

量子ドット300層形成技術の展望

井上 憲人

情報通信研究機構(NICT)は今年5月に、「300層の量子ドットを積層することに成功」したと発表した。NICTの量子ドット技術の研究は10年近い歴史があり、研究の初期から20層、30層積層などの成果が発表されていた。300層スタックの次に何が来るのか。

現在、市販されている通信用の半導体レーザは、電子を1次元に閉じ込める量子井戸構造のものが多い。電子の閉じ込めをすべての方向、つまり3次元(3D)にしたものが量子ドットレーザ。1982年に荒川泰彦、榊裕之の両氏が提案したものだ。

それから四半世紀経過、2006年4月に富士通、三井物産の出資によってQDレーザが誕生し、同社は今年に入って海外のアクセス市場向けに量子ドットレーザを5万個出荷したと言われている。さらに同社は、民生市場向けに量子ドット(QD)技術を採用したグリーンレーザを開発しており、最近は光インターコネクションにも関心を示している。量子ドットレーザ技術は、量産可能なレベルに達し、荒川氏が主張するように、量子井戸レーザに取って代わることもあり得ないと思わせるまでになっている。

一方、NICTで「300層の量子ドット積層」を成功させた先端ICTデバイスグループ主任研究員、赤羽浩一氏は、超高密度半導体量子ドット形成技術のアイデアを学生時代から持ち続けていたと言う。このコンセプトを実験的に検証することで、20層、30層、150層と積層数の世界記録を更新し、現在300層にまで達している。

QDの積層数を増やすのは、ドットの数を増やして光増幅を高める

ことが目的。つまりドットを高密度化することで高利得を実現するのが狙いだ。高密度化は、層あたりのドットの数を増やすか、スタック数を増やして空間的にドットの数を増やすか、このいずれかの方法をとる。市販の量子ドットレーザ、あるいは研究発表などで紹介される量子ドットレーザのスタック数は、5~8層程度が多い。これに比べればNICTのQD技術はスタック数が桁多いと言える。それにとどまらず、赤羽氏は「NICTの方式を以てすればスタックできる層数に限界はない」と主張する。限界なくスタック数を増やすことができる技術が「歪補償技術」だ。赤羽氏は、この技術について、「歪逆をかけているだけだ」とコメントしている。

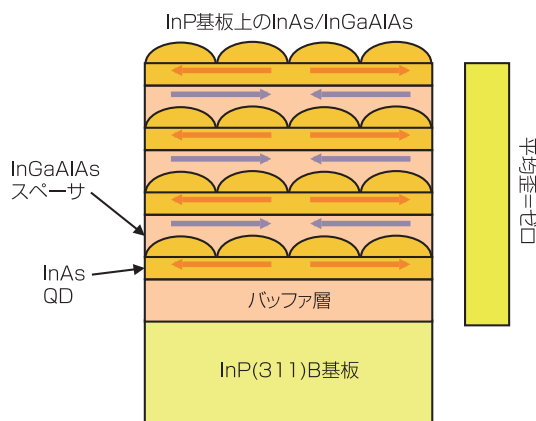


図1 QDのスタック構造。基板材料にはInP(311)が用いられている。100 μm のバッファ層の上にInAs QDとInGaAlAsスペーサを成長。歪補償技術を採用することで、平均歪をゼロにすることができ、ドットの形状、直径、サイズ、密度がほぼ一定になる。

従来技術の問題点

現在、QDレーザや独イノルム社(Innolume)などが販売している半導体量子ドットレーザは1.3 μm 帯のレーザ。NICTが開発している量子ドットレーザは1.5 μm 帯のレーザ。いずれも通信波長帯のレーザだが、大量に敷設されている標準シングルモードファイバ(SSMF)で伝送することを前提にすると1.3 μm 帯のレーザが伝送路に適しており、光ファイバ増幅器(EDFA)を使用して長距離伝送することを前提にすると1.5 μm 帯のレーザが伝送路に適している。

QDの形成という視点で考えると別の問題が顕在化してくる。量子ドットは、基板にバッファ層を積み、次いでドットの層とスペーサ(中間層)をスタックしていく(図1)。1.3 μm 帯のレーザの基板材料はヒ化ガリウム(GaAs)だが、1.5 μm 帯のレーザの基板はリン化インジウム(InP)になる。赤羽氏は、「InP(311)基板の方が造りやすい」と言うが、その意味するところは「歪補償しやす」と言うことに他ならない。

NICTの他にInP基板を採用している半導体QDとしては、富士通、QDレーザなどが学会発表している量子ドット半導体光増幅器(QD-SOA)がある。ECOC 2008の報告では、従来の方法で成長したQD-SOAの問題点として、TE偏光とTM偏光のうち、光利得が得られるのはTE偏光のみであることが指摘されていた。その理由をストランスキ・クラスタノフ(Stranski-Krastanov:S-K)モードによるドット

待望の フェムト秒 レーザー登場!

- ターンキーシステム
- メンテナンスフリー
- TELECOMグレードの信頼性
- 高出力、高エネルギー
- 小型、軽量
- 低価格



高エネルギータイプ



課題であったHigh Power、High Energyファイバーレーザーの短パルス化(<100fsec)に取り組み、ついにパルスシェイピング、スペクトラムシェイピング技術(特許取得済み)に画期的な改良がなされ製品化されました。

AUTEX オーテックス株式会社
URL <http://www.autex-inc.co.jp>
E-mail Sales11@autex-inc.co.jp

東京本社 〒162-0067
東京都新宿区富久町16-5 新宿高砂ビル
TEL. 03(3226)6321 FAX. 03(3226)6290
大阪支社 〒530-0004 大阪市北区堂島浜2-1-29
TEL. 06(6344)6328 FAX. 06(6344)6342

ト形成に帰着させ、これを解決するためにドットの高さを柔軟に設計できるコラムナQD(CQD)-SOAを提案。結果として得られた成果は、偏光依存利得(PDG)が0.4dBというものだった⁽¹⁾。次なる課題は、利得を増やすこと、利得とPDGのチルトを減らすこととされていたが、最近の研究成果ではそれより先に高温動作のCQD-SOAが紹介されている⁽²⁾。

ここで紹介されているS-Kモードとは、結晶表面に薄膜をエピタキシャル成長する方法の一つで、QD 3Dアイランドを形成する方法として採用されている。赤羽氏によると、S-Kモードを利用して自己組織化によって半導体QDを成長するアプローチには、二つの問題がある。一つは、ドットの形状とサイズが安定しないこと、もう一つはQDが低密度で活性層の利得に限界があることだ⁽³⁾。

これらの問題は、アプリケーションの柔軟性にこだわらなければ、その後の技術開発である程度解決されているとも言える。すでに量子ドットレーザーは量産で市販される段階にきているからだ。しかし、ドット密度の向上を、垂直的に層をスタックすることで解決しようとするに限界に直面する。この点についての赤羽氏の説明は以下のようになっている。

「スタック構造では、層が増えるに従い、徐々にIn(Ga)As/GaAs QDの平均サイズが大きくなるのが観察されている。これは、中間層のQDが誘引する歪が積み上がっていくためだ。GaAsが中間層として用いられると、In(Ga)As QDによって生まれる歪は、中間層の生成後、完全に補償されない、理由はGaAs中間層の格子定数が基板と同じだからだ。この残留歪は、次のスタック層のQDの形成に影響を与える」(ibid)。

歪が生じないようなアプローチが得られればよいが、「自己組織化QDではそれは困難」だという。その理由は、「S-K成長モードでは、3Dアイランド形成の原動力となっているのが歪だからだ」と赤羽氏は指摘する。

これは、基板材料にGaAsを使用した1.3 μ m帯の量子ドットレーザーの問題だが、NICTは基板材料にInP(311)を使用した1.55 μ m帯の量子ドットレーザーを開発している。

歪補償技術

NICTは、歪補償スキームを用いてInP(311)基板上にインジウムヒ素(InAs)QDをスタックする方法を開発した。この歪補償技術は、赤羽氏がNICTで研究をスタートした当時の論文にすでに登場しており、それ以来NICTは10年近い歳月をかけて、このコンセプトの実証と最適化を行ってきた。この技術そのものは、赤羽氏によると1991年から知られている。

量子ドットレーザーの構造は、InP(311)基板上にバッファ層を設け、その上にInAs QDと、それを埋め込むヒ化アルミニウムガリウムインジウム(InGaAlAs)スペーサ(中間層)を成長させる構造になっている。従来の量子ドットレーザーでは、この中間層は格子定数が基板の格子定数と同じであるために歪補償にはなっていない。赤羽氏の言う「逆歪」にはなっていない。NICTのスキームでは、「InAs(QD)とInGaAlAsに由来する格子歪の集積がキャンセルされ、InP基板と効果的に格子整合がとれる」ように設計される。この点について赤羽氏は次のように説明している。

「InPの格子定数は、GaAsとInAsそれぞれの格子定数の間にある。つまり、InGaAlAsの格子定数は組成を制御することで、InPの格子定数付近で連続

的に変えられるということだ。よって、InGaAlAs層でInAs QDをキャッピングすることで必要な歪補償を実現できる、つまりInGaAlAs層の格子定数は、InP層の格子定数よりもわずかに小さくできる。」⁽⁴⁾

この歪補償スキームは、理論的には早期に確立していたと見られ、赤羽氏の主張している基本コンセプトは今日に至るまで、どの論文でもほとんど変わることなく反復されている。この10年ほどで変化が見られるのは、スペーサ

層の厚さと組成、InAs QD MLの数字、成長温度、成長速度など。特に、スペーサの最適化は重要とみられ、組成の違いによるQDの表面形状、サイズの変動などが検討されている。これらの基本的な検討は2002年、2003年ごろに終わっていると考えられるが、その後もスペーサの厚さを変えるなどして、最適化を追究してきたということだろう。この点について赤羽氏は、「わずかに残る歪をなくすために、補償の精度の検討を行っている」とだけコメン

トしている。

補償の精度の検討が今後も続くかどうかは不明だが、現在得られている成果は、300層のQD積層、トータルのQD密度にすると、 $1.9 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ 。これは従来技術による他機関の成果 ($5.9 \times 10^{10}/\text{cm}^2$) と比較すると300倍の高密度になる(図2)。QDの品質劣化なしにQD層をスタックする技術を確立したことからNICTは、「この方法を用いてスタックできるQD層の数に限界はないと考えている。したがって、QD層数はどんなアプリケーションにでも最適化できる」⁽⁵⁾として、多様なアプリケーションが狙える技術である点を強調している。

アプリケーションの展開

NICTは今年5月、歪補償技術を用いた30層の半導体量子ドットレーザを試作し、 $1.55 \mu\text{m}$ 帯でのレーザ発振に成功したと発表している。

アプリケーションへの展開は、このレーザ発振以外にほとんど見られないが、上に見た成果からして多様なアプリケーションに展開できるポテンシャルは大きいと見てよさそうだ。300層スタックは世界記録だが、これ以前の150層、60層など、各段階でチップの評価結果がコメントされている(図3)。ほぼ共通して語られていることは、何十層にスタックしてもドットの合体がみられないこと、QDの高さ、直径、シート密度がほぼ一定であること、スタッキング層の増加にともなってフォトルミネッセンス(PL)強度が増加していること、QD層の数の増加はPLの位置、線幅に影響を与えないことなどだ。赤羽氏は、「再現性よく造れる」と主張している。

キャビティ長は、これまで1mm程度のデザインとなっているが、赤羽氏は

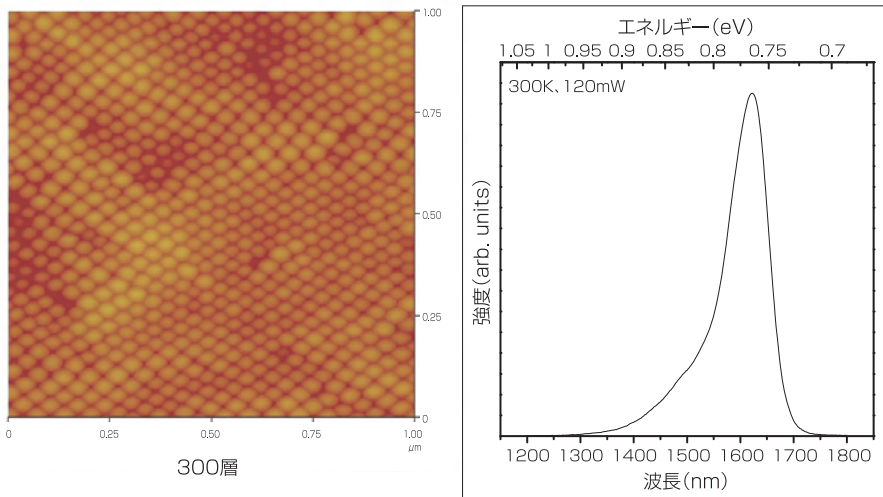


図2 InAs QDを300層スタック。これは世界記録。トータル密度は、 $1.9 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ 。右はPL強度を示している。

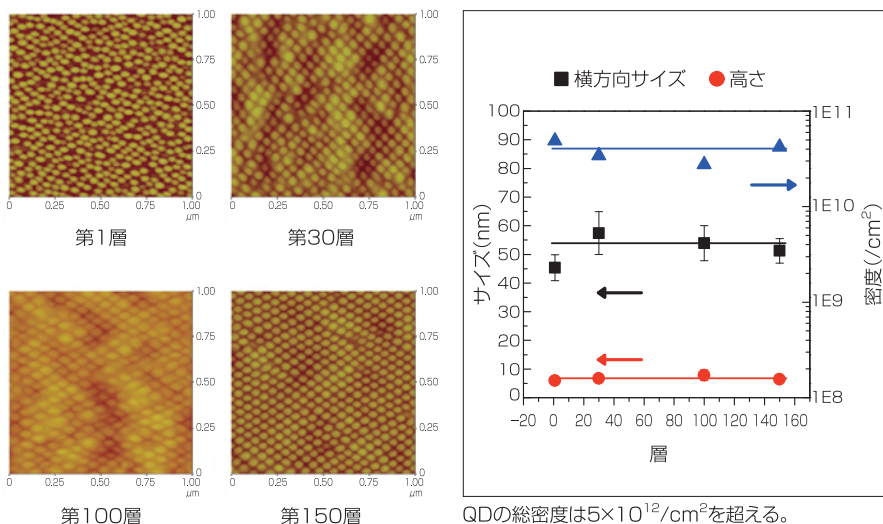


図3 スタック層数によるQDサイズ、密度。これらがほぼ一定であることが示されている。

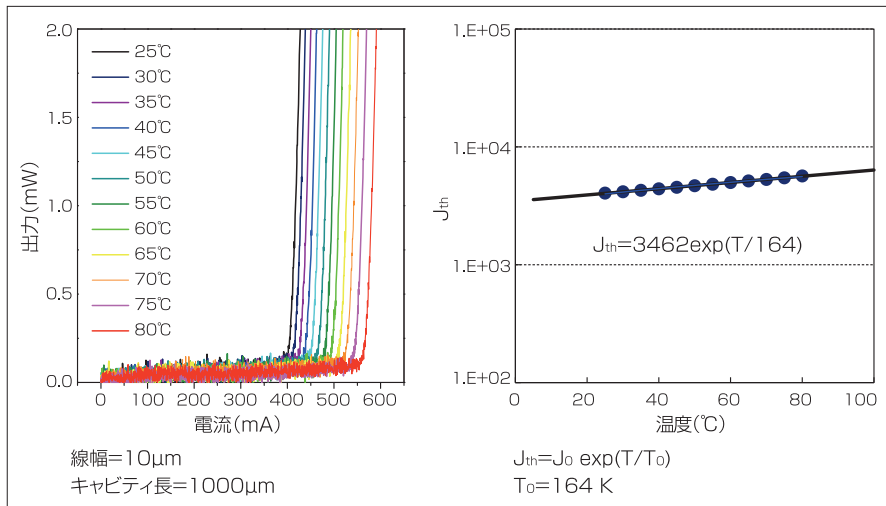


図4 電流-出力特性の温度依存性。今回は、特性温度(T_0)が164の1.55μm帯半導体レーザを実現。キャビティ長は1mm。

300μmとしてモードロックレーザを設計することも可能と見ている。これ以外に、NICTのQDではブロードな特性が得られるため200nm(1450~1650nm)をカバーするSOAも可能性がある。この他、同氏が挙げている応用としては、光コヒーレンストモグラフィ(OCT)用光源、超高効率太陽電池、量子コンピューティングへの展開がある。

通信用途では、DFB化して温調不要、高温動作の1.55μm帯のレーザモジュールも射程に入る(図4)。赤羽氏によると、試作したチップの直接変調は試していないということだったが、短キャビティにできると言うことであれば、10G、40G動作の可能性もある。現在、市場では大きなサイズのCFPパッケージで40G、100Gのモジュールを実現している。パッケージが大きくなければならない理由の一つが消費電力だ。このような分野に温調不要の量子ドットレーザ技術が入ってくれば、消費電力も

パッケージサイズも大幅に縮小して、システムベンダを喜ばせることができるようになるだろう。ただし、ここは1.3μm帯のレーザの分野のため、NICTの量子ドットレーザのターゲットは、さらに距離の長い市場か、外部変調器と組合せたラインサイドのモジュールということになりそうだ。NICTが、試作したレーザの直接変調を試していない理由の一斑はここにあるのかも知れない。

1.55μm帯レーザの国内生産額は、光協会の2010年度予測によると、前年度比26.2%増となっている。この予測の中には量子ドットレーザは含まれていないが、最近の低消費電力、小型化という市場の圧力に後押しされて、数年先の「見込額」「予測額」に1.55μm帯量子ドットレーザが含まれる可能性もありえないことではないと言えそうだ。1.3μm帯の量子ドットレーザに続いて、1.55μm帯でも量子ドットレーザ量産の時代が見えつつある。

参考文献

- (1) N. Yasuoka et al, Th.1.C.1, ECOC2008
- (2) S. Sekiguchi et al., OThK4, OFC/NFOEC2010
- (3) Kouichi Akahane et al., Journal of Crystal Growth 256(2003) 7-11
- (4) Kouichi Ahahane et al., Applied Physics Letters 93, 041121(2008)
- (5) Kouichi Akahane et al., IEEE Photonics Technology Letters, Vol.22 No.2 January 15, 2010

disco vernew SCMOS

**pco.edge - 革新的な
sCMOSイメージセンサ
を搭載した
初のカメラシステム**

Bringing to light! すべてを明らかに。
新型カメラシステムpco.edgeは、高解像度、極めて低い読み出しノイズ、そして優れたダイナミクスの象徴。微弱光での高フレームレートでも優れた画像品質を可能にします。高性能アプリケーションでの新たな可能性をみつけてください。詳しい情報は下記ウェブサイトへ：
www.pco.de/scmoscameras/pcoedge/

- 高解像度
5.5 megapixel
- 読み出しノイズ
< 1.4 electrons
- ダイナミックレンジ
> 22000:1
- 最大フレームレート
100 frames/s

in America:
www.cookecorp.com

pco.
imaging