イオンインプラ型フォトニック結晶VCSELによる 大口径・単一横モード化技術

Large-Aperture Single-Transverse-Mode Operation of Ion-Implanted Photonic-Crystal VCSELs

喜瀬智文* ニャカシュ ペーテル^{*2} 丸山一臣* 清田和明* 横内則之* Tomofumi Kise Peter Nyakas Kazuomi Maruyama Kazuaki Kiyota Noriyuki Yokouchi

概要 垂直共振器型面発光レーザ (vertical-cavity surface-emitting laser: VCSEL)の大口径かつ 単一横モード化を実現する技術の1つとしてフォトニック結晶 VCSELが期待されている。フォトニッ ク結晶 VCSELとは、VCSELの素子上面に形成した周期的な円孔配列による弱い屈折率閉じ込めに よって横モードを制御するものであり、従来の酸化狭窄型に比べて大口径で単一横モード発振が実現 可能である。本報告では、本デバイスを実現するに当たり要素技術となる、単一横モード化のための フォトニック結晶構造の設計、デバイス作製技術、及び実現された素子特性について紹介する。

1. はじめに

近年,光インタコネクションや超高速イーサネットの実用化 に向けて、単一横モードで発振する面発光レーザ(VCSEL)が 注目されている。従来より開発されてきた酸化狭窄型VCSEL でも単一横モード発振を得ることは不可能ではないが、光出力 や素子抵抗、信頼性、量産性など実用化への課題も多い。また これまで光出力向上の観点から、大口径で単一横モード化を実 現する技術はいくつか報告されているが^{1)~3)}、これらは高次 モードに選択的に損失を与えることでシングルモード化を実現 しているため、特に高速変調に課題があると考えられる。本研 究では、これらの課題を解決できる新しい横モード制御技術と してフォトニック結晶VCSELに着目し、設計論及び作製技術 を確立することを目的とした。

2. フォトニック結晶 VCSEL

フォトニック結晶VCSELは素子上面にエッチング形成した 2次元フォトニック結晶円孔配列により,光閉じ込めを実現す る新しいVCSEL構造であり(図1),原理的には極めて大口径 で単一横モード動作を実現できる技術である^{4)~6)}。素子の中 心部にはフォトニック結晶を形成しない単一欠陥があり,その 周囲はフォトニック結晶構造により僅かに屈折率が低下するた め,欠陥領域に光が閉じ込められる。例えば,850 nm帯 VCSELにおいて,従来の酸化狭窄型で単一横モード発振を得 るためには3 μm程度まで発光領域を小さくする必要がある が,本技術を用いれば発光径が10 μmであっても単一横モー

* 研究開発本部 横浜研究所

*2 Furukawa Electric Institute of Technology (FETI)

ド動作が期待できる。この大口径化という特長を生かすことで、 単一横モード素子であっても低素子抵抗,高光出力が期待でき るのに加え,ESD(静電気破壊)耐性の向上が図られ,また酸 化狭窄型のような結晶ひずみを導入することがないため,本質 的に高信頼性が実現できる。更にフォトニック結晶構造の最小 サイズが数µm程度であっても光閉じ込めの効果が得られるた め,従来のフォトリソグラフィ技術で作製が充分可能であり, またサイズ揺らぎに対しても単一横モード特性が損なわれるこ とがないため,量産性という観点からも酸化狭窄型よりも有利 である。



図1 フォトニック結晶 VCSELの模式図 Schematic of photonic-crystal VCSEL.

3. 単一横モード設計

3.1 電流狭窄構造

上述のとおり、本デバイスではフォトニック結晶構造によっ

て光閉じ込めを制御するため、電流狭窄構造についてはそれと は独立に設計することが可能である。VCSELの電流狭窄構造 としては、一般的に酸化狭窄型または水素イオンインプラ型が 用いられる。酸化狭窄型の場合、酸化狭窄による屈折率閉じ込 めがフォトニック結晶による屈折率閉じ込めよりも1桁程度大 きいため (図2),フォトニック結晶による光閉じ込めモードが 酸化狭窄によるモードと競合し、特に高電流注入時などにシン グルモード動作が不安定になりやすいという問題があった。 従って、フォトニック結晶による光閉じ込めモードによる安定 した発振を得るために,酸化狭窄開口径φをフォトニック結 晶の欠陥径D(=発光径)よりも大きく設定する必要があるが、 その結果、注入電流の一部のみしかフォトニック結晶閉じ込め モードに寄与しないという課題がある。そこで本研究では、電 流狭窄構造として、屈折率閉じ込め機構を付随しない水素イオ ンインプラ型を採用することとした。イオンインプラ型の場合, 電流注入開口径 φ をフォトニック結晶の欠陥径D に近い値に 設計可能なため、フォトニック結晶閉じ込めモードに効率良く 利得を与えることができる。ただし、イオンインプラ型の場合, 後述する熱レンズ効果と呼ばれる、電流注入に伴う発熱による 屈折率変動の影響が大きくなることが予想されるため(図2), それを考慮した設計が重要となると考えられる。



図2 フォトニック結晶 VCSELの電流狭窄構造の検討 Study of current confinement structures for photoniccrystal VCSEL.

3.2 VCSELシミュレータによる設計

フォトニック結晶VCSELの設計には、当社とFETIで共同 開発した3次元のVCSELシミュレータを利用した。本シミュ レータでは、まず有限要素法を用いて、素子内部の電流注入プ ロファイルと発熱分布を求め、それらの結果を考慮した上で、 Helmholtz方程式を数値的に解くことによって、その固有解か ら光学モードを計算する^{7)~8)}。本手法により、従来のパッシ ブモデル⁵⁾に比べ、電流注入を考慮した静特性などを精度良く シミュレーションすることができる。

解析モデルは、通常の850 nm帯のVCSEL構造をベースと した。30ペアからなる上部DBRミラーのうち、上から24ペア の深さ領域にフォトニック結晶構造を形成した。これは VCSELの共振器内部の光強度分布とフォトニック結晶構造と の重なり度合を考慮し、活性層に近く光強度分布の高い領域に フォトニック結晶を形成することにより、十分な横モード制御 効果を得るためである⁵⁾。図3は、フォトニック結晶の格子定 数 $\Lambda = 5 \mu m$ 、円孔直径 $d = 0.5\Lambda$ 、イオンインプラ開口径 $\phi =$ 10 µmとして計算した,基本モードLP01及び1次の高次モード LP11のモードパターンである。この構造では,電流注入をし ない状態においても高次モードがサポートされており,純粋な シングルモード構造ではないことが分かる。ところが図3より, 高次モードはフォトニック結晶部分への光のしみ出しが大き く,散乱損失が高いことが考えられる。このことから,フォト ニック結晶による散乱損失が本デバイスにおける単一横モード 動作に一定の役割をもっていることが推測される。

そこで、本デバイスにおける単一横モード特性をより詳細に 把握するために、光閉じ込めの欠陥径Dを決定するフォトニッ ク結晶の格子定数 をパラメータとし3 μ m ~5 μ mの間で変化 させて光学モード計算を行った。ここで円孔直径d = 0.5.1, イ オンインプラ開口径 $\phi = 7.9 \ \mu$ mに固定してシミュレーション を行った。

図4は、それぞれの格子定数における基本モードLP₀₁(実線) と1次高次モードLP₁₁(点線)のモード損失を投入電力(heat dissipation)に対してプロットしたものであり、電流注入下で のモード損失の振る舞いを示したものである。基本モードより 高次モードの損失が高いのは、上述のフォトニック結晶による 散乱損失をより強く受けているためと考えられる。



図3 計算した基本モード (LP₀₁)と1次高次モード (LP₁₁)の モードパターン Calculated optical mode patterns of fundamental mode LP₀₁ and 1st order mode LP₁₁.



図4 モード損失の投入電力依存性 Calculated modal loss versus dissipated heat power.

また図4から,格子定数A = 3 µmの場合は,投入電力が 10 mWより小さい条件下では高次モードが存在せず,構造上, 完全なシングルモード条件を満足していることが分かる。一方 で,格子定数が4 µm以上の場合は,低電流域から高次モード が存在している。またグラフより,低~中電流域でモード損失 が低減しているのは,熱レンズ効果により光の欠陥部分への閉 じ込めが強くなるため,フォトニック結晶による光の散乱損失 が低減しているためと考えられる。一方,高電流域でモード損 失が増加に転じているのは,発熱による温度上昇に起因した吸 収損失の増大が支配的になっているためである。また,格子定 数が小さいものほど,基本モード及び高次モードともに相対的 に損失が大きくなっているのは,光の欠陥部分への閉じ込めが 弱いため,フォトニック結晶による散乱をより強く受けている ためと考えられる。

図5は熱レンズ効果による光強度分布の変化及び電流注入分 布を模式的に説明したものである。赤線が光強度分布,青線が 活性層部における電流密度分布を表している。電流注入領域は 発熱により屈折率が高くなるため,光のモードは発熱した中心 部への閉じ込めが強くなる。これが熱レンズ効果と呼ばれる。 電流注入分布については、VCSELの構造上,上部電極が光の フィールドの外側に位置するため,図のように外側の電流注入 分布がやや高い,不均一な注入が生じる。従って,外側に光の フィールドが広がった高次モードの方が利得が高くなるような 状況が起こり得る。また電流注入開口が光のフィールドに対し て広すぎると,発振に寄与しない無効電流が増えることになる。



図5 熱レンズ効果によるモード分布変化と電流注入分布 Change of optical mode by thermal lens effect and current density profile.

次に,格子定数/が単一横モード性に与える影響について 考える。図6は、単一横モード性の指標として、1次高次モー ド と 基 本 モ ー ド と の 損 失 比 a LP11/a LP01 (modal discrimination)を図4と同様に投入電力に対してプロットした ものである。この値が1より大きいほど高次モードの損失が相 対的に高く、単一横モード性がよいと言える。定性的な傾向と しては、電流注入に伴い、熱レンズ効果によりフォトニック結 晶領域へ広がった高次モードの損失の低減がより顕著となるた め、単一横モード性としては低下している。一方、格子定数を 小さくすれば、単一横モード性は向上するが、図4に示したよ うに基本モードの損失が犠牲となる。このように単一横モード 性とモード損失との間にはトレードオフの関係があることが分 かる。



図6 単一横モード性の投入電力依存性 Calculated modal discrimination versus dissipated heat power.

更に以上の計算結果をもとに、より定量的な特性予測をする ために、レート方程式を使って光出力-電流特性のシミュレー ションを行った。結果を図7に示す。格子定数Λが3,4, 5 μmのものについて計算を行った。Λ=4,5 μmのものにつ いては、LP₀₁、LP₁₁それぞれについて光出力-電流特性を示し ている。モード損失の低い、格子定数が大きい素子ほど低しき い値(~2.4 mA)で発振が起こるが、5 mA程度の低電流域に おいて高次モードの発振が見られることが分かる。逆に、格子 定数が小さくなるに従って、しきい値は上昇するが、高次モー ドの発振は起こりにくく、特にΛ=3 μmの素子では全電流域 で高次モード発振は起こらず、シングルモード動作が維持され るという結果が得られた。



図7 光出力 - 電流特性のシミュレーション結果 Simulated light power versus current characteristics for three lasers.

4. 作製及び評価

以上の設計をもとに、実際にフォトニック結晶 VCSEL 素子 を作製した。作製にはn-GaAs 基板上に MOCVD (metal organic chemical vapor deposition) 法により成長した波長 850 nm帯VCSELエピウエハを用いた。活性層は4ペアの GaAs/Al₀₂Ga_{0.8}As多重量子井戸構造からなり,上部DBRミ ラーは30ペアのAl_{0.2}Ga_{0.8}As/Al_{0.9}Ga_{0.1}As半導体多層膜で構成 されている。

まず、電流注入開口部となる領域にレジストあるいはAuからなる耐イオン注入マスクを形成した後、水素イオン注入を行った。マスク開口径 ϕ は7 µm, 10 µm, 15 µmの3通りを作製した。イオン注入条件は、加速エネルギーが340 keV,ドーズ量は4×10¹⁴ cm⁻²とした。イオン注入後は結晶性回復のため、適切な温度にてRTA (rapid thermal anneal)処理を行う。GaAs系への水素イオン注入では、一般的にアニールに対して比較的安定な格子欠陥起因の絶縁層が形成されるため、電流狭窄構造として機能させることができる。

その後、ウエハ上にエッチングマスクとしてSiNxを成膜し、 フォトリソグラフィを用いて作製したフォトニック結晶パター ンをSiNxマスクに転写した後、塩素ガスを用いたICP-RIE (inductively coupled plasma-reactive ion etching)を用いて上 部DBR半導体多層膜の一部をエッチングした。ここでフォト ニック結晶の格子定数 は3 µm、4 µm、5 µmの3通りを作製 した。エッチング深さはシミュレーションとほぼ同様の上部 DBRの上から23ペア程度であり、円孔直径dは格子定数によ らず0.57 *A* 程度であった。作製したフォトニック結晶構造の一 例の断面SEM写真を図8に示した。垂直かつ平滑なエッチン グ形状が実現できていることが分かる。その後は、従来の VCSEL作製プロセスに従って、電極形成及び素子分離メサ形 成などを行い、素子が完成する。



図8 作製したフォトニック結晶 VCSELのSEM 写真 SEM image of the fabricated photonic-crystal VCSEL.

図9に作製した素子(A=3,4,5 µm)の光出力-電流特性(実 線)及びSMSR (side mode suppression ratio)の電流依存性(点 線)を示した。グラフ中の挿入写真は本素子のしきい値付近に おける近視野像(near field pattern)であり、フォトニック結 晶による閉じ込めモードでの発振が確認できる。図9より、格 子定数が小さくなるに従ってしきい値の上昇、効率の低下が観 測されている。これは図4で示したように、フォトニック結晶 による散乱損失をより強く受けているためと考えられる。一方、 格子定数が大きい素子ほど低電流域でSMSRが低下し,高次 モード発振が見られている。この結果も図6で示した単一横 モード性の計算結果の傾向と定性的に一致している。すなわち, 格子定数が大きいと欠陥部への閉じ込めが相対的に強く,熱レ ンズ効果による高次モードの損失の低下がより顕著なため,高 次モード発振が起こりやすいと考えられる。また,図9の実験 結果は、シミュレーションにより求めた光出力-電流特性(図 7)と定量的にも非常によく一致していることが確認できる。



図9 作製した素子の光出力 – 電流特性 Light output versus current characteristics of the fabricated photonic-crystal VCSELs.

図10は格子定数A = 4 µmの素子の発振スペクトルを電流 値を変化させて測定したものである。これより8 mAまでの電 流域では単一横モード発振が見られているが,電流値10 mA においては,熱レンズ効果により,スペクトル上においても明 確な高次モード発振が確認できる。



図10 作製した素子の発振スペクトル Spectrum of the fabricated photonic-crystal VCSEL.

また、図11はSMSRが30 dB以上得られる最大光出力をシ ングルモード光出力として、異なる格子定数A及びイオンイ ンプラ開口径 φ からなる複数の素子についてプロットしたも のである。これまでの考察から、低モード損失と単一横モード 性の間にはトレードオフの関係があり、それらがバランスする 最適な格子定数が存在することが容易に推測される。図11よ り、シングルモード光出力という観点では、例えば $\phi = 7 \mu m$ の場合、 $\Lambda = 4 \mu m$ の場合に最も高い出力が得られることが分 かる。このように、損失と単一横モード性の関係を考慮した上 で、格子定数 Λ 及びイオンインプラ開口径 ϕ を適切に設計す ることにより、良好な単一横モードレーザ特性が得られること が分かった。



図11 シングルモード光出力の格子定数依存性 Single mode optical power versus lattice constant.

5. おわりに

フォトニック結晶VCSELについて、大口径・単一横モード 化のための設計論を確立し、それに基づいて実際に素子を作製 した。モード損失と単一横モード性の関係に配慮した設計を行 うことにより、従来の酸化狭窄型の場合に比べて10倍程度の 大口径であっても、良好な単一横モード特性が得られることを 実証できた。今後の展開としては、素子の更なる高出力化を図 り、ESD試験・信頼性試験を進め、本デバイスの優位性を更に 検証していくとともに、本技術をシングルモード動作の要請の ある長波長帯 VCSELへ適用することが考えられる。

参考文献

- H. Martinsson, J. A. Vukusic, M. Grabherr, R. Michalzik, R. Jager, K. J. Ebeling, and A. Larsson: "Transverse Mode Selection in Large-Area Oxide-Confined Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers Using a Shallow Surface Relief," IEEE Photon. Technol. Lett., 11 (1999), 1536.
- D. G. Deppe and D. L. Huffaker: "High spatial coherence vertical-cavity surface-emitting laser using a long monolithic cavity," Electron. Lett., 33 (1997), 211.
- N. Nishiyama, M. Arai, S. Shinada, K. Suzuki, F. Koyama, and K. Iga: "Multi-Oxide Layer Structure for Single-Mode Operation in Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers," Photon. Technol. Lett., 12 (2000), 606.
- 4) H. J. Unold, M. Golling, R. Michalzik, D. Supper and K. J. Ebelling: "Photonic Crystal Surface-Emitting Lasers: Tailoring Waveguiding for Single-Mode Emission," Proc. of the 27th European Conference on Optical Communication (ECOC), (2001), Th.A.1.4.
- N. Yokouchi, A. J. Danner, and K. D. Choquette, "Twodimensional photonic crystal confined vertical-cavity surfaceemitting lasers," IEEE J. Selected Topics of Quantum Electron., 9 (2003), 1439.
- 6) T. Kise, P. Nyakas, K. Maruyama, K. Kiyota, and N. Yokouchi: "Thermal lens effect on single-transverse-mode stability of proton-implanted photonic-crystal vertical-cavity surfaceemitting lasers," Proc. of the 20th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society (LEOS), (2007), WZ-5.
- P. Nyakas, G. Varga, Z. Puskas, N. Hashizume, T. Karpati, T. Veszpremi, and G. Zsombok: "Self-consistent real three-dimensional simulation of vertical-cavity surface-emitting lasers," J. Opt. Soc. Amer. B, 23 (2006), 1761.
- P. Nyakas: "Full-vectorial three-dimensional finite element optical simulation of vertical-cavity surface-emitting lasers," IEEE J. Lightwave Technol., 25 (2007), 2427.