

GaAs(3 1 1) B 基板上的 InGaAs 自己組織化現象と 極微細レーザーへの応用

天明 二郎・倉持 栄一・須郷 満
西谷 昭彦・Richard NÖTZEL*・玉村 敏昭

本特集のテーマである量子細線(quantum wire), 量子ドット (quantum dot) 等低次元構造は, 光デバイスの分野では 1982 年に量子井戸レーザーの次期バージョン高性能レーザーとして提案された。しかし, その後の薄膜成長技術ならびに微細加工技術の進展に支えながらも, その作製の困難さからこれまで十分満足できる結果は得られていない。特に, 特性実現上重要なサイズ均一性と活性層を加工した際の残留ダメージは微細化するほど深刻になり, 残念ながら室温での良好な PL (photoluminescence) 発光すら得られておらず, 低温での光学評価にとどまっていた。

一方, この 10 年で半導体レーザーをめぐる状況は大きく変化している。長波通信応用では高速化から WDM (wavelength-division multiplexing) 対応へ, 短波記録レーザーでは青色レーザーの研究が大きな注目をあびている。低次元閉込めレーザーの当時の研究ターゲット (低閾値, 小温度特性, 高速変調性等) はこの 10 年の間に, ほぼ同時期に提案された歪量子井戸レーザー技術の進展によりかなり改善/解決され, 実用上から低次元ならではの期待されるポイントはかなり不明瞭になってきた感は否めない。

しかし, 最近, 自己組織化を中心とする自然形成法で従来に比べ品質の良い量子ドットが得られることが明らかになり, 壁にあたっていたこの低次元系研究分野のひとつのブレイクスルーと認識されつつある。本稿では, 筆者らが最近発見した自己組織化現象^{1,2)} とされる歪量子ディスクを活性層とするレーザー³⁾ を簡単に紹介し, 今後を展望してみたい。

1. 秩序性を伴う自己組織化現象とは?

筆者らは, 1993 年 9 月有機金属気相成長法を用いて

GaAs 高指数面基板上での InGaAs/AlGaAs 量子井戸形成の検討を行う途中で, ナノメータスケール極微細構造形成を伴う新しい自己組織化現象を発見した。GaAs (3 1 1) B 基板上で, InGaAs 薄膜成長後, 高温で数分間の成長中断を行うと, サブ 100 nm サイズの InGaAs 歪量子ディスクを内蔵するナノクリスタルがオーダリングを伴いながら, 自然に形成される現象である(図 1)。これらは基本的には, (3 1 1) B 面など高指数面上での adatom マイグレーションに対し, (1 0 0) 面に比べバリアハイトが低いと考えると考えられるが, マストランSPORTをとまなう等歪エネルギーと複雑に絡み合った表面現象である。室温で半値幅が狭くかつ強い PL 発光(波長 0.85~0.95 μm) を伴う特長があり, 従来の人工的な方法で形成された低次元構造と比べ, 結晶品質, 界面構造ともにきわめて優れていることを示している。現在までのところ, そのサイズは歪量すなわち In 濃度ならびに待機温度で概略 20~100 nm の範囲で制御できる。最近, 室温で PL 発光が得られるこれら微細歪量子ディスクを 50 K 程度まで冷やした後, 光励起パワーを下げていくと半値幅で 0.2 meV と非常に狭いヒゲのように急峻な PL 発光ならびに吸収特性が分離観測された。これは低次元性からくる状態密度の急峻さを直接反映しているとみられている⁴⁾。しかし, 同時にみられる多数の急峻な PL ピークは, 歪薄層系特有の膜厚のゆらぎ, 横方

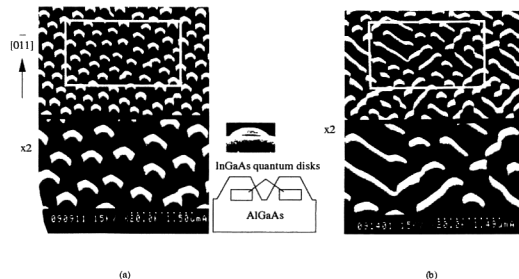


図 1 (a)自己組織化が終了した MOVPE 成長 InGaAs の表面 SEM 写真。秩序性のあるナノクリスタル内部に歪量子ディスクが内蔵されている。(b)自己組織化の途中過程を示す表面 SEM 写真。

* Self-organization in strained InGaAs system and its application for small lasers (1996 年 3 月 28 日受理)

Jiro TEMMYO, Eiichi KURAMOCHI, Mitsuru SUGO, Teruhiko NISHIYA, Richard NÖTZEL, Toshiaki TAMAMURA NTT 光エレクトロニクス研究所 (〒243-01 厚木市森の里若宮 3-1) 現在: Paul-Drude-Institute für Festkörperelektronik, Hausvogteiplatz 5-7, D-10117 Berlin, Germany

向サイズのゆらぎに起因すると考えられる。これは、自己組織化形成法により従来のダメージ等で微細化の際問題となる結晶品質の劣化は克服できるが、依然ナノメートルサイズゆらぎの問題は解決が難しいことを意味している。

2. 歪量子ディスクを活性層とするレーザーの特性は？

InGaAs 歪量子ディスクを活性層とする InGaAs/AlGaAs リッジレーザーを作成した。レーザー縦構造はガイド層を有する SCH 構造である。基板は n^+ -GaAs (3 1 1) B 基板と (1 0 0) 基板をリファレンスとして用いた。InGaAs を成長後 3 分程度の成長中断をおくと、(3 1 1) B 基板では自己組織化を誘起し、(1 0 0) 基板では通常の量子井戸が形成される。今回は面内均一性を考慮し、活性領域の歪量子ディスクは In 濃度は 25%、厚みは 6 nm、サイズは 60 nm 程度で 2 階層構造である。活性層ボリュームは面内で 6% と小さい。リッジは ECR ドライエッチングで形成しリッジ高さが横モード制御し、幅は 2 μm 、キャビティーはへき開で形成し、その長さは 900 μm とした。

図 2 に室温 cw での光出力特性を示す。これより自己組織化歪量子ディスクがデバイスオリティーに達していることがわかる。またリファレンスの量子井戸レーザーと比べると 2 つ差異がみられる。ディスクレーザーの方が、発振閾値が低いことと、光飽和出力レベルが小さい点である。今回の結果は活性層ボリュームを低減したときの極限に近い特性と考えれば、これらは定性的には理解できる。ここで量子効率が悪くなっている点が気になるが、活性領域が散在するようなドット構造特有のキャリア注入の問題点も示唆されているのかもしれない。

閾値は低減されるが、同時に飽和光出力も減少する今回の結果は、低次元系レーザーに予想される典型的な長所短所を垣間見せているように思われる。美しい自然現象を利用する自己組織化形成法はデバイスオリティーの極微細構造ができることを初めて示した点で前進ではあるが、エンジニアリング的にはある種の限界を感じさせる。さらに、自由に構造設計でき結晶品質を維持できる極微細作製法が改めて必要である。

実用上の半導体レーザーの重要な特性パラメーター

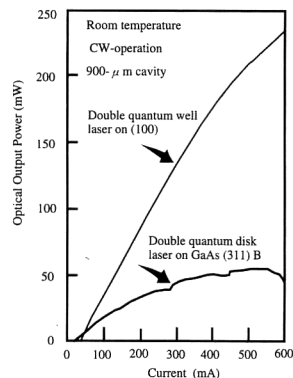


図 2 自己組織化 InGaAs 歪量子ディスクレーザーの室温 cw での光出力特性。発振波長は約 940 nm。

は、閾値、波長、ビーム形状、光最大出力である。最近、低閾値面発光レーザーの出現、ファイバブラッググレーティングによる波長安定化等もあり、半導体光デバイスは集積化から個別デバイス/マイクロセンブリーの時代になりつつある。自然形成法でリニューアルされた極限技術としての今後の低次元量子ドット研究が、当面、単一ドットスペクトロスコーピーを可能にし、また他方で、その技術の幹にあたる二次元歪量子井戸レーザーの研究をもより太くしていくものと期待したい。また、同時に厳密な低次元性、不均一性に依存しないなど新しい構造コンセプトの創出も望まれる。

文 献

- 1) R. Nötzel, J. Temmyo and T. Tamamura: "Self-organized growth of strained InGaAs quantum disks," *Nature*, **369** (1994) 131-133.
- 2) J. Temmyo, R. Nötzel, H. Kamada, T. Furuta and T. Tamamura: "Room temperature photoluminescence emission of strained InGaAs quantum disks self-organized on GaAs (3 1 1) B substrates," *Proc. 22nd Int. Conf. Phys. Semiconductors* (1994) pp. 1851-1854.
- 3) J. Temmyo, E. Kuramochi, M. Sugo, T. Nishiya, R. Nötzel and T. Tamamura: "Strained InGaAs quantum disk laser with nanoscale active region fabricated with self-organization on GaAs (3 1 1) B substrate," *Electron. Lett.*, **31** (1995) 209-211.
- 4) M. Notomi, T. Furuta, H. Kamada, J. Temmyo and T. Tamamura: "Observation of 0D subband structures in single quantum dots by microscopic photoluminescence excitation spectroscopy," *Ext. Abstr. 1995 Int. Conf. Solid State Devices and Materials* (1995) pp. 1089-1090.