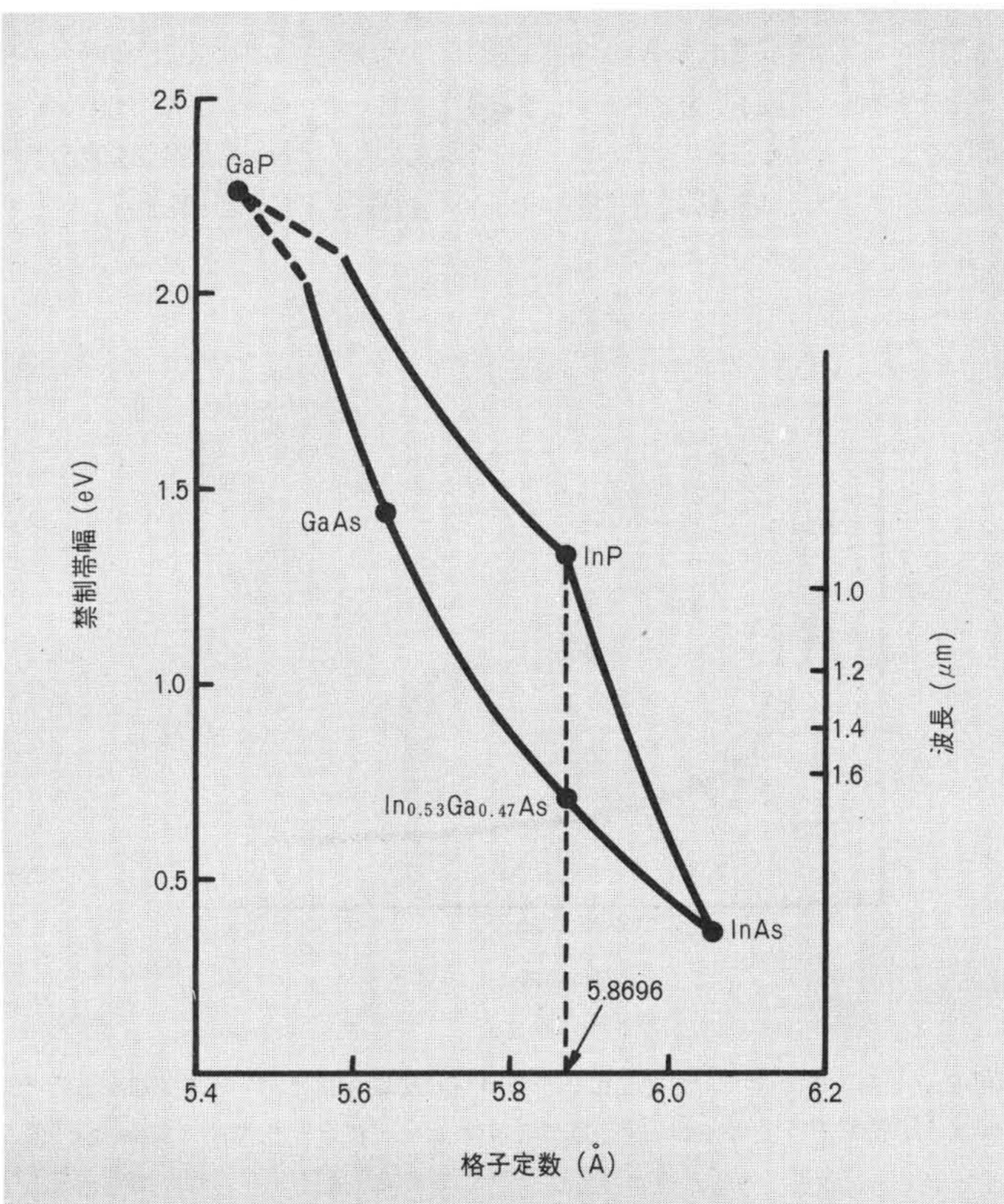


図4 InGaAsP四元系の禁制帯幅と格子定数の関係 InGaAsP層の格子定数は、InPの格子定数と一致させ、更にInGaAsP活性層の禁制帯幅は、レーザ発振波長が $1.3\mu\text{m}$ となるように選ばれる。

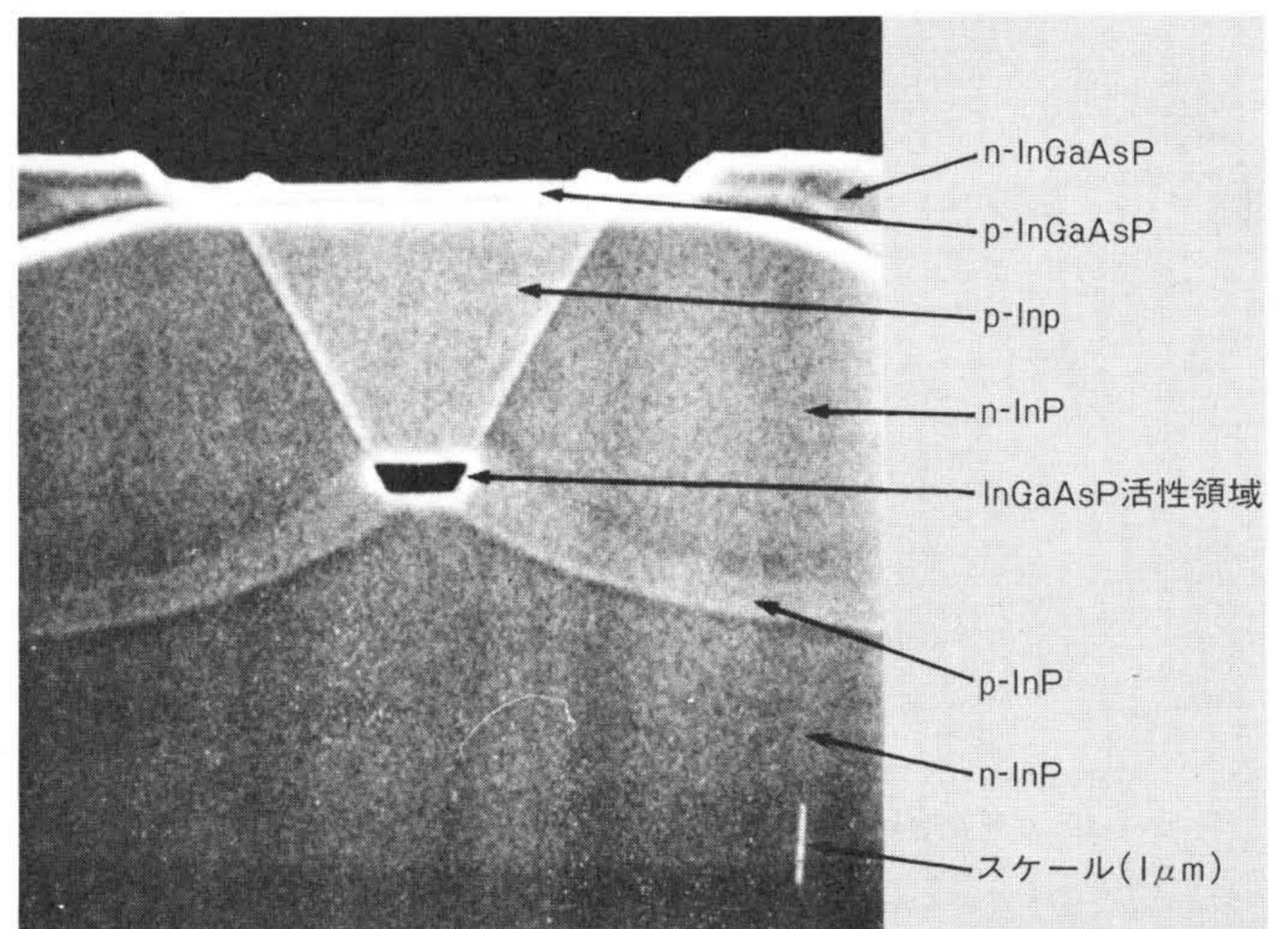


図5 埋込みヘテロ形InGaAsP/InP液相成長結晶の断面SEM写真メサエッチング及び二度の液相成長で形成された展形的な埋込みヘテロ構造である。

この埋込み層に設けたpn接合は逆バイアスされ、漏れ電流を低減する絶縁層として働く。

上記液相成長により得られた結晶の断面SEM(Scanning Electron Microscope: 走査電子顕微鏡)写真を、図5に示す。同図からメサ側面に異常成長はなく、ほぼ均一な埋込みができていることが分かる。

結晶成長後、電極の接触抵抗を下げるために、p側にZnを選択的に拡散した。オーミック電極はp側にAu/Cr、n側にAu/Snを蒸着して形成した。最後にへき開により300 $\mu$ m長のキャビティを形成し、n側をヒートシンクにボンディングした。

#### 4 特 性

新しく開発した埋込みヘテロ形長波長レーザの代表的な光出力-電流特性を図6に示す。この図に示したレーザの活性領域幅及び厚さは、それぞれ1 $\mu$ m及び0.3 $\mu$ mである。連続動作時のしきい電流値は22mAと低く、微分量子効率は39%と高い。なお、パルス動作(パルス幅300ns、繰返し周波数1kHz)時のしきい電流値は20mA、微分量子効率は60%であった。光出力-電流特性は、連続動作時で10mW程度まで直線的で、横モード不安定に起因する折れ曲がりは見られない。10mW以上の光出力レベルでは、温度上昇により、光出力-電流特性は曲がる傾向を示し、30mWで飽和した。

同じレーザをパルス動作させた場合の最大光出力は90mWであり、このレベルで光出力は急激に減少した。この現象は

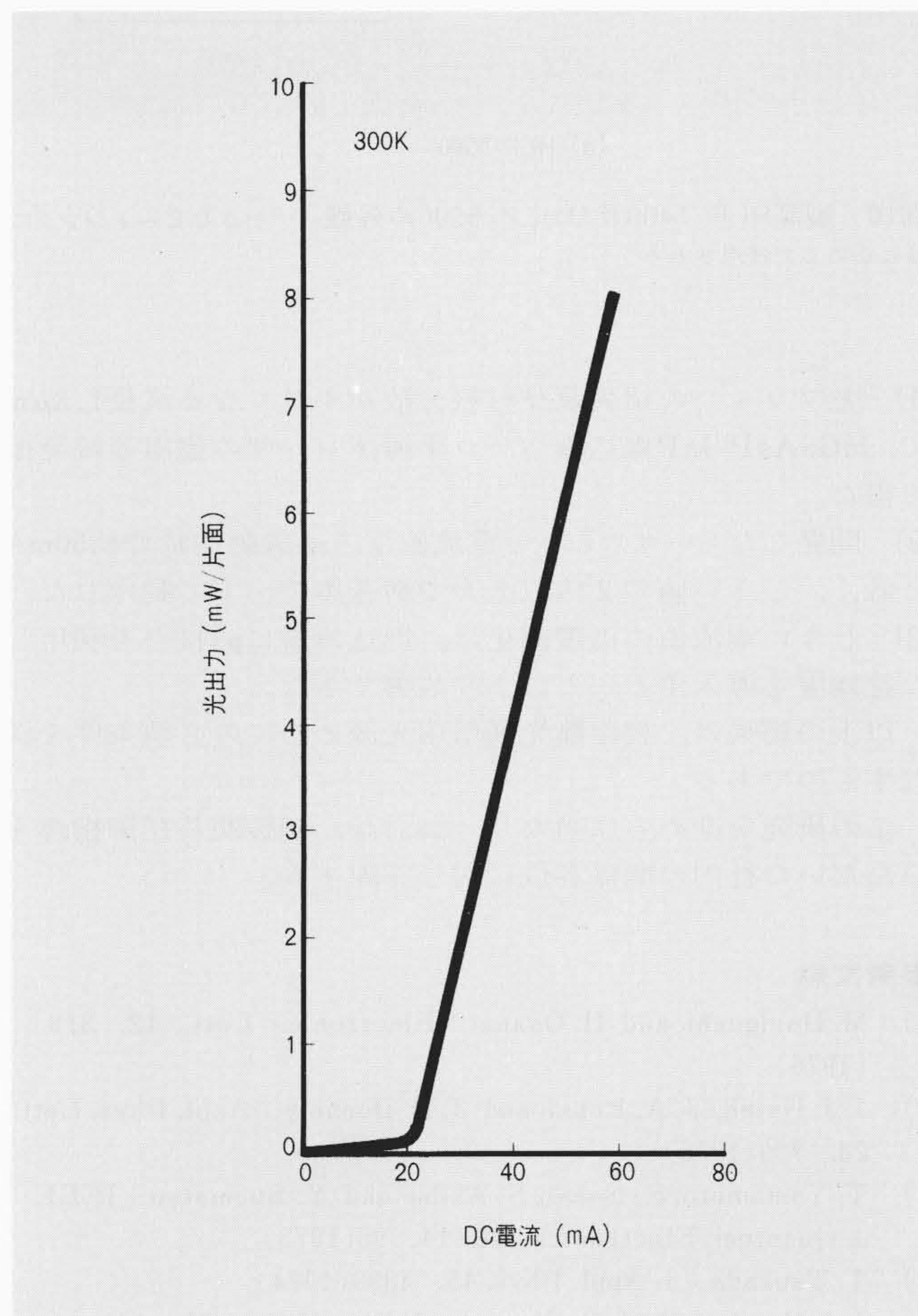


図6 埋込みヘテロ形InGaAsP/InP半導体レーザの室温における光出力-電流特性 活性領域の幅及び厚さは、それぞれ1 $\mu$ m、0.3 $\mu$ mである。光出力-電流特性に折れ曲がりは見られない。

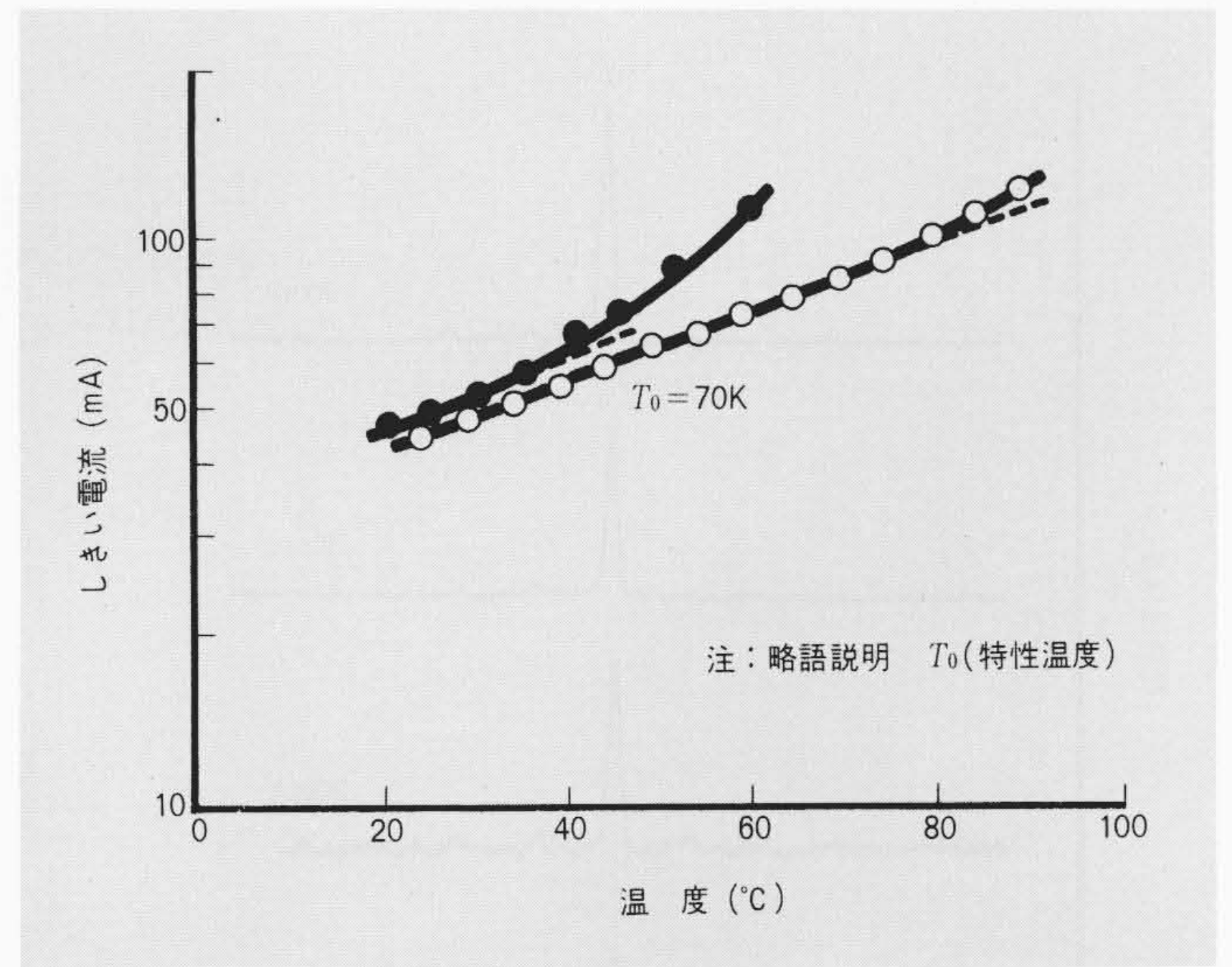


図7 埋込みヘテロ形InGaAsP/InP半導体レーザのしきい電流値の温度変化 白丸は絶縁層を設けた場合を、黒丸は絶縁層のない場合を示す。

いわゆる端面破壊によるものではなく、同じレーザで繰り返し観測できる。したがって、この現象は埋込み層で形成されているpnpnダイオードのスイッチオンによる漏れ電流の急激な増大によるものと考えられる。上記の理由により、InGaAsP埋込みヘテロ半導体レーザの端面破壊限界を測定することはできなかったが、活性領域幅1 $\mu$ mのレーザの光出力90mW(パルス動作)は、同じ形状のGaAs/AlGaAs埋込みヘテロ半導体レーザの端面破壊限界よりも3~4倍程度大きい値である。

しきい電流値は活性領域幅に比例して増大する。開発した埋込みヘテロ形半導体レーザのしきい電流密度は、活性領域の面積から求めると、5~8 kA/cm<sup>2</sup>となる。また、活性領域幅2 $\mu$ mのレーザの平均的なしきい電流値は50mA程度であった。

パルス動作時のしきい電流値の温度変化を図7に示す。この図で白丸は絶縁層付き、黒丸は絶縁層なしのレーザを示す。しきい電流値( $I_{th}$ )は $I_{th} \propto \exp(T/70K)$ で表わせる。絶縁層のないレーザでは、特に高温領域でしきい電流値の増加が著しい。この原因として、埋込み層を流れる漏れ電流が挙げられる。絶縁層がない場合の漏れ電流は、活性領域及び埋込み層のビルトインポテンシャル差で抑えられている。しかし、高温領域ではしきい電流値が増大するとともにレーザに印加する電圧が増大するため、ビルトインポテンシャル差で漏れ電流を抑えることが困難になる。絶縁層を設けたレーザでは高温でも漏れ電流は小さく、80°Cまで連続動作が可能であった。

代表的なInGaAsP/InP埋込みヘテロ半導体レーザの室温連続発振スペクトルを図8に示す。このレーザのしきい電流値は75mAであり、測定は直流バイアス電流を77~90mAまで変えて行なった。この図から発振波長は約1,308 $\mu$ mであり、しきい電流値をわずかに上回るバイアス電流から縦単一モードで発振していることが分かる。

開発したレーザの変調特性を図9に示す。変調周波数が2GHzまで劣化はなく、更に、共振ピークも観測されなかった。また、開発したレーザの二次ひずみは、100MHz、30%変調時に-50dB以下であった。

図10に、上記長波長半導体レーザを組み込んだ製品の外観を示す。製品HLP-5400〔同図(a)〕では、半導体レーザに光

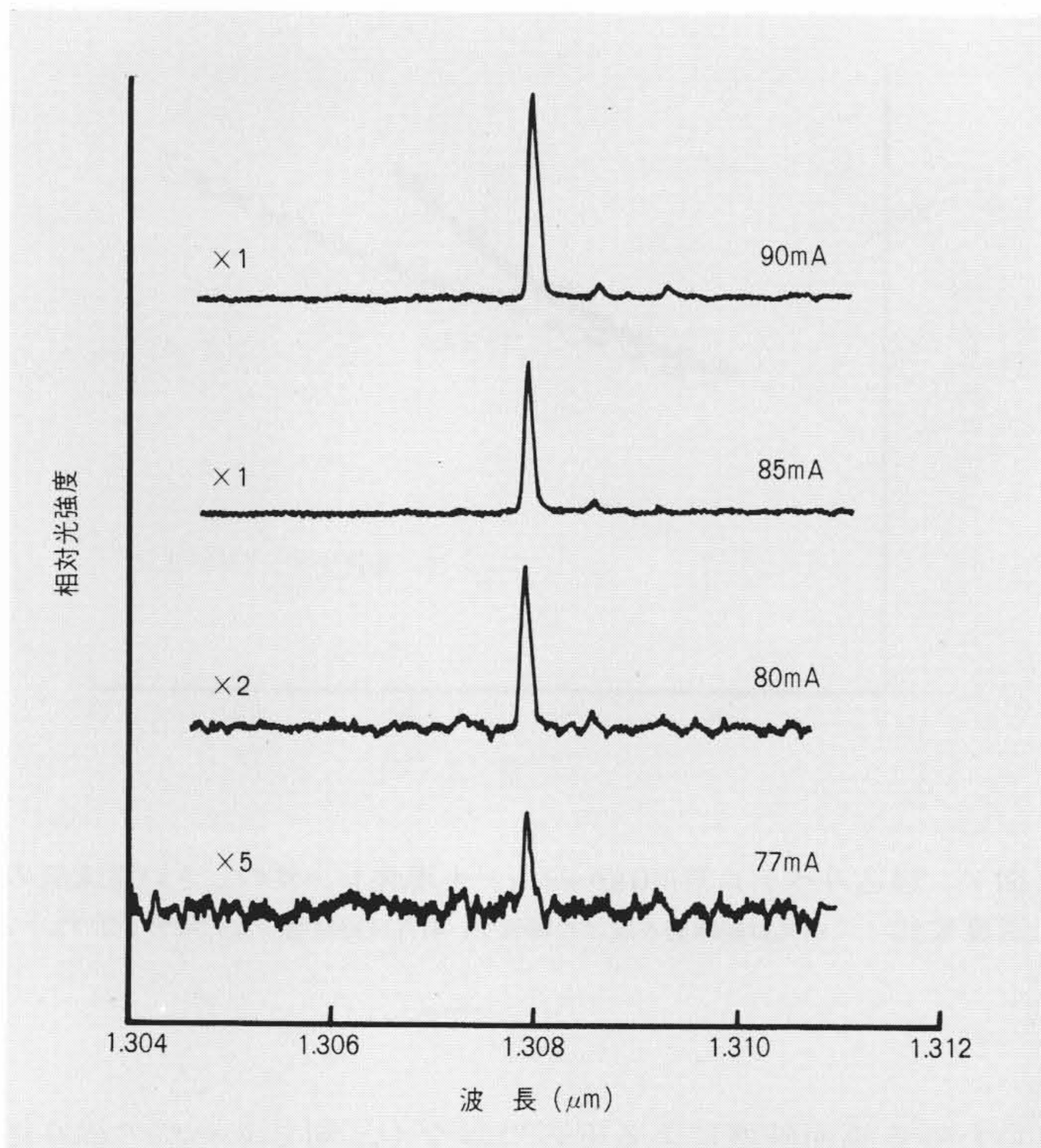


図8 埋込みヘテロ形InGaAsP/InP半導体レーザの室温連続発振スペクトル 縦単一モードで発振している。

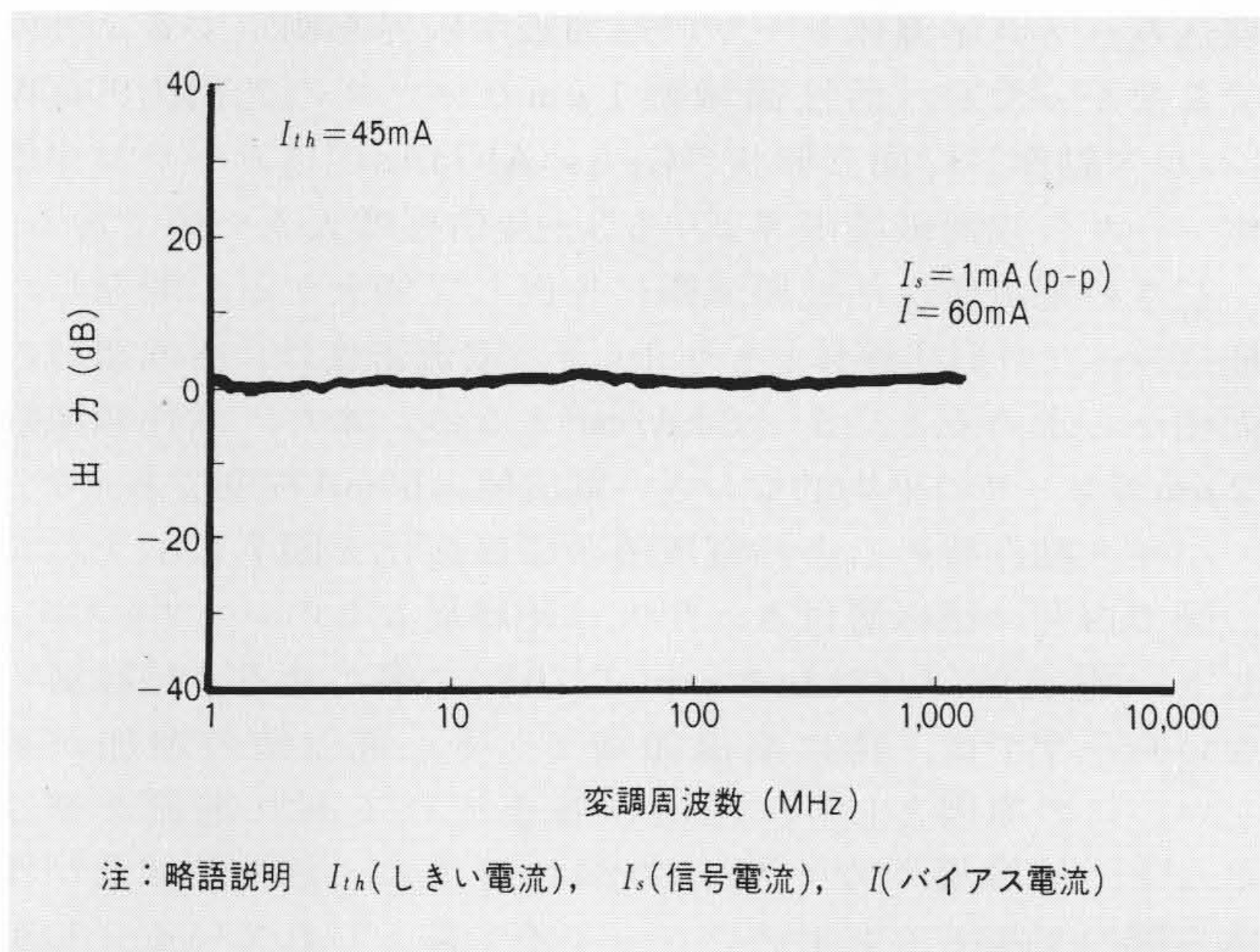
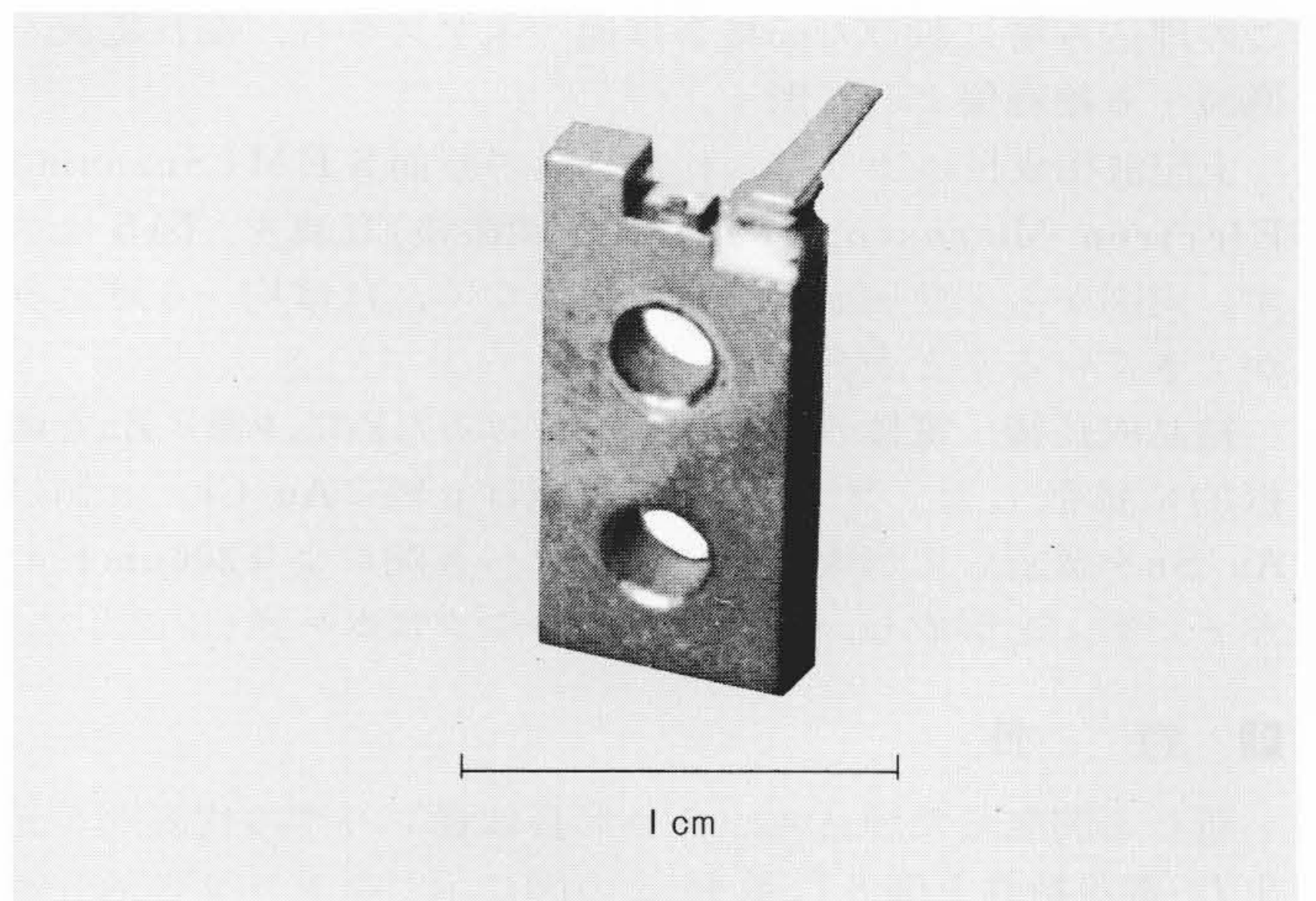


図9 埋込みヘテロ形InGaAsP/InP半導体レーザの変調特性 20 GHzまで共振ピークはなく、平坦である。

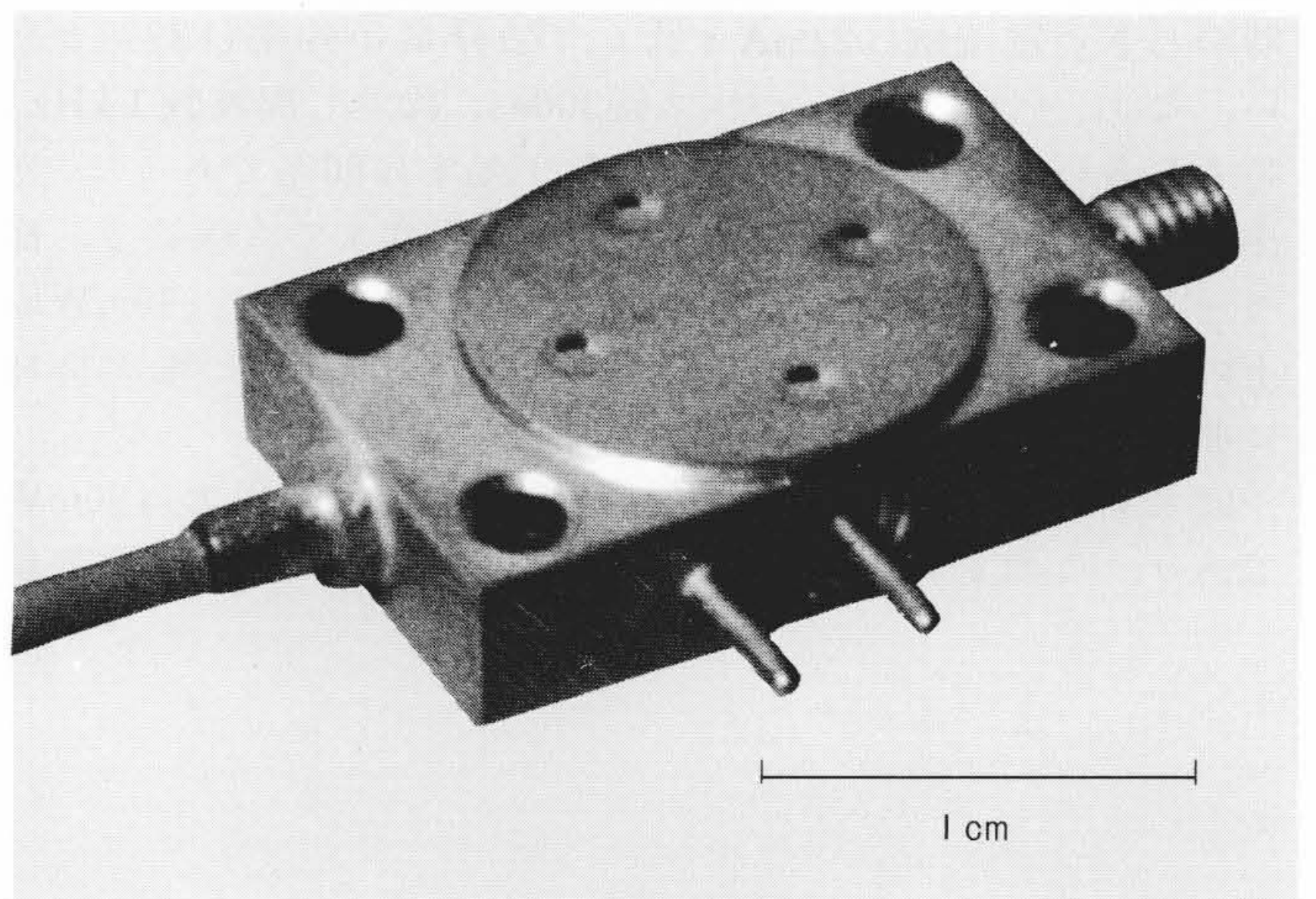
学系を直接対向できるようになっており、製品HLP-5500〔同図(b)〕では、光導体レーザに光ファイバを対向させ、気密シールされている。更に、製品HLP-5500ではモニタ光を取り出せるため帰還回路の構成が容易にできる。これらの製品は、先に述べたように光ファイバの損失、及び材料分散が最も小さくなる波長 $1.3\mu\text{m}$ で発振し、更に、光出力-電流特性に折れ曲がりがないため、光ファイバ通信光源に最適である。

## 5 結 言

光ファイバ通信の光源への応用を目的とし、長波長帯のInGaAsP/InP埋込みヘテロ半導体レーザを開発した。得られた結果を以下に示す。



(a) HLP-5400



(b) HLP-5500

図10 製品HLP-5400及びHLP-5500の外観 小さなヒートシンクに、ねじ止めて使用される。

- (1) 光ファイバの損失及び材料分散が小さくなる波長 $1.3\mu\text{m}$ で、InGaAsP/InP埋込みヘテロ半導体レーザの室温連続発振を得た。
- (2) 開発したレーザのしきい電流値は、連続動作時で約50mAと低く、しきい値の2倍以上まで横基本モードで動作した。
- (3) しきい電流値の温度変化は、埋込み層にpn接合を利用した絶縁層を導入することにより改善できた。

以上の結果は、長距離光通信光源としての必須条件を満たすものである。

この研究を進めるに当たり、御討論、御援助及び御指導をいただいた社内の関係各位に対し深謝する。

## 参考文献

- 1) M. Horiguchi and H. Osanai : Electronics Lett., 12, 318 (1976)
- 2) J. J. Hsieh, J. A. Rossi and J. P. Donnelly : Appl. Phys. Lett., 28, 709(1976)
- 3) T. Yamamoto, K. Sakai, S. Akiba and Y. Suematsu : IEEE J. Quantum Electronics, QE-14, 95(1978)
- 4) T. Tsukada : J. Appl. Phys. 45, 4899(1974)
- 5) J. J. Hsieh and C. C. Shen, Appl. Phys. Lett., 30, 429 (1978)
- 6) H. Kano, K. Oe, S. Ando and K. Sugiyama, Japan. J. Appl. Phys., 17, 1887(1978)