

## 3-5 アンチモン系半導体量子ドットレーザの研究

### 3-5 Research on Sb-based Quantum Dot Laser

赤羽浩一 山本直克 大谷直毅

AKAHANE Kouichi, YAMAMOTO Naokatsu, and OHTANI Naoki

#### 要旨

GaAs基板上に光通信波長帯にて動作する半導体レーザの開発を目的として、アンチモン(Sb)を用いる量子ドットレーザの研究開発を行っている。ここではInAs量子ドットの歪み緩和層にGaAsSbを用いる試みと、InGaSb量子ドットを活性層に導入する試みを紹介する。試作したレーザダイオードは波長1.3ミクロンで室温連続発振に成功した。

We have developed Sb-based quantum dot lasers operating at 1.3  $\mu\text{m}$  fabricated on GaAs substrates. We introduce here two different methods; one is to use GaAsSb layers for reducing the stress effect on InAs quantum dots, the other is to make InGaSb quantum dots in the laser's active region. The fabricated laser diodes are successfully operating for a wavelength of 1.3  $\mu\text{m}$  at room temperature.

#### [キーワード]

量子ドット, 半導体レーザ, アンチモン  
Quantum dot, Semiconductor laser, Antimony

## 1 まえがき

半導体量子ドットレーザは、低しきい値電流、温度依存性等において従来の量子井戸レーザを凌駕することが理論予測されており、したがってユビキタス社会の通信ネットワークを構成するキーデバイスとして期待されている[1]。現在のところ、しきい値電流密度では半導体量子ドットレーザがチャンピオンデータを出している。しかしながら、量子ドット作製技術はまだ問題点があり、現状では理論で予測されている性能に達しておらず、実用的な製品としては量子井戸レーザが主流である。その問題点とは量子ドットの大きさをそろえることができない、量子ドットの密度が低くデバイス動作に寄与する体積が小さい、等である。また、光通信波長帯(1.3~1.55  $\mu\text{m}$ )で動作するレーザはInP基板上に作製されるが、近未来のユビキタス社会に普及するためには、より安価なGaAs基板あるいはSi基板上に作製されることが望ましい。

かかる現状から、光エレクトロニクスグルー

プでは、GaAs基板上に光通信波長帯レーザを作製することを目標として量子ドットレーザの研究を行ってきた[2][3]。特に他ではあまり使われていないアンチモン(Sb)を量子ドット成長に取り入れている。主な試みは、(1)InAs量子ドットの歪み緩和層にGaAsSbを使う、(2)InGaSbで量子ドットを作製する、の二つである。最近になり、二つの試みが共に室温において1.3  $\mu\text{m}$ 付近でレーザ発振に成功したので報告する。

## 2 GaAsSb歪緩和層によるInAs量子ドット長波長レーザ<sup>[2]</sup>

量子ドットにはInAsがよく用いられる。InP基板上のInAs量子ドットは1.5  $\mu\text{m}$ での発光は容易である。しかし、GaAs基板上ではInAs量子ドットの格子に圧縮歪みがかかるため、InAsのバンド構造が変調される。したがってGaAsをキャップ層とした場合、発光波長は約1  $\mu\text{m}$ となる。InAs量子ドットの格子歪みを緩和して動作波長の長波長化を実現するために、GaNAsなどの窒

化物をキャップ層に使用する試みがあるが [4] [5]、まだレーザー発振には至っていない。本研究では、GaAsSbをキャップ層とする歪み緩和を試みている。

## 2.1 素子構造

結晶成長は分子線エピタキシー装置 (Molecular beam epitaxy, MBE) を用いて行っている。GaAs (001) 基板を 610℃ に加熱洗浄し、そのあと 580℃ で GaAs バッファ層を成長レート 1ML/s (ML は 1 分子層に対応する厚さ) で 300nm 積層する。そして 500℃ において、厚さ 1.7ML の InAs を成長することにより InAs 量子ドットを形成する (成長レート 0.1ML/s)。この際、量子ドットは自己組織的に形成される。結晶格子の違いによる歪エネルギーなど、結晶成長に寄与するエネルギーを最小にする方向に結晶成長が進むためである。この方法は真空一貫のプロセスで構造を形成できるため、汚染の少ない高品質の量子ドット形成が可能である。その後量子ドットの上に GaAsSb 層を積層して、さらにその上に GaAs キャップ層を形成する。量子ドットの外観は量子ドットを埋め込む前の段階で成長を止め、原子間力顕微鏡 (AFM) によって観察した。図 1 に量子ドットの AFM 像を示す。この試料においては、平均直径 36nm、平均高さ 4nm、密度  $3.5 \times 10^{10}/\text{cm}^2$  の量子ドットが形成されている。

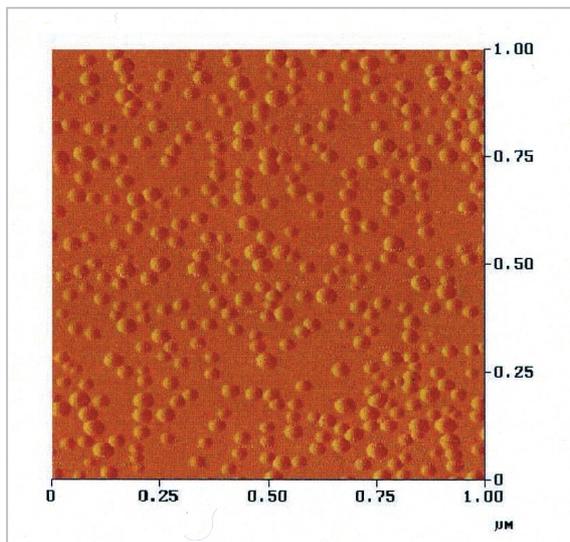


図 1 AFM 観察による InAs 量子ドット

まず、GaAsSb 歪緩和層における Sb 量の発光波長への影響を調べるため、 $\text{GaAs}_{1-y}\text{Sb}_y$  歪緩和層の Sb 比  $y$  を 0.140, 0.433, 0.601 の 3 種類のものを作製し、ホトルミネッセンス (PL) を観測した。この際、歪緩和層の膜厚は 8nm、GaAs キャップ層の膜厚は 12nm とした。また、InAs 量子ドットの作製条件は三つのサンプルで全く同じである。各サンプルを 12K に冷却し、測定した結果を図 2 に示す。測定結果から、明らかに発光波長は Sb 比  $y$  の増加とともに長波長側にシフトしている。GaAs ではなく GaAsSb で InAs 量子ドットを埋め込んだ場合、GaAsSb の格子定数が Sb 比の増加とともに InAs 量子ドットの格子定数に近づくので、量子ドットに加わる圧縮歪みが緩和される。これにより InAs 量子ドットは圧縮歪の効果から開放され、発光波長が長波長化するのである。PL ピーク波長シフト量と Sb 比の関係を分かりやすく図 3 に示す。

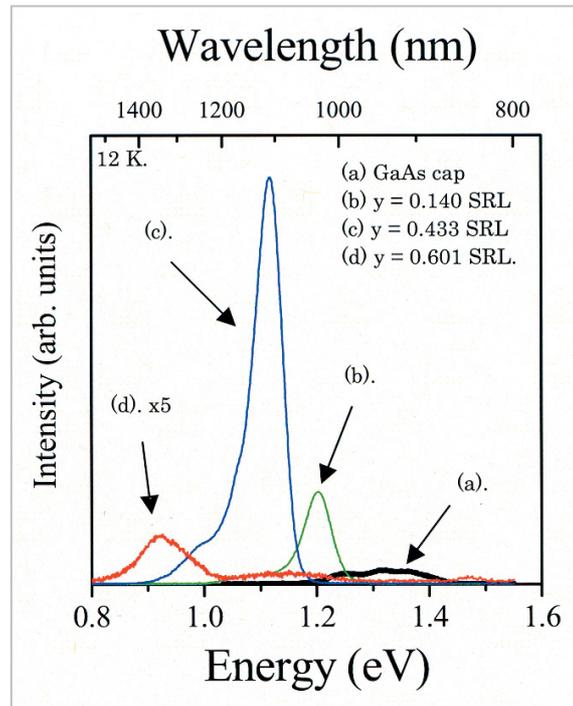


図 2 PL 測定結果

## 2.2 レーザダイオードの作製と評価

次に、簡単なストライプ電極を持つレーザーダイオードを試作し動作確認を行った。素子は、2ML の InAs 量子ドットを 3 層積層し、歪緩和層に  $\text{GaAs}_{0.567}\text{Sb}_{0.433}$  を用いている。その上下を p 型及び n 型の  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$  クラッド層で挟んで光の閉

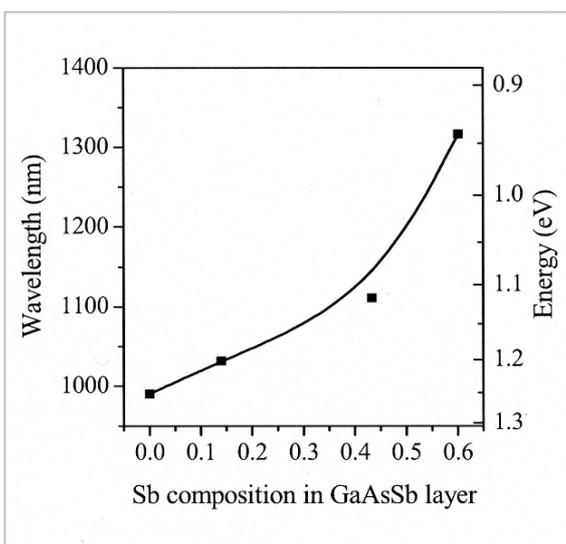


図3 PLピーク波長シフト量とSb比の関係

込め構造としている。結晶成長後の試料はプラズマCVDでのSiO<sub>2</sub>形成、エッチング、フォトリソグラフィによるライン状の電極形成などを経て、長さ800 μmのキャビティに加工される。電極の幅は5 μmであり、真空蒸着により形成している。図4にレーザ構造の概略図を示す。

レーザダイオードにパルス電圧を印加したときの発光スペクトルを図5に示す。素子は15℃である。注入電流が480mAになると鋭いピークが現れてレーザ発振が確認された。このときの、しきい値電流密度は約11.3kA/cm<sup>2</sup>である。

GaAsSb歪緩和層を用いた場合、InGaAs層と

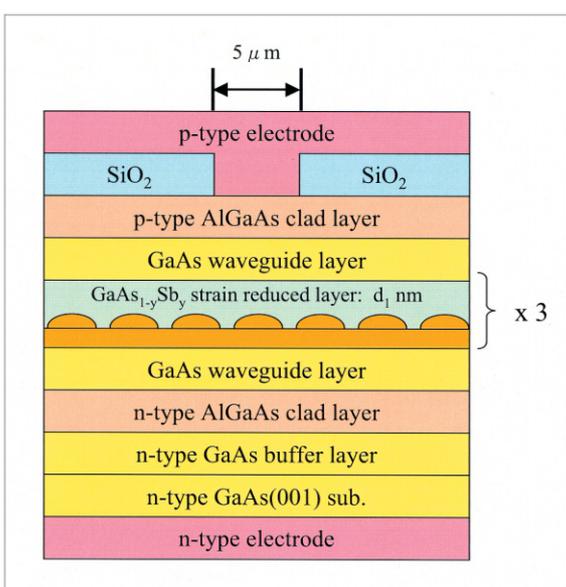


図4 レーザ構造の概略図

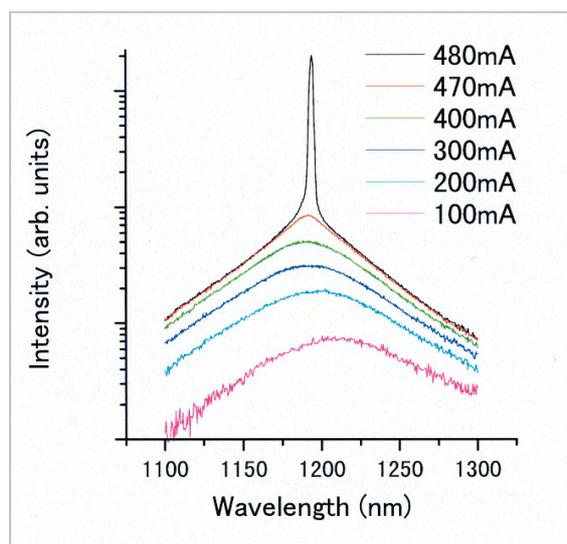


図5 パルス電圧印加時の発光スペクトル

比較してPLの発光効率がとても良い。InAsとGaAsSbとのヘテロ接合を考えると、熱的励起されたキャリアの閉込め効率がとても良いことが明らかとなっており[6]、したがって、今回の成果のように室温でのレーザ発振が達成されたと考えている。

### 3 InGaSb量子ドットによる長波長レーザ<sup>[3]</sup>

アンチモン系化合物半導体の結晶成長技術の応用として、GaAsSb歪み緩和層によるInAs量子ドットレーザの作製とともに、InGaSb量子ドットの作製とそのレーザ応用の研究を行ってきた。

#### 3.1 アンチサーファクタント効果によるInGaSb量子ドットの高密度化

量子ドットをレーザや光増幅器などに応用する場合、デバイスとして動作する体積、すなわち量子ドットの密度を増やすことが求められる。アンチモン系量子ドットは密度が低いことが知られており、そのためデバイス応用が困難と考えられてきた。しかし我々の研究により、シリコン原子照射によるアンチサーファクタント効果によって、その密度を飛躍的に高めることができることを発見した[7]。

図6はGaAs基板上に成長したInGaSb量子ドットのAFM像である。共に2MLのInGaSb量子

ドットを0.1ML/sのレートで成長したものであるが、図(b)はInGaSb量子ドットの成長前に基板にシリコン原子を照射したものである。照射したシリコン原子密度は極めて少なく $10^{11}/\text{cm}^2$ 程度である。シリコン原子照射のない図(a)と比較するとInGaSb量子ドットの密度の差は明らかで、約100倍の高密度化を達成できた。シリコン原子照射時には量子ドットの面密度は約 $4.4 \times 10^9/\text{cm}^2$ である。シリコン原子照射によるアンチサーファクタント効果がInGaSb量子ドットの高密度化に有効であることが確認された。

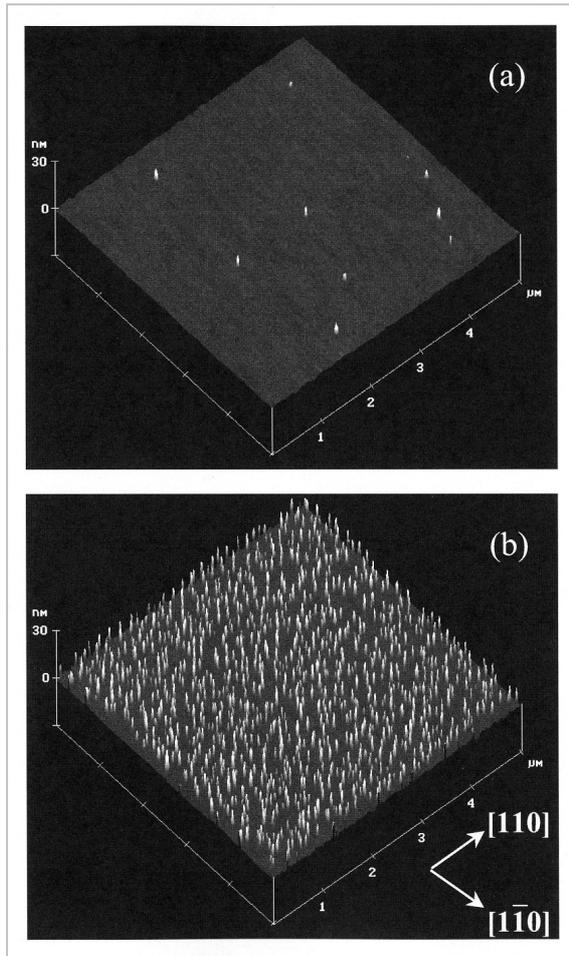


図6 InGaSb量子ドットのAFM像(a)シリコン照射なし、(b)シリコン照射あり

### 3.2 レーザダイオードの作製と評価

作製したレーザダイオードの断面図を図7に示す。サーマルクリーニングを行ったn型GaAs(001)基板にSiドープのn型GaAsバッファ層、n型AlGaAsクラッド層を540℃にて成長する。量子ドット層の成長では、基板温度を400℃とし、

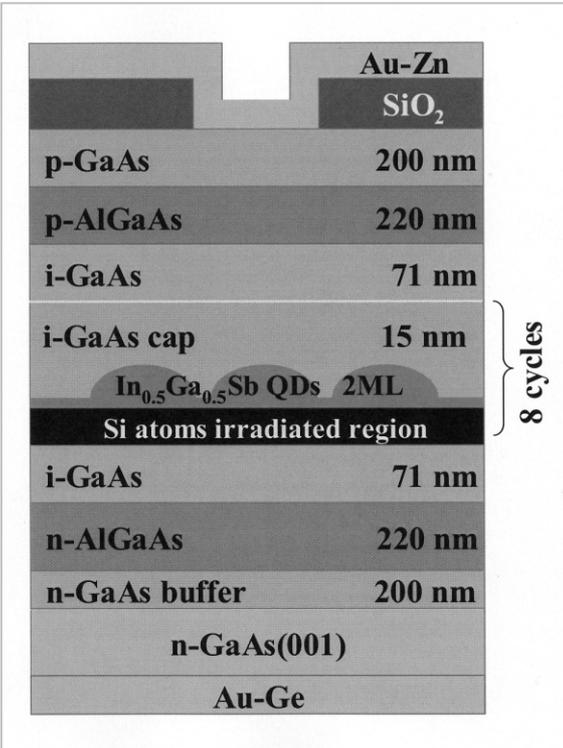


図7 レーザ構造の断面図

GaAs表面にSbフラックスを当てながらシリコン原子照射を行い、2 MLの $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{Sb}$ 量子ドットを形成し、さらにその量子ドットを20nmのGaAs層(成長レート0.43ML/s)でカバーする。量子ドットレーザの活性層とするために量子ドット層を8層積層し、GaAsに埋め込まれたInGaSb量子ドット構造を作製する。また、積層量子ドット層の上下にはGaAsのガイド層を導入する。活性層成長後、基板温度を540℃に戻して、Beドープのp型のAlGaAsクラッド層、GaAsキャップ層を積層する。その上に層間絶縁膜としてプラズマCVD装置によるシリコン酸化膜を堆積する。シリコン酸化膜の一部をエッチングして幅5 $\mu\text{m}$ 、キャビティ長900 $\mu\text{m}$ のAuZn電極を形成している。図8は作製したレーザダイオードの電極部分を走査型電子顕微鏡(SEM)で撮影したものであり、ストライプ型の電極構造が形成され、また基板内部にAlGaAsをクラッド層とするスラブ導波路構造が作製されていることが確認できる。

電流注入時の発光スペクトルを図9に示す。素子は10℃とし、直流電圧を印加している。図から電流値970mAにおいて鋭いピークが立つことからレーザ発振が確認された。発振波長は1.37 $\mu\text{m}$

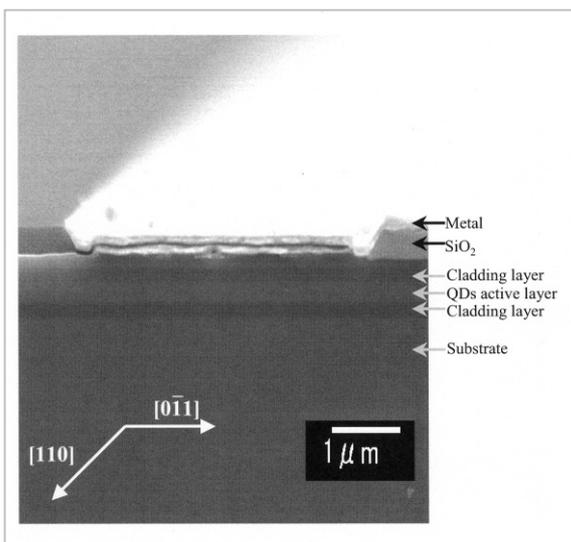


図8 レーザダイオードのSEM画像

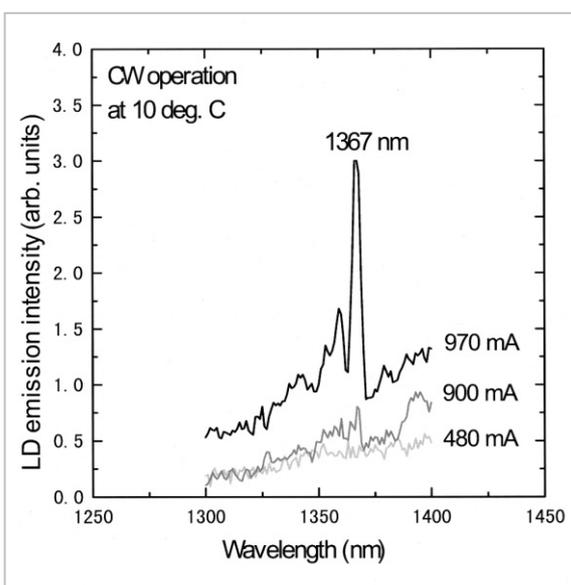


図9 InGaSb量子ドットレーザーの発振スペクトル

mと量子ドットレーザーとしては極めて長波長である。アンチサーファクタント効果による高密度InGaSb量子ドットがレーザー应用到に有効であることが明らかとなった。

## 4 むすび

GaAs基板上に光通信波長帯で動作する量子ドットレーザーの開発を目的として、従来あまり使われていないアンチモンを活用した2種類のレーザー構造を提案した。その新提案とは、InAs量子ドットの歪み緩和層にアンチモンの化合物であるGaAsSbを用いる方法及びアンチモン化合物InGaSbで量子ドットを作製する方法であるが、両方とも室温において波長1.3 μm付近のレーザー発振に成功した。本研究で作製したレーザーダイオードは簡単なストライプ電極を取り付けたものであるから、それが室温発振を示したことは結晶性や発光効率の良さを証明していると考えている。1.3 μm帯レーザーに関しては、今後は導波路型などにして構造の最適化を行うことにより発振特性を改良していきたい。次の大きな目標は、量子ドットを更に改良してGaAs基板上に波長1.55 μm帯のレーザーを実現することである。近年、量子ドットは半導体光増幅器の応用に適しているという報告例があるので[8]、新しい応用として検討したい。

このほかに、光エレクトロニクスグループでは、量子ドットの密度向上の研究を行っており、InP基板上に100層を超えるInAs量子ドットの積層に成功し[9]、その発光波長約1.5 μmを得ている。今後は、レーザーや光増幅器等の応用によって利得や発光効率での超高密度量子ドットの優位性を証明したい。

アンチモンという新しい材料によってレーザーが実現できたことは、産業応用上の観点から、Ⅲ-V族化合物半導体が更に魅力的な材料体系になった。ナノ構造の成長・プロセス技術など課題も多いが、新しい応用分野が今後現れる可能性を示す研究成果だと考えている。

## 参考文献

- 1 荒川泰彦, “フォトリソ結晶と量子ドット”, 合同成果報告シンポジウム予稿集, pp.3-7, 2003.
- 2 K. Akahane et al., Proc. of QDPC2003, p. 50, 2003.
- 3 N. Yamamoto et al., Proc. of QDPC2003, p. 48, 2003.
- 4 T. Kita et al., Appl. Phys. Lett., Vol. 83, pp. 4152-4153, 2003.
- 5 XQ. Zhang et al., Appl. Phys. Lett., Vol. 83, pp. 4524-4526, 2003.
- 6 K. Akahane et. al., Physica E, in press.

- 7 N. Yamamoto et al., Physica E, in press.
- 8 秋山知之ほか, 2003年秋季第64回応用物理学会学術講演会, 1a-YK-1~3, 2003.
- 9 赤羽浩一ほか, 2003年秋季第64回応用物理学会学術講演会, 1a-ZF-2, 2003, Submitted to Int. Conf. of Indium Phosphide and Related Materials (IPRM'04).



あかはね こういち  
**赤羽浩一**  
基礎先端部門光エレクトロニクスグループ  
研究員 博士(工学)  
半導体デバイス、半導体結晶成長



やまもと なおかず  
**山本直克**  
基礎先端部門光エレクトロニクスグループ  
専攻研究員 博士(工学)  
半導体デバイス、光電子材料

おおたに なおき  
**大谷直毅**  
基礎先端部門光エレクトロニクスグループ  
リーダー 博士(工学)  
半導体光デバイス、光物性