

1.3 μ m 帯極低しきい値 InAsP/InP 変調ドーブ MQW レーザ

Extremely Low Threshold

1.3μm InAsP/InP Modulation Doped MQW Lasers

清水 均*
Hitoshi Shimizu

熊田浩仁*
Kouji Kumada

山中信光*
Mobumitu Yamanaka

岩井則広*
Norihiro Iwai

向原智一*
Tomokazu Mukaihara

粕川秋彦*
Akihiko Kasukawa

概 要 低しきい値で発振する波長 1.3 μ m 帯のレーザは、光加入者用光源やデータコム用のレーザアレイ素子として重要である。ガスソース MBE 成長による n 型変調ドーブを用いた 1.3 μ m 帯 InAsP 系 MQW-BH レーザにおいて、室温 CW 駆動でしきい値電流 0.9mA という非常に低い値を達成した。この値は n 型変調ドーブを用いた長波長帯レーザの中で最も低い値であり、ガスソースを含めた MBE 成長による長波長帯レーザの中で最も低い値である。変調ドーブによるしきい値電流とキャリアライフタイム両方の減少により、発振遅延時間は約 30% 減少した。このように、ガスソース MBE 成長による n 型変調ドーブを用いた 1.3 μ m 帯 InAsP 系 MQW レーザは、消費電力が小さく発振遅延時間が小さいために大容量並列光インターコネクションのためのレーザアレイ用途として、非常に有望であると言える。

1. はじめに

低しきい値で発振する波長 1.3 μ m 帯のレーザは、光加入者用光源やデータコム用のレーザアレイ素子として重要である。レーザアレイ素子は、低消費電力と低スキュー（発振遅延時間のバラツキが少ないこと）が必要だからである。

歪量子井戸を活性層に導入することにより、低しきい値電流化や高光出力化、緩和振動周波数の高帯域化等のレーザ特性の改善が達成されている。これらの改善は、歪み導入による価電子帯のバンド構造変化による低内部損失化や高微分利得化にすることに由来する¹⁾。これまでに光通信用 1.3 μ m 帯歪量子井戸の材料としては GaInAsP/InP 系が用いられてきたが、一方で InAsP/InP 系もこの波長帯域をカバーする材料の候補^{2), 3)}である。この材料系に対して $\Delta E_c = 0.7 \Delta E_g$ という通常の GaInAsP 系よりも大きな伝導体バンドオフセット量が報告されており⁴⁾、井戸層中に電子を強く閉じ込めることができるため、低しきい値電流化や特性温度 T_0 の向上が期待される。しかしながら、波長を 1.3 μ m にするためには、InAsP は圧縮歪量 1.4~1.6% という高歪み層が必要である。ガスソース MBE (GSMBE) による低温成長は、臨界膜厚を大きくできるので、InAsP 材料の成長には適していると考えられる。

一方、アンドープの井戸層とドーピングした障壁層から構成される変調ドーブ量子井戸構造 (Modulation Doped MQW; MD-MQW) により、レーザ特性が更に改善されることが理論的に示されている⁵⁾。今までに、n 型 MD-MQW を用いたレーザの低しきい値電流密度化が他機関の MOCVD 成長^{6), 7)}と我々の GSMBE 成長^{8), 9)}により報告されている。光利得は $(f_c - f_v)$ に比

例し、2 つの項に分解することができる。ここで f_c (f_v) は電子 (ホール) に対するフェルミディラック関数である。

$$g \sim (f_c - f_v) = f_c (1 - f_v) - f_v (1 - f_c) \quad \dots(1)$$

ここで、第 1 の項 $f_c (1 - f_v)$ は誘導放出項であり、第 2 の項は誘導吸収項である。n 型変調ドーブレーザに関しては f_c は 1 に近づくので、吸収項はゼロに近づくため、低しきい値電流密度化が達成される。しかしながら、ドーピングプロファイルはこの構造では急峻である必要があるため、このタイプのレーザの成長には GSMBE 法が適していると考えられる。

この論文では、GSMBE 成長による、1.3 μ m 帯 InAsP 系 MQW レーザの特性に及ぼす n 型変調ドーブの効果を調べ、室温 CW 駆動で 0.9mA という当社では初めてのサブミリアンペアしきい値を達成したので報告する。第 2 章では n 型 MD-MQW の構造と、しきい値電流密度の結果について示す。

第 3 章ではリッジ導波路型レーザを作製し、n 型 MD-MQW レーザとアンドープ MQW レーザに関して、利得係数や内部損失、特性温度といったレーザパラメータを抽出した。

第 4 章では BH レーザを作製して諸特性を調べ、n 型変調ドーブ MQW レーザの優位性を示した。

2 . MQW レーザ構造の作製と基礎的な材料特性の評価

ガスソース MBE 法により図 1 に示すような 1.3 μ m 帯 InAsP/ GaInAsP MD-MQW レーザを n-InP 基板上に成長した。レーザ構造は n-InP, p-InP クラッド、圧縮歪 MQW 活性層、そして MQW 両側の 120nm 膜厚の GaInAsP (1.1 μ m 組成) SCH 層から構成される。MQW 活性層は、1.45% 圧縮歪の膜厚 8nm の

* 研究開発本部 横浜研究所 半導体研究開発センター

InAs_{0.45}P_{0.55} 量子井戸と、SCH 層と同じ組成の InP に格子整合する GaInAsP バリア層 10nm からなる。井戸数は 3 とした。それぞれのバリア層のセンター 7nm に n 型ドーピングし、ドーパントはシリコンを用いている。最低しきい値電流密度が得られる最適成長温度と最適ドーピング量は、別の論文で述べるように^{8),10)}、クラッド層を 515 μm 、SCH-MQW 層を 455 μm で成長し、バリア層に $1 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ ドーピングしたレーザであった。

図 2 に最適モードにおけるしきい値電流密度 (J_{th}) と共振器長の逆数の関係を、アンドープ MQW レーザと $N_D = 1 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ にドーピングした MD-MQW レーザについて示す。無限共振器長において、MD-MQW レーザの J_{th} はアンドープ MQW レーザに比べて約 30% 低減され、共振器長 1200 μm で 250 A/cm² という極低しきい値が得られた。1 井戸当たりの J_{th} は過去に MOCVD 法を用いて報告された n 型 MD-MQW レーザの結果と同程度である^{6),7)}。MD-MQW レーザの J_{th} の減少は、透明化キャリア密度の減少によるしきい値キャリア密度の減少によると考えられる^{5),6)}。

3. リッジ導波路型レーザの諸特性の評価

レーザ特性の基礎評価のために、 $1 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ ドープした MD-MQW レーザとアンドープ MQW レーザに関して、幅 20 μm のリッジ導波路型レーザを作製した。リッジ型導波路を作製するために p⁺-GaInAs コンタクト層と p-InP クラッド層は通常の化学エッチングにより除去し、ストライプ構造を作製した。外部

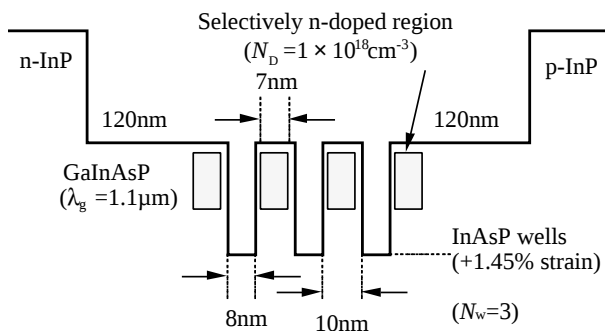


図 1 波長 1.3 μm 帯 InAsP/GaInAsP 変調 n ドープ MQW レーザの構造図
The schematic band diagram of 1.3 μm InAsP/GaInAsP n-type MD-MQW lasers

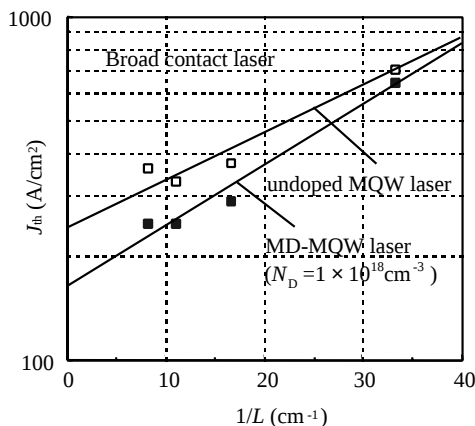


図 2 アンドープ MQW レーザと変調 n 型ドープ MQW レーザの J_{th} と共振器長の関係
The dependence of J_{th} on inverse cavity length in undoped MQW lasers and MD-MQW lasers

微分量子効率 η_d は内部損失 α_i と内部効率 η_i を用いて次式により関係づけられる。また、 η_i は内部量子効率と電流注入効率の積である。

$$\frac{1}{\eta_d} = \frac{1}{\eta_i} \left(1 + \frac{\alpha_i L}{\ln(1/R)} \right) \quad \dots(2)$$

ここで、 L は共振器長であり、 R は平均端面反射率である。図 3 は外部微分量子効率の逆数と共振器長の関係を示したものである。(2 式の関係から α_i と η_i が見積もられる。得られた内部効率は 2 種類のレーザに関してほとんど 100% であり、内部損失はアンドープレーザが 6.0cm^{-1} 、MD-MQW レーザが 4.6cm^{-1} と見積もられた。MD-MQW レーザの内部損失の低減はしきい値キャリア密度の減少による価電子帯間吸収損失の減少によるものであると考えられる⁶⁾。1 ウェル当たりの光利得 g は次式で与えられる。

$$g = G_0 \ln \left(\frac{\eta_i J}{N_w J_{\text{tr}}} \right) \quad \dots(3)$$

ここで J は注入電流密度であり、 J_{tr} は透明化電流密度、 G_0 は利得係数である。これらの関係から J_{th} は次式で表される。

$$J_{\text{th}} = \frac{N_w J_{\text{tr}}}{\eta_i} \exp \left\{ \frac{1}{N_w \Gamma_w G_0} (\alpha_i + \alpha_m) \right\} \quad \dots(4)$$

ここで N_w 、 Γ_w 、 α_m はそれぞれ井戸数、一井戸当たりの光閉じ込め係数、ミラー損失を示している。1 井戸当たりの光閉じ込め係数は TE モードに対する多層導波路に関してマックスウェルの方程式を解くことにより理論的に導き出され、1 井戸当たり 0.0149 となった。リッジレーザの評価から得られた G_0 の値はアンドープ MQW レーザでは 720cm^{-1} であり、MD-MQW レーザでは 650cm^{-1} となり、n 型変調ドープを用いることによる G_0 の大きな劣化は見られなかった。アンドープ MQW レーザの G_0 の値は過去に報告されている $N_w = 3$ のアンドープ InAsP 系 MQW レーザの G_0 の値と同程度である。

光出力 - 注入電流特性 (L - I 曲線) の温度依存性を、アンドープ MQW レーザと MD-MQW レーザに関して調べた。

図 4 には、 L - I 曲線の 20~70 μm におけるパルス駆動での温度特性を示す。素子の共振器長は 300 μm であり、後端面には反射

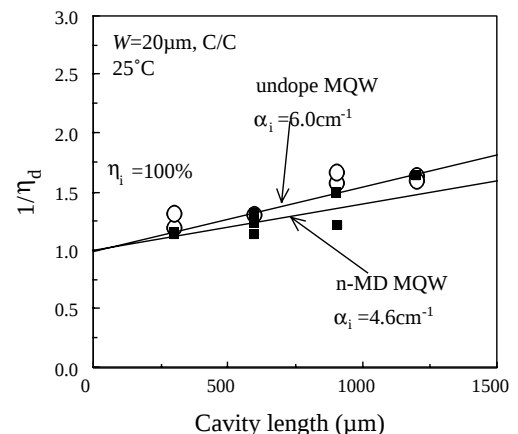


図 3 幅 20 μm のリッジ導波路型レーザの外部微分量子効率と共振器長との関係
The inverse differential quantum efficiency versus cavity length for ridge lasers with 20 μm width

率96%のHRコーティングを施してある。MD-MQWレーザのしきい値は、幅が20 μm と広いにもかかわらず、20 μm で28mAという低い値が得られている。また、アンドープMQWレーザよりも約20%しきい値は減少している。スロープ効率はMD-MQWレーザで20 μm において0.66W/Aと、高い値が得られている。特性温度(T_0)は20~70 $^{\circ}\text{C}$ の間でアンドープMQWレーザが70K, MD-MQWレーザが66Kであり、n型変調ドーピングを用いることによる T_0 の大きな劣化は観測されなかった。このことは、 G_0 がMD-MQWにより大きく減少することは無かったという事実と一致する。

リッジレーザのしきい値電流を低減するために、両端面に高反射HR膜を施した短共振器レーザを作製した。なぜならn型MD-MQWレーザの J_{th} は低ミラー損失領域で低くなるからであ

る。図5に示すように、リッジ幅が20 μm と広いにもかかわらず、MD-MQWレーザでは11.5mAという低しきい値電流が200 μm の共振器長($R_f/R_r=90\%/96\%$)で得られた。このことから、幅が1.5 μm の理想的なBHレーザを作製すれば、サブミリアンペアしきい値が期待できる。

4. MD-MQW 埋め込みヘテロ型 (BH) レーザの諸特性の評価

図6に示すようにGSMBE法で成長したn型MD-MQWレーザ($N_D=1 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$)に関してp-InPとn-InP ブロッキング層を有する埋め込み構造(BH)をMOCVD法により作製した。活性層幅 W は1.6 μm とし、リーク電流と寄生容量を減らすためにトレンチ構造を作製している。図7には、室温パルス動作におけるMD-MQWレーザのしきい値電流と共振器長の関係、端面反射率をパラメータとしてプロットしたものである。それぞれの線は、第3章で述べたようにリッジレーザの評価から抽出したパラメータを用い、以下の理論式で計算した結果である。

$$I_{th}=WL\frac{N_wJ_{tr}}{\eta_i}\exp\left\{\frac{1}{N_w\Gamma_w\Gamma_iG_0}\left(\alpha_i+\frac{1}{2L}\ln\left(\frac{1}{R_fR_r}\right)\right)\right\}\dots(5)$$

ここで、 Γ_i は横方向の光閉じ込め係数、 R_f (R_r)は前端面(後端面)の反射率を表す。 Γ_w と W は比較的大きいので、 Γ_i は1であると仮定する。

丸印、 $\times$ 印、四角印はそれぞれ両端面へき開の素子、へき開/HR(96%)の素子、HR(90%)/HR(96%)の素子のレーザの実験結果を示す。両端面へき開の素子に関して共振器長300 μm 、

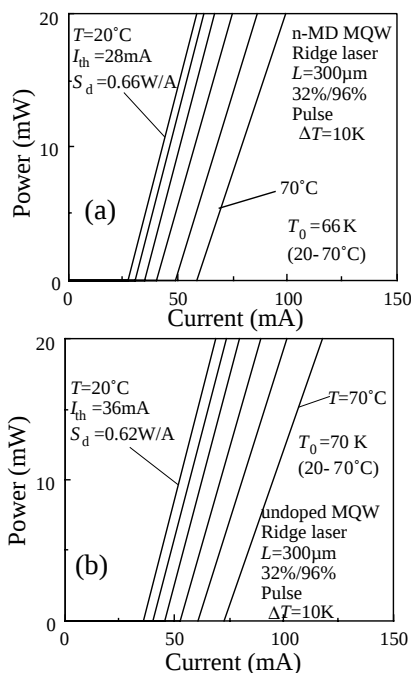


図4 幅20 μm のリッジ導波路型レーザ(共振器長300 μm , CL/96%)の光出力-電流曲線の温度依存性 (a)変調ドーピングMQW (b)アンドープMQW The temperature dependence of output power versus current in MD-MQW ridge laser (a) and undoped MQW ridge laser (b)

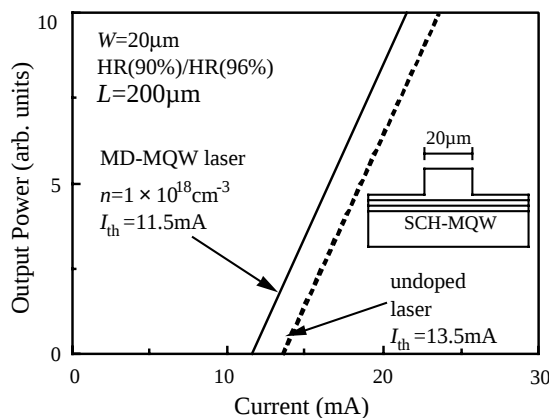


図5 幅20 μm のリッジ導波路型レーザ(共振器長200 μm , 90%/96%)の光出力-電流曲線 Light output versus current characteristics of MD-MQW ridge laser and undoped MQW ridge laser

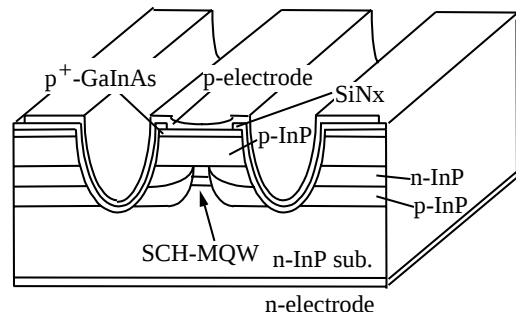


図6 1.3 μm 帯InAsP系MQW BHレーザの構造図 The schematic diagram of 1.3 μm InAsP MQW buried heterostructure lasers

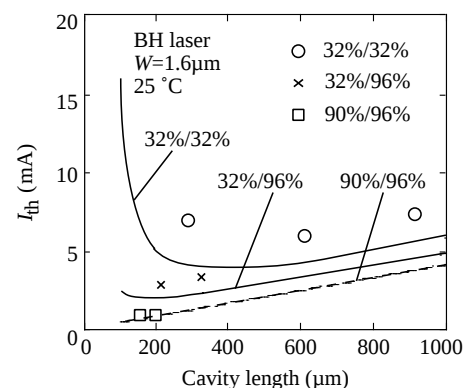


図7 変調ドーピングMQW BHレーザのしきい値電流と共振器長の関係 The threshold current versus cavity length of MD-MQW BH lasers as a parameter of facet reflectivity

600 μm , 900 μm の素子の平均的なしきい値電流はそれぞれ、7mA, 6.3mA, 7.5mAがそれぞれ得られている。HRコーティングを施した短共振器素子のしきい値電流は計算結果と良く合うが、ミラー損失が大きい素子や共振器長が長い素子では計算値と実験値の食い違いが大きくなる。この食い違いは埋め込み構造における不完全な電流ブロッキングによるリーク電流によるものと考えられ、長共振器長やしきい値電流密度が高い素子ではこのリーク電流が大きくなると考えられる。図8には共振器長 150 μm で両端面 HR コーティングを施した素子 ($R_f/R_r=90\%/96\%$) の 25 $^{\circ}\text{C}$, CW 駆動における L - I 特性を、2mA で駆動したときの発振スペクトルと共に示す。非常に低い 0.9mA というしきい値電流が、チップをヒートシンクにボンディングしてないにもかかわらず CW 駆動で達成された。この時のしきい値電流密度は 375A/cm² に相当する。これまでに波長 1.3 μm 帯での室温でのサブミリアンペア動作はいくつか報告例があるが、これらはすべて、全 MOCVD 成長による歪み量子井戸レーザであり、しきい値電流 0.4mA¹¹⁾, 0.58mA¹²⁾, 0.98mA¹³⁾, 0.80mA¹⁴⁾ が報告されている。今回の 0.9mA という値は n 型変調ドープを用いた長波長帯レーザで報告⁶⁾されている中で最も低い値であり、ガスソースを含めた MBE 成長による長波長帯

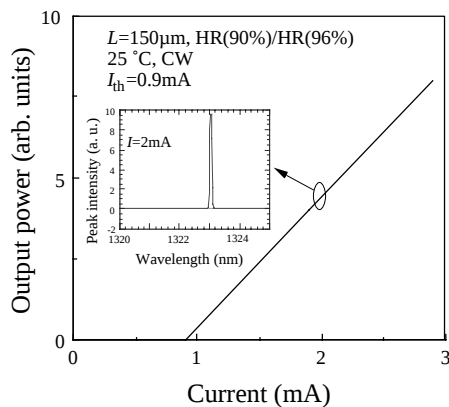


図 8 共振器長 150 μm 、90%/96% の高反射膜を施した BH レーザの光出力-電流曲線。図中には、2mA における発振スペクトルを示す。
Light output power versus current characteristics of 150 μm -long MD-MQW BH lasers with HR coatings ($R_f/R_r=90\%/96\%$) with the inset of the lasing spectrum operating at 2mA

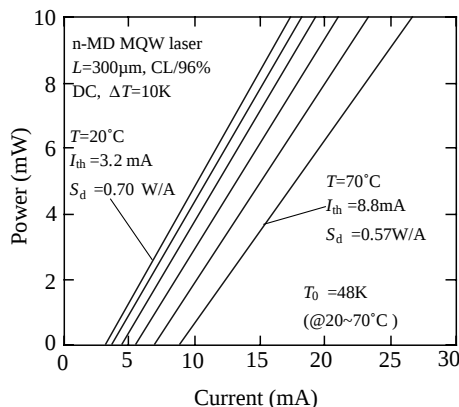


図 9 変調ドープ MQW BH レーザの光出力-電流曲線の温度依存性 (共振器長 300 μm 、C/96%)
The temperature dependence of output power versus current characteristics for MD-MQW BH laser with 300 μm -long cavity

レーザ³⁾の中で、我々の知る限り、最も低いしきい値である。更に共振器長を短くしてストライプ幅を狭くした BH レーザでは、更に低しきい値電流が期待できることに注意されたい。

$N_D=1 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ の MD-MQW を用いた BH レーザに関して、 L - I 特性の温度特性を調べた。図9には 20~70 $^{\circ}\text{C}$ における L - I 曲線の DC 駆動での温度特性を示す。素子は共振器長 300 μm であり、前端面へき開、後端面に 96% の HR コーティングを施している。20 $^{\circ}\text{C}$ のしきい値は 3.2mA と低く、スロープ効率率は 0.70W/A と高い。70 $^{\circ}\text{C}$ でのしきい値と効率はそれぞれ、8.8mA, 0.57W/A であった。20~70 $^{\circ}\text{C}$ での特性温度は 48K であった。リッジレーザによるパルス動作での T_0 は 66K であったが、この BH レーザの DC 動作における T_0 低下はブロッキング層のリーク電流の T_0 に支配されていると考えている。

更に、MD-MQW レーザはアンドープ MQW レーザに比べて内部損失が小さくなるので、高出力化が期待されるため、MD-MQW レーザの高出力特性を調べた。図10には Au メッキを施して junction-down でボンディングした素子の高出力特性を調べたものである。素子の共振器長は 1200 μm であり、前端面 5%、後端面 96% のコーティングを施している。25 $^{\circ}\text{C}$, DC 駆動でのしきい値電流は 8.6mA、最高光出力は 300mW であり、高電流注入時の光出力の飽和は活性層の温度が上昇することに起因していると考えられる。100mW 出力時のファーフールドパターンの半値幅は水平方向が 22 度、垂直方向が 32 度であっ

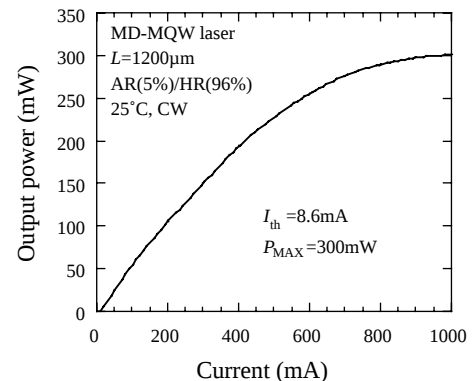


図 10 変調ドープ MQW BH レーザの高出力特性 (共振器長 1200 μm 、5%/96%)
Light output power versus current characteristics of 1200 μm -long MD-MQW BH lasers with AR/HR coated facets ($R_f=5\%$, $R_r=96\%$ coated)

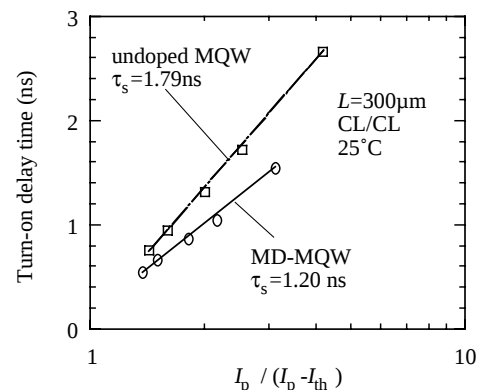


図 11 BH レーザの遅延時間と正規化したバイアスレベルとの関係
The turn-on delay time versus normalized bias level for MD-MQW BH laser and undoped MQW BH laser with 300 μm -long cavity and cleaved facets

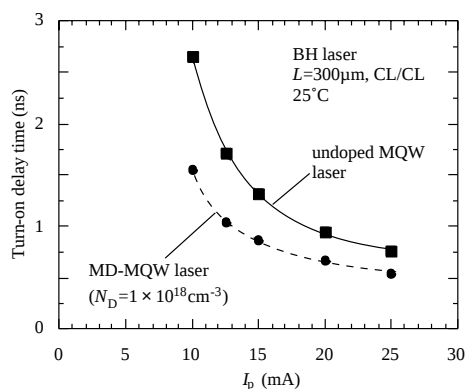


図 12 BH レーザの発振遅延時間とパルス電流値の関係
The turn-on delay time versus height of pulse current for MD-MQW BH lasers and undoped MQW BH lasers with 300 μ m-long cavity and cleaved facets

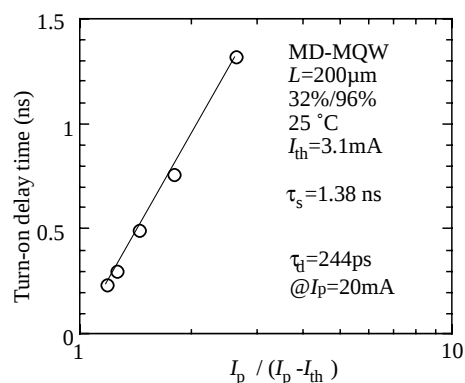


図 13 変調ドープMQWレーザの遅延時間と正規化したバイアスレベルとの関係(共振器長200 μ m、C/96%)
The turn-on delay time versus normalized bias level for MD-MQW BH laser of 200 μ m-long cavity (cleaved front facet, R_r =96% coated)

た。

低しきい値レーザの他の利点は、レーザアレイのスキュー(発振遅延時間のバラツキ)を減少できることにある。ゼロバイアス時の半導体レーザの発振遅延時間 τ_d は次式で表される。¹⁵⁾

$$\tau_d = \tau_s \ln \left(\frac{I_p}{I_p - I_{th}} \right) \quad \dots (6)$$

ここで I_p はパルス電流値であり、 τ_s はキャリアライフタイムである。n型MD-MQWレーザは、ドーピング濃度の増加と共に、全自然放出光確率が高くなるために、キャリアライフタイムが減少することが予測されている。このことにより、発振遅延時間は減少する。図11は発振遅延時間と規格化バイアスレベル $I_p / (I_p - I_{th})$ の関係をMD-MQWレーザ($N_D = 1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$)とアンドープMQWレーザに関して、共振器長300 μ m、両端面へき開のBHレーザで測定した結果を示してある。キャリアライフタイムは図11の傾きから求められ、アンドープMQWレーザでは1.79nsであり、MD-MQWレーザでは1.20nsであり、変調ドープにより約33%減少した。n型変調ドープを用いることにより、これらのしきい値電流とキャリアライフタイムの両方の減少は、式6から発振遅延時間の減少をもたらすことになる⁶⁾。

図12は発振遅延時間とパルス電流値 I_p の関係を、MD-MQWレーザとアンドープMQWレーザに関して示している。MD-MQWレーザの発振遅延時間はアンドープMQWに比べて、パルス電流値20mAにおいて約30%減少している。

図13はMD-MQWレーザに関して、発振遅延時間と規格化バイアスレベル $I_p / (I_p - I_{th})$ の関係を、共振器長200 μ m、片端面HRコーティング($R_r=96\%$)のBH素子に関して示している。25 $^{\circ}\text{C}$ でのしきい値電流は3.1mAであり、レーザはゼロバイアスされている。得られた発振遅延時間は20mAのパルス電流で244psという小さい値が得られた。

このように、ガスソースMBE成長によるn型変調ドープを用いた、1.3 μ m帯InAsP系MQWレーザは、消費電力が小さく発振遅延時間が小さいために大容量並列光インターコネクションのためのレーザアレイ用途として、非常に有望であると言える。

5. まとめ

我々は、ガスソースMBE成長による、n型変調ドープを用いた1.3 μ m帯InAsP系MQWレーザにおいて、室温CW駆動でしきい値電流0.9mAという非常に低い値を達成した。この値はn型変調ドープを用いた長波長帯レーザの中で最も低い値であり、ガスソースを含めたMBE成長による長波長帯レーザの中で最も低い値である。キャリアライフタイムはn型変調ドープを用いることにより、同様に約33%減少した。変調ドープによるしきい値電流とキャリアライフタイム両方の減少により、発振遅延時間は約30%減少した。また、飽和光出力300mWの高出力特性も確認した。

n型変調ドープMQWにより、低しきい値、高効率、低発振遅延時間、高光出力動作を実験的に確認することができた。

参考文献

- 1) A. R. Adams: Electron. Lett. 22 (1986) 249.
- 2) A. Kasukawa et al.: IEEE J. Quantum Electron. 29 (1993) 1528.
- 3) P. Thiagarajan et al.: J. Cryst. Growth 175 (1997) 945.
- 4) R. P. Schneider et al.: J. Electron. Mater. 20 (1991) 1117.
- 5) K. Uomi: Jpn. J. Appl. Phys. 29 (1990) 81.
- 6) K. Nakahara et al.: IEEE J. Select. Topics in Quantum Electron. 3 (1997) 166.
- 7) T. Yamamoto et al.: IEEE Photon. Technol. Lett. 6 (1994) 1165.
- 8) H. Shimizu et al.: Electron. Lett. 34 (1998) 888.
- 9) H. Shimizu et al.: Electron. Lett. 34 (1998) 1591.
- 10) 清水 均 他: 古河電工時報 No. 102 (1998) 65.
- 11) T. Terakado et al.: Electron. Lett. 31 (1995) 2182.
- 12) K. Uomi et al.: IEEE J. Select. Topics Quantum Electron. 1 (1995) 203.
- 13) C. E. Zah et al.: IEEE J. Quantum Electron. 27 (1991) 1440.
- 14) J. S. Osinski et al.: IEEE Photon. Technol. Lett. 4 (1992) 1313.
- 15) N. K. Dutta et al.: Appl. Phys. Lett. 61 (1992) 130.