

ICTイノベーションフォーラム2012

開催日：平成24年10月2日

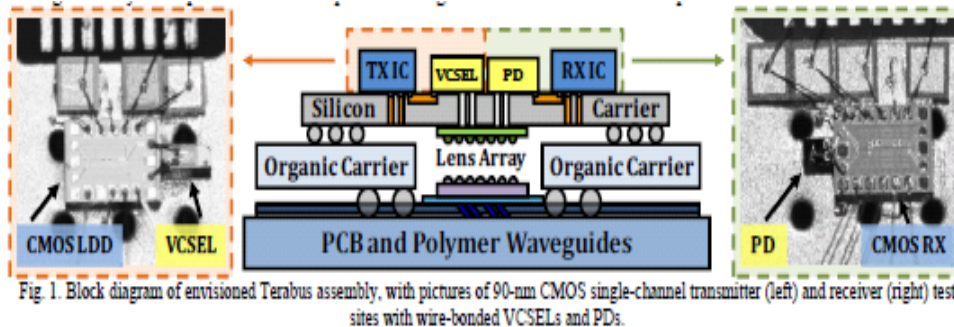
会場：幕張メッセ 国際会議場

高品質量子ドットを用いた 低消費電力面発光レーザの研究開発 (092103008)

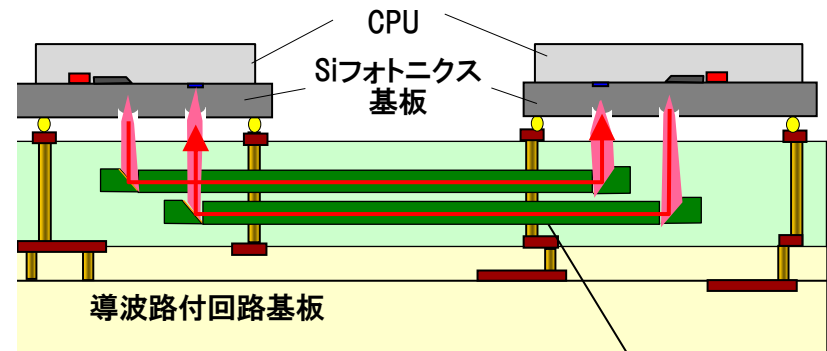
天野建

産業技術総合研究所

サーバー内(ボード上)光通信の背景



光I/O-PKG (IBM, OFC2011)



外部I/O-CPU間光配線

ポリマー光導波路回路基板 (PETRA)

サーバー用ボード内の信号伝送 : 2018年～
I/O密度・ピン数制限、電気ノイズ、電力制限 ⇒ 容量限界

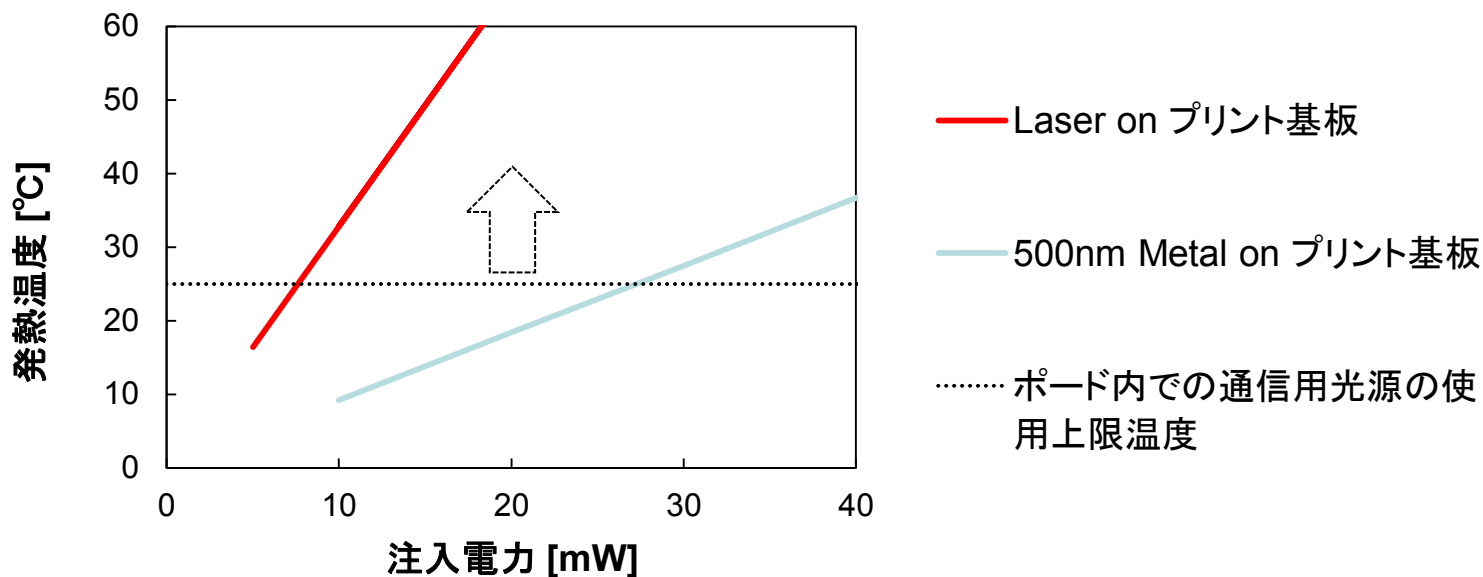


電気配線 ⇒ 電気配線 + 光配線 (光電子融合プリント基板)

インターコネクション用光源への要求

- ・高速&低消費電力な信号伝送
- ・高温動作特性

ボード内で使用可能な光源の動作条件



通信用光源の動作温度上限: 85°C、サーバー筐体内の通常温度: 60°C



プリント基板上光源の許容温度上限値 (25°C)

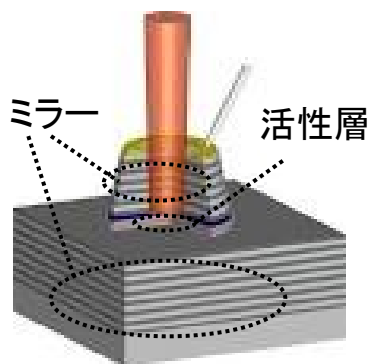
	発熱上限値	レーザ出力 (WPE: 20%)
基板上直接集積	8mW	2mW
放熱用金属薄膜使用構造	28mW	7mW

高温動作可能または高効率な光源が必須

インターコネクション用面発光レーザーの背景

面発光レーザー：半導体基板と垂直に出射する構造

垂直共振型面発光レーザー



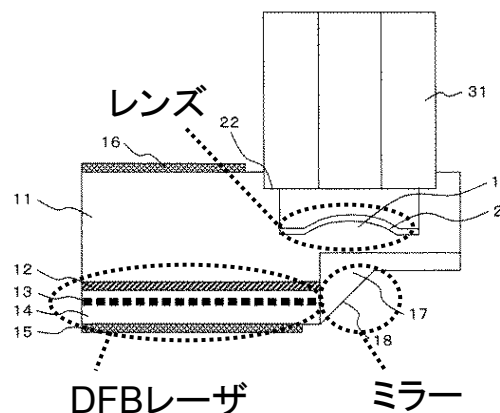
特徴

- ・低消費電力
- ・単一縦モード
- ・2次元アレー
- ・作製が簡便

課題

- ・波長: 850nm
- ・速度: 10G

レンズ集積面出射レーザー(日立)



特徴

- ・通信波長帯
- ・高速: 25G
- ・レンズ集積
- ・単一モード

課題

- ・作製が困難
- ・温度特性

研究課題:

1. 高性能な通信波長1.3 μ m帯の量子ドット活性層の実現
2. 量子ドットを用いた各種レーザー構造の実現

本研究の目的

高性能な低消費電力量子ドット面発光レーザの実現

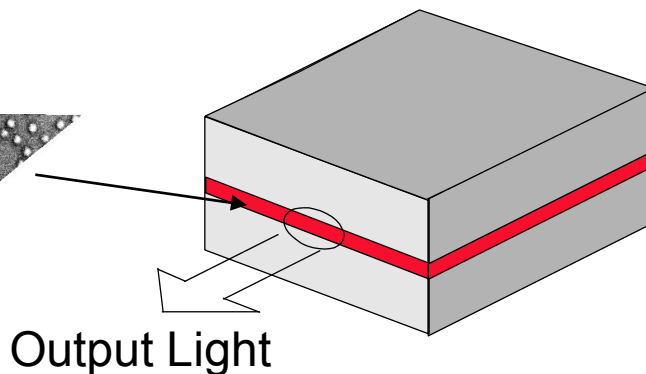
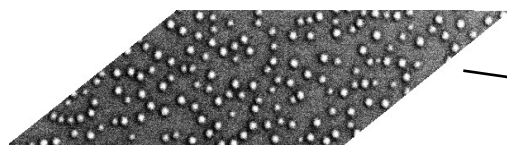
発表内容

1. 高品質な量子ドット活性層の実現
2. 垂直共振型量子ドット面発光レーザ
3. 集積型量子ドット面出射レーザ
4. まとめ

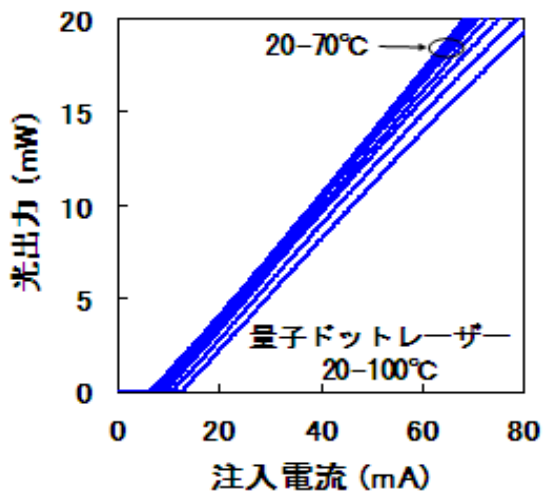
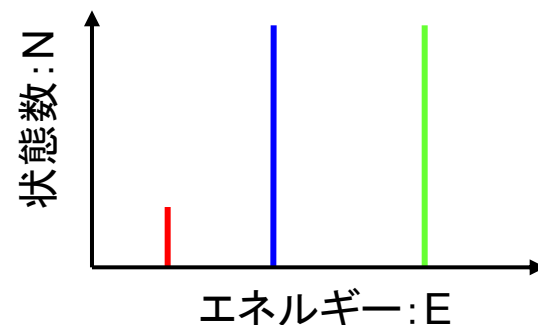
1. 高品質な量子ドット活性層の実現

量子ドット活性層を用いたレーザ

量子ドット活性層



量子ドットの電子状態



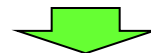
温度無依存動作特性
(QDレーザ社)

量子ドットレーザの特徴（省エネと高性能化が両立）

- ・ エネルギー準位が離散化
- ・ 安価なGaAs基板上で通信波長帯が実現可能

利点：1. 低消費電力、2. 高効率、3. 温調フリーで安価

欠点：量子ドット1個で2つの電子のみ（利得が小さい）

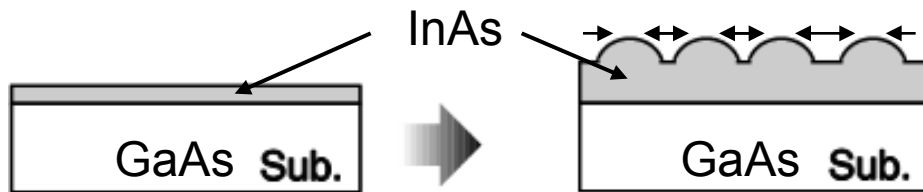


量子ドットの高密度化、高均一化が必須！

自己形成量子ドット高密度化の問題点

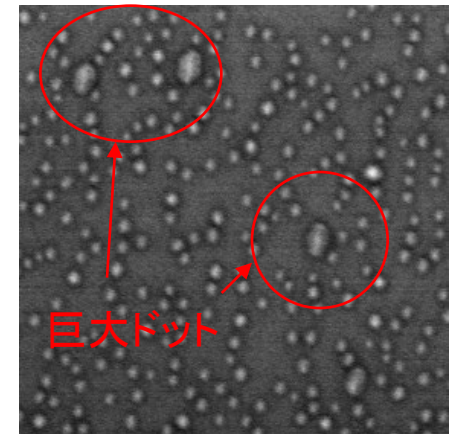
自己形成量子ドットの作製法

GaAsとの大きな格子差を利用



In + As を供給

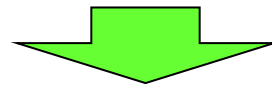
歪みにより3D化



高密度量子ドットの問題点

高性能量子ドットレーザを実現する量子ドット

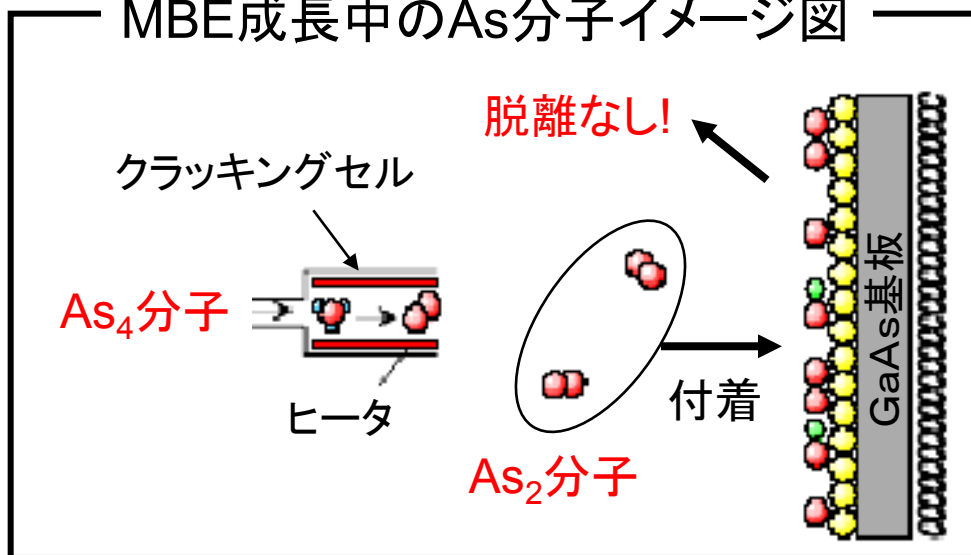
1. 通信波長帯である $1.3 \mu\text{m}$ での高密度化（面密度，多層化）
2. 量子ドットの高品質化（巨大ドットの発生低減，均一化，良質化）



As₂分子線および組成傾斜歪み緩和層の導入により解決

As₂分子線による量子ドットの高密度化

MBE成長中のAs分子イメージ図



低濃度化を実現するAs₂分子線

As₄分子：付着係数 ≤ 0.5

As₂分子：付着係数 ≤ 1

高付着係数から低濃度化が可能！

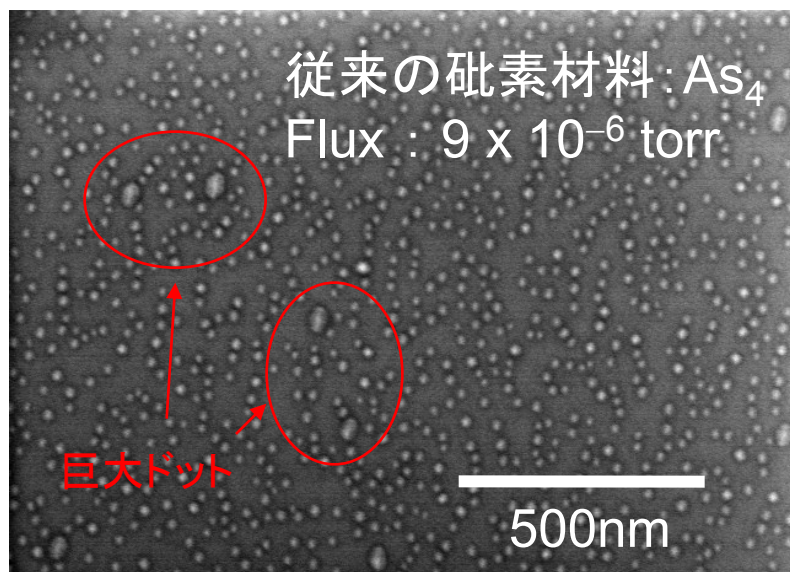
高密度高均一化を実現するため、原料濃度 (In+As) に注目

高密度化・・・原料濃度 $\uparrow$ $\longleftrightarrow$ 高均一化・・・原料濃度 $\downarrow$

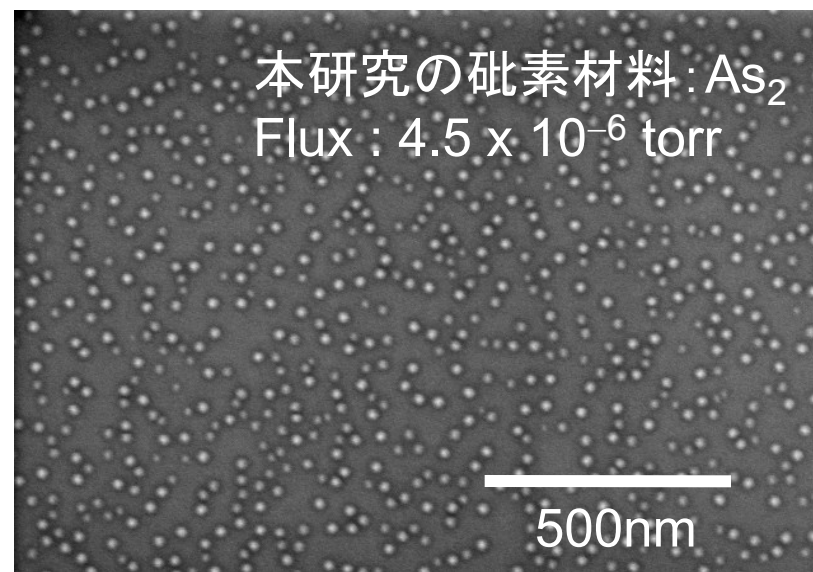
化合物半導体成長条件・・・As濃度が過剰 (In濃度の100倍！)

高密度化・・・In原料濃度 $\uparrow$ と 高均一化・・・As原料濃度 $\downarrow\downarrow$ は同時に実現可能

高密度高均一量子ドットの実現

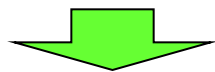


巨大量子ドットが出現



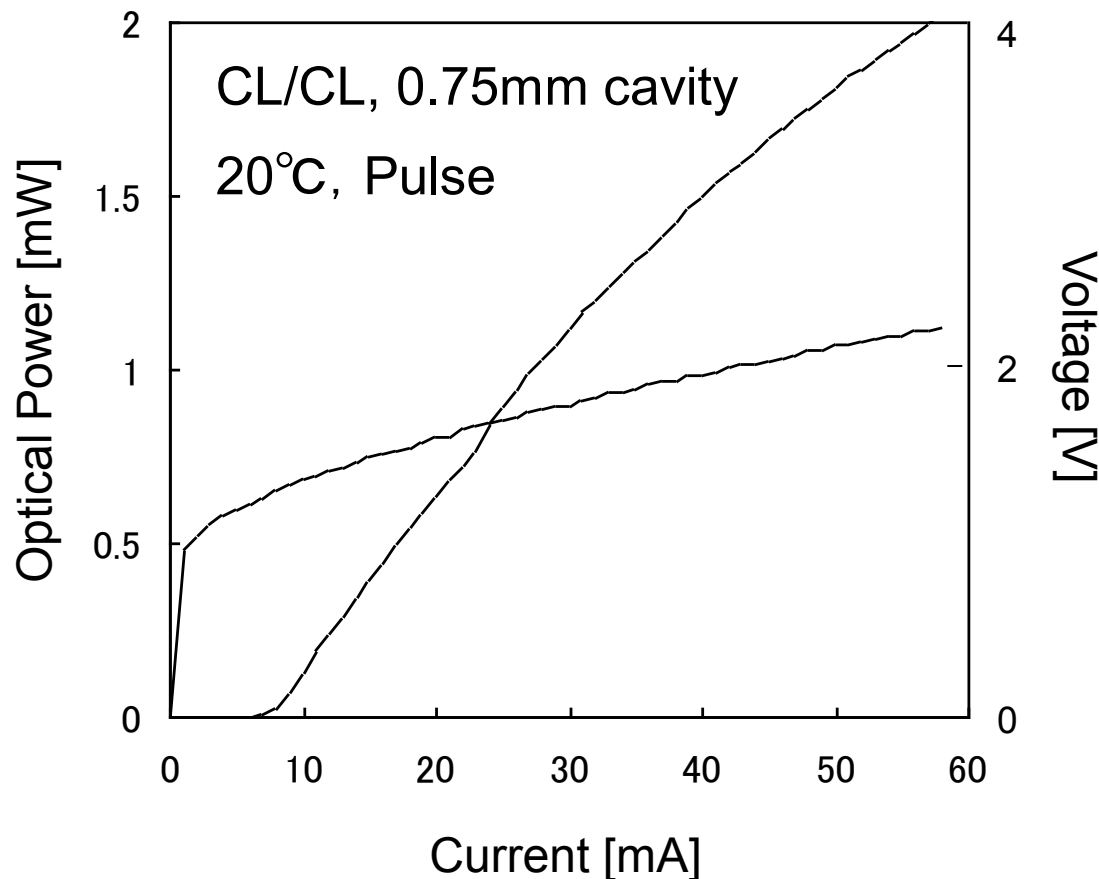
巨大量子ドットが出現せず

As_2 分子線を用いることで、高密度化しても巨大量子ドットを抑制



高密度かつ高均一な量子ドットを世界で初めて実現

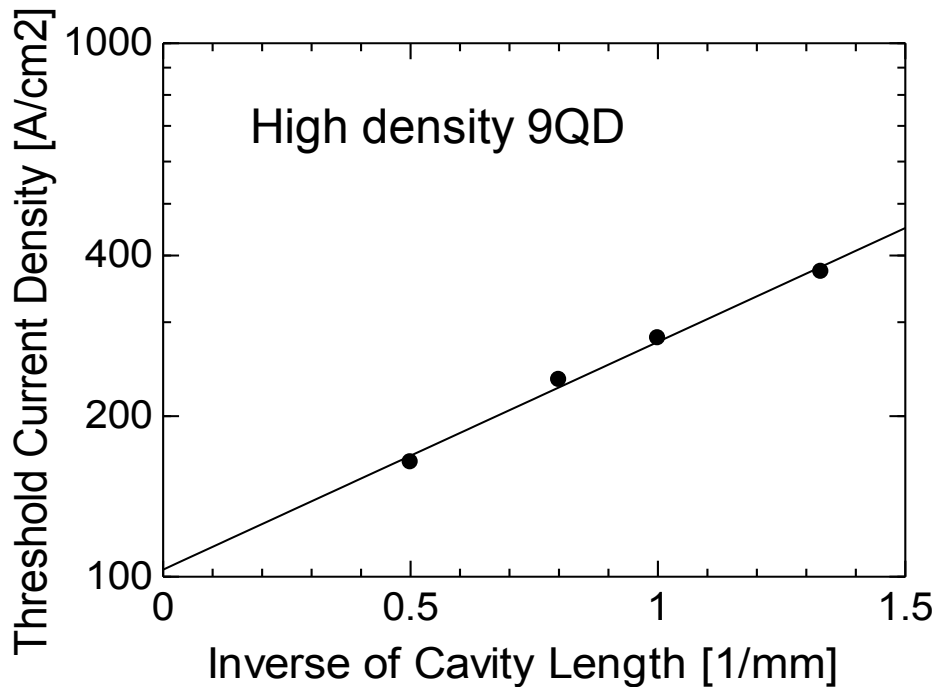
量子ドットファブリ・ペローレーザ



- しきい値電流 : 7 mA
- 発振波長 : 1.31 μm
- 素子抵抗 : 17 Ω
- しきい値電流密度
: 373 A/cm^{-2}
- スロープ効率
: 0.045 W/A

へき開かつ1mm以下の共振器構造で, しきい値電流10mA以下を初めて実現

共振器長依存性



基底準位発振での共振器長依存性

J_{th} (2mm Cavity) : 164 A/cm²

18.2 A/cm²/layer @ 6.8×10^{10} cm⁻²

J_{th} (無限共振器長) : 103 A/cm²

11.4 A/cm²/layer @ 6.8×10^{10} cm⁻²

・ 最低しきい値電流密度の報告

7 A/cm²/layer @ 1.4×10^{10} cm⁻²

(Shimizu, et. al., JJAP, vol. 44, 2005)

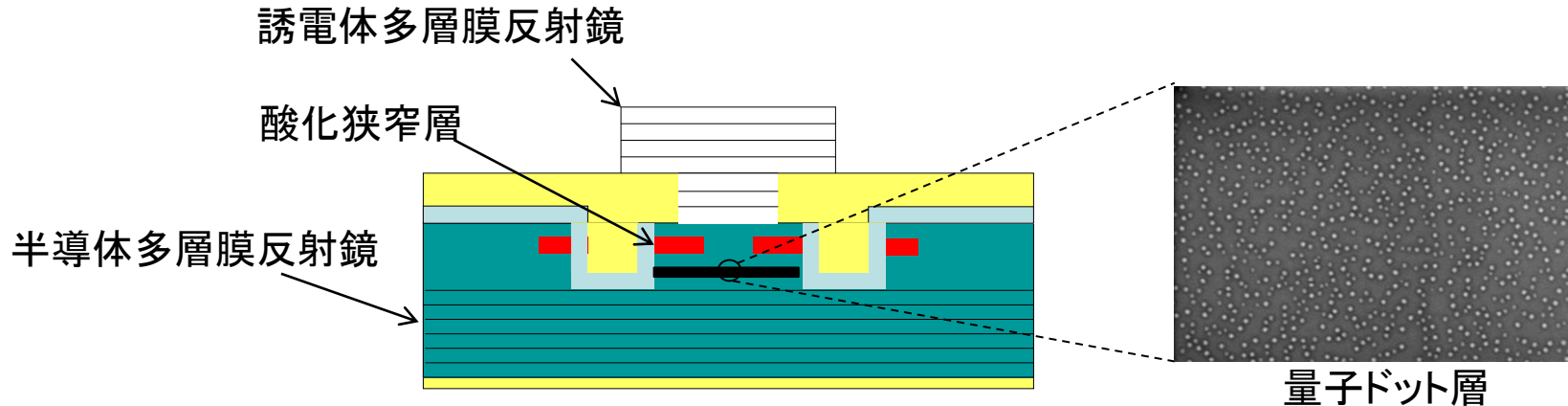
本研究 : 2.7 A/layer/ 10^{10} N

従来報告 : 5 A/layer/ 10^{10} N

単位量子ドット当たり, 最低しきい値電流を実現

2. 垂直共振型量子ドット面発光レーザー

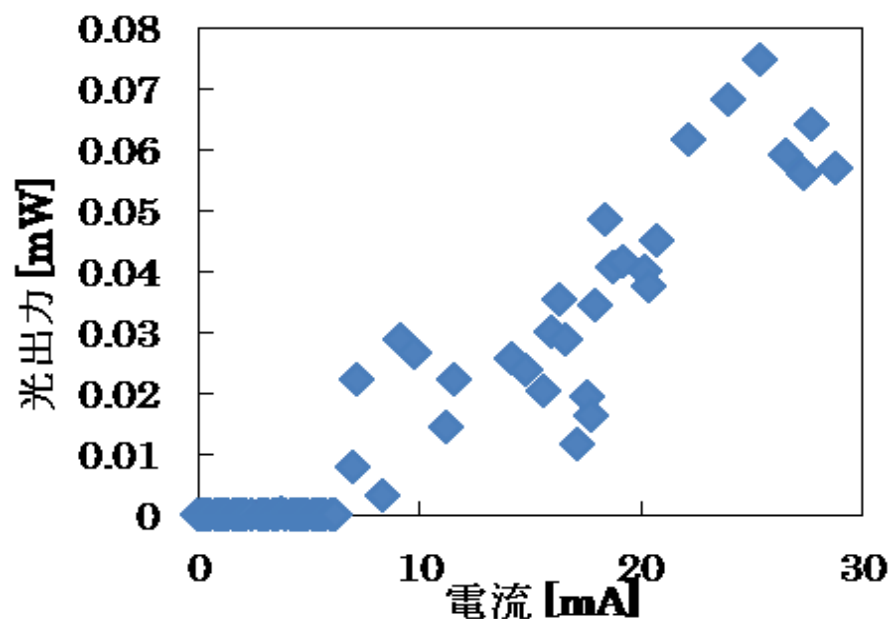
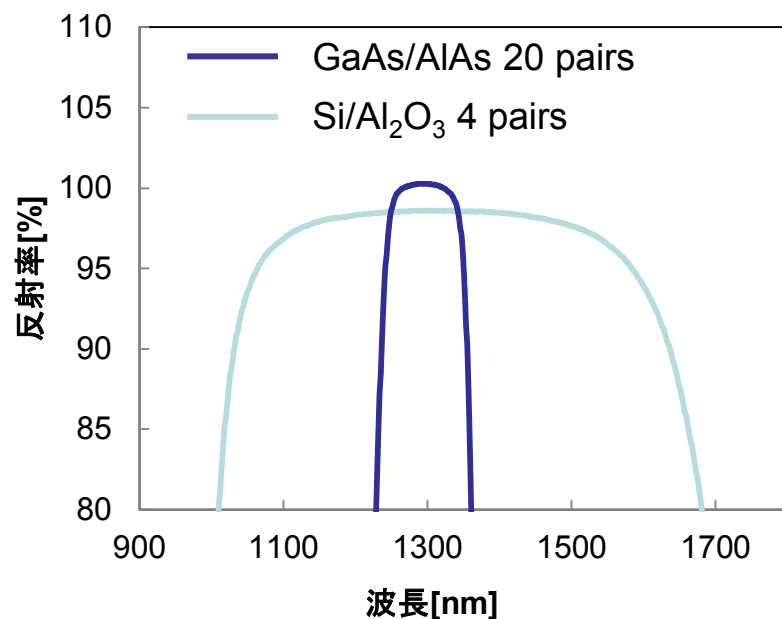
量子ドット面発光レーザー構造



量子ドット面発光レーザー作製手順

1. 半導体多層膜反射鏡、量子ドット活性層基板成長
2. ドライエッチングを用いたメサ構造形成
3. 水蒸気酸化を用いた電流狭窄構造作製
4. 電極形成、誘電体多層膜形成

量子ドット面発光ダイオード特性



反射鏡の作製

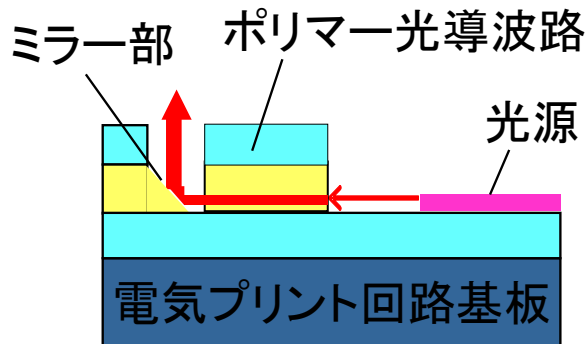
- ・ GaAs/AlAs 20 pairs : ~ 100%
- ・ Si/Al₂O₃ 4 pairs : 98.6 %

ダイオード特性が実現

上部Si/Al₂O₃ミラー反射率を98.6 % ⇒ 99.4%以上でレーザ発振が実現

3. 集積型量子ドット面出射レーザ

集積型量子ドット面出射光源

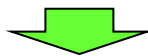


集積型量子ドット面出射光源

特徴

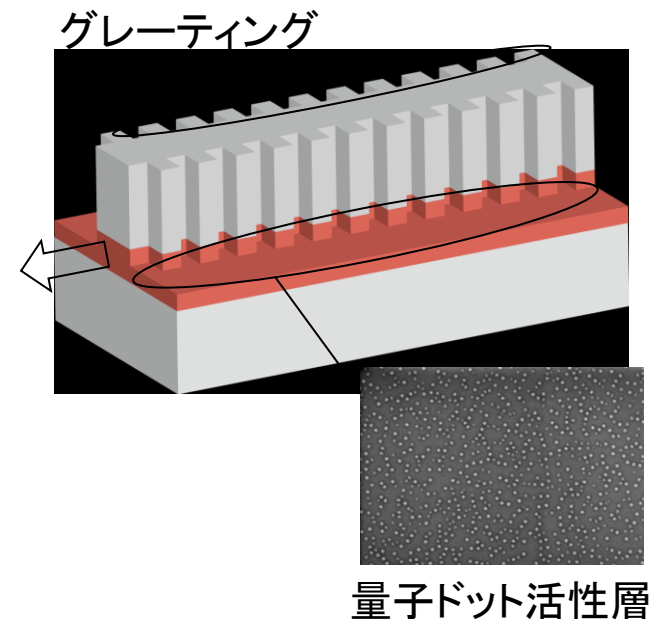
- ・電気プリント基板上に作製可能
- ・ポリマー光回路により高機能化が可能
- ・様々な光源が使用可能

光源: DFBレーザ構造が必須



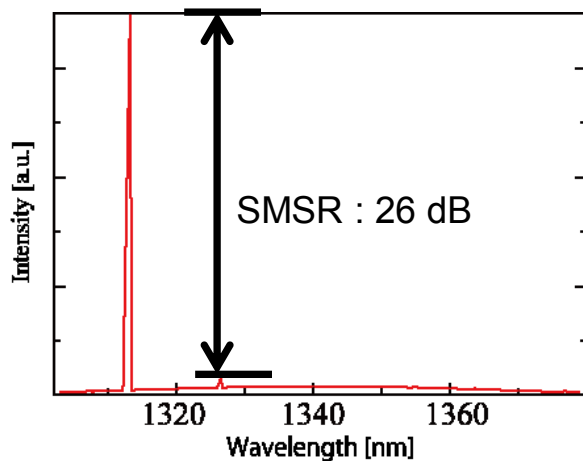
エッチング型グレーティング構造を採用

- ・再成長が要らないため、作製が簡便
- ・作製精度誤差により、特性が悪化



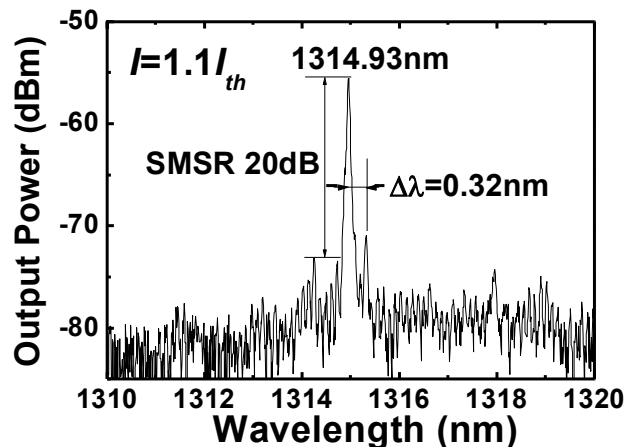
エッチング型量子ドットDFBレーザ

設計結果

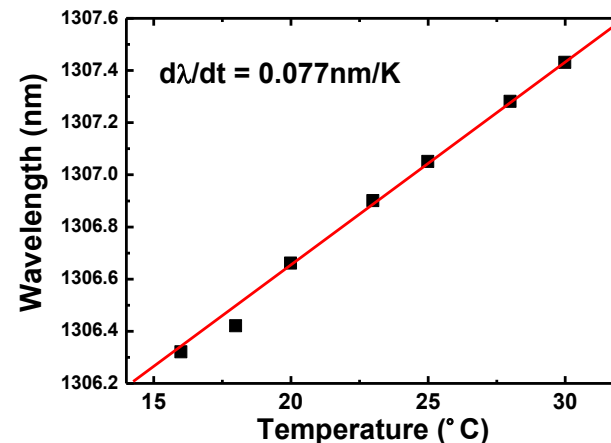


- ・FDTD法により、計算
- ・発振波長: 1316 nm
- ・SMSR: 26 dB

測定結果



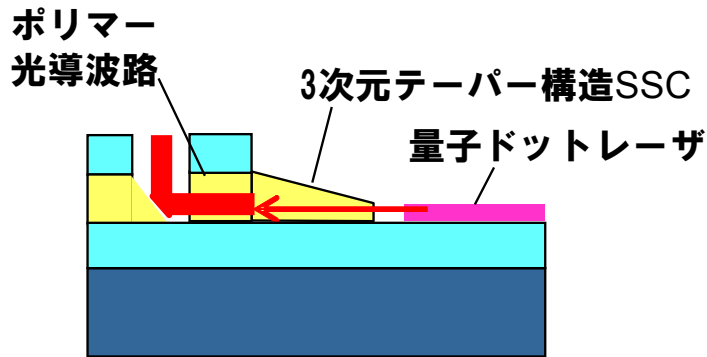
- ・EBリソ&ドライエッチングによりグレーティングを作製
- ・発振波長: 1315 nm
- ・SMSR: 20 dB



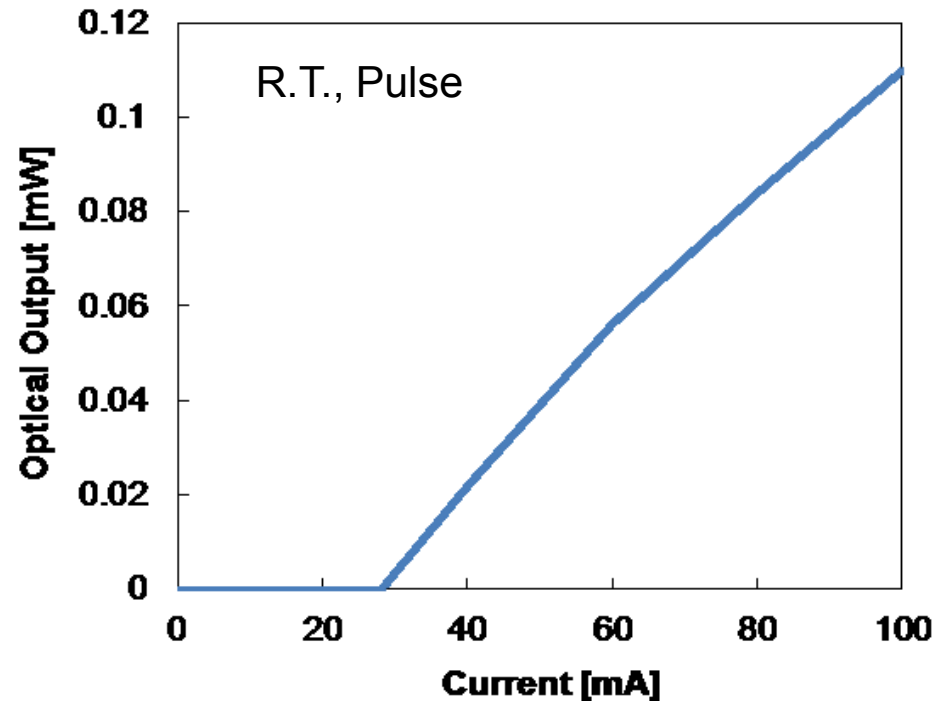
- ・温度依存性
ストライプレーザ (0.4 nm/K)
- ↓
- DFBレーザ (0.077 nm/K)

設計結果と測定値はほぼ一致。作製精度の向上により特性改善が可能

量子ドット面出射光源特性



- ・光源：量子ドットレーザ
- ・SSC：3次元テーパ構造
- ・ポリマー光導波路長
- ・位置ずれ損失：-8dB



量子ドット面出射レーザを実現

- ・しきい値電流：25mA
- ・光出力：小 ⇒ 光源実装技術の改善により、高出力化が実現可能

まとめ

1. 高品質な量子ドット活性層の実現

- ・高密度量子ドット活性層の実現
- ・CL構造 & 短共振器構造 (0.75mm) において, 7mAの低しきい値動作を実現
- ・単位量子ドット当たりの最低しきい値電流 (2.7 A/layer/ 10^{10} N) を実現

2. 垂直共振型量子ドット面発光レーザ

- ・量子ドット面発光レーザ構造を作製
- ・ダイオード特性を実現

3. 集積型量子ドット面出射レーザ

- ・エッチングプロセスにより量子ドットDFBレーザを実現
- ・SMSR 20dBの単一モード特性を実現
- ・波長温度依存性の低減が実現 (0.077 nm/K)
- ・集積型面出射光源のレーザ発振を実現

高密度量子ドットを用いた高性能面発光レーザの可能性を示唆