

(様式第9 別紙2：公開版)

養成技術者の研究・研修成果等

1. 養成技術者氏名：中村有水

2. 養成カリキュラム名：『光半導体の高均一量子ドットの形成および評価に関する研究開発』

3. 養成カリキュラムの達成状況

2次元フォトニック結晶(2DPC)からなる極微小SMZ型全光スイッチ(PC-SMZ)の光非線形導波路におけるコア層にのみ選択的に埋め込まれた位置制御量子ドット(QD)の非線形特性(吸収飽和、および非線形位相シフト)を評価し、高密度、高均一を同時に満たす事によって、短縮化が図られた非線形導波路を用いてPC-SMZの動作に必要な、90度の非線形位相シフトを観測し、PC-SMZの光干渉動作確認の見通しを得た。これにより、同スイッチ動作に必要な要素機能の実証が達成された。

4. 成果

4.1 上期における成果

(1) 研究開発業務の概要

(a) 量子ドットの光非線形性の分光評価

量子ドットの光非線形性を利用した超高速全光スイッチの構築のため、フェムト秒レーザを光源とするポンプ・プローブ分光法を用いて、量子ドットの非線形屈折率の評価を行う。

(b) 量子ドットの超高速・低消費パワー光スイッチへの応用

フォトニック結晶光導波路で構成された、極微小・対称マッハ・ツェンダー型光回路において、量子ドットの非線形屈折率変化による位相シフトを利用して、超高速・低消費パワー全光スイッチの開発を行う。

(2) 成果の概要

(a) 量子ドットの光非線形性の分光評価

量子ドット(QD)の高い光非線形性を利用した超高速全光スイッチ実現に向けて、新たに考案した2段階成長法を適用し、波長1.3 μm において高密度(3層構造、 $3\times 10^{10}/\text{cm}^2$)、高均一(PL半値幅 $\sim 30\text{meV}$)であるInAs-QDを、GaAs基板上の光導波路内に形成した。ついで、2波長のポンプ・プローブ分光法を用いて、非線形屈折率変化($\Delta n\sim 0.0003$)および位相シフト($\Delta\phi\sim 90^\circ$)の観測に成功した。これらの値は1波長の非線形吸収特性に基づく予想値とよい一致を示し、且つ目標を満たすものであり、この結果に基づいて光スイッチの設計および試作に注力している。

(b) 量子ドットの超高速・低消費パワー光スイッチへの応用

2次元フォトニック結晶(2DPC)と上記QDの非線形位相シフトによる、対称マッハ・ツェンダー(SMZ)型極微小超高速全光スイッチ(PC-SMZ)の実現に向けて、同スイッチの要である光非線形導波路部分にのみ選択的に形成するQDの実用的な位置制御技術に見通しが得られた。当技術は、現時点ではQD成長前の核形成利用法と、成長中の選択成長の両方式を含む。前者は電子線リソグラフィを用いてGaAs基板上に形成したナノホール配列を成長核として、必要部分にのみQDを規則配列する方法であり、一方、後者は特殊なマスクを用いて結晶成長中に直接選択成長を行う技術である。両者の結果を比較検討し、第3四半期で1方式に選別してQDの光スイッチ搭載を図り、光スイッチ機能実証を行う予定である。

4.2 下期における成果

(1) 研究開発業務の概要

本研究は、高度情報化時代に対応する超高速光通信技術の発展に寄与することを目的としている。超高速光通信に欠かせない技術の一つが光ファイバーによって伝送された多大な情報を高速に処理する光スイッチである。既に日本電気が、対称マッハツェンダー型光スイッチをハイブリッドで構築し、超高速・超低パワーのスイッチングを実現している。しかるに、その光導波路はシリカを母材としておりデバイスサイズは30mmと大きいため、これをさらに微小化・モノリシック化する必要がある。そこで、半導体を母材とした光導波路中に、高品質の半導体非線形材料を選択的に埋め込むことが出来れば、この微小化・モノリシック化が可能となる。

筆者の役割は、半導体非線形材料として有望視される量子ドットを高均一・高密度化し、フォトニック結晶をベースとした対称マッハツェンダー型(PC-SMZ)光スイッチの導波路中に組み込むことにある。すなわち、ナノプローブアシスト光半導体ナノ構造の作製技術を研究開発することにより、高均一・高密度の量子ドットを作製し、光デバイスへの応用を試みる。これを実現するために、二つの方法を検討する。第一の方法は、高精度電子線露光装置と反応性イオンビームエッチングにより、半導体基板上にナノホールを周期的に形成し、ここに高密度の量子ドットを人工的に配列させる方法である。第二の方法は、ランダムな位置に形成される自己形成量子ドットを、結晶成長室内に設置したメタルマスクを用いて、数百ミクロン幅の位相シフト領域にのみ選択成長する方法であり、自己形成量子ドットの優れた光学特性を本光スイッチに直接応用することが可能である。

(2) 成果の概要

本年度は、PC-SMZ光スイッチの試作を加速するため、ナノホール基板を用いた位置制御量子ドットと並行して、自己形成量子ドットの選択成長についても検討した。その結果、(a)位置制御により約100%の面内形成確率でInGaAs量子ドット(周期70nm・密度 $2 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$ 、および周期

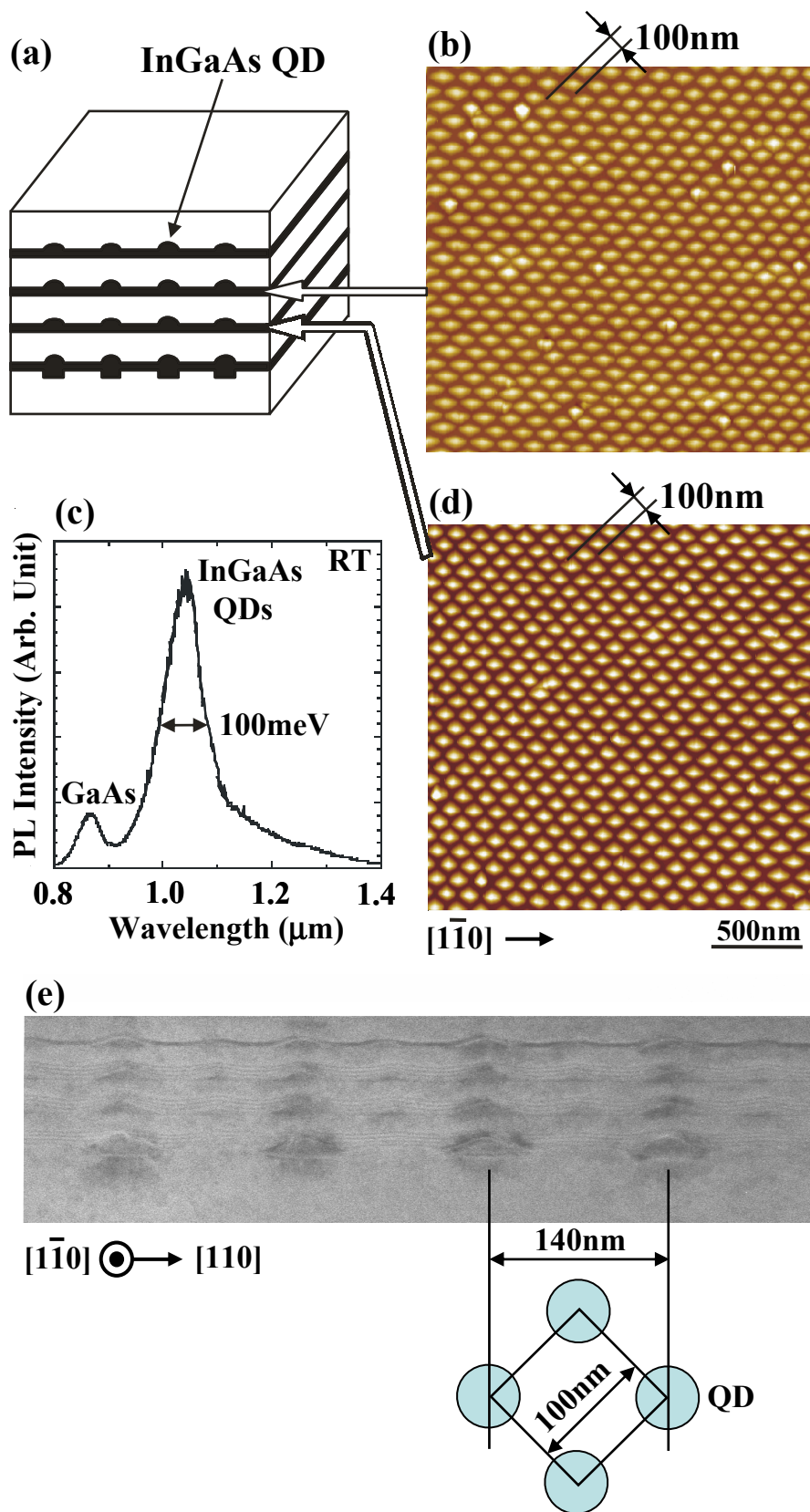
100nm・密度 $1 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$)を規則配列することに成功し、周期100nmの場合における4層垂直積層とその室温発光の確認にも成功した。また、(b) 自己形成量子ドットに関しては、メタルマスクを用いて高品質量子ドット(フォトルミネッセンス波長 $1.3 \mu\text{m}$ 、半値幅30meV、面密度 $3 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$)を数百ミクロン幅の位相シフト領域にのみ選択成長することに成功した。以下に詳細を述べる。

(a) ナノホール基板を用いた位置制御量子ドット

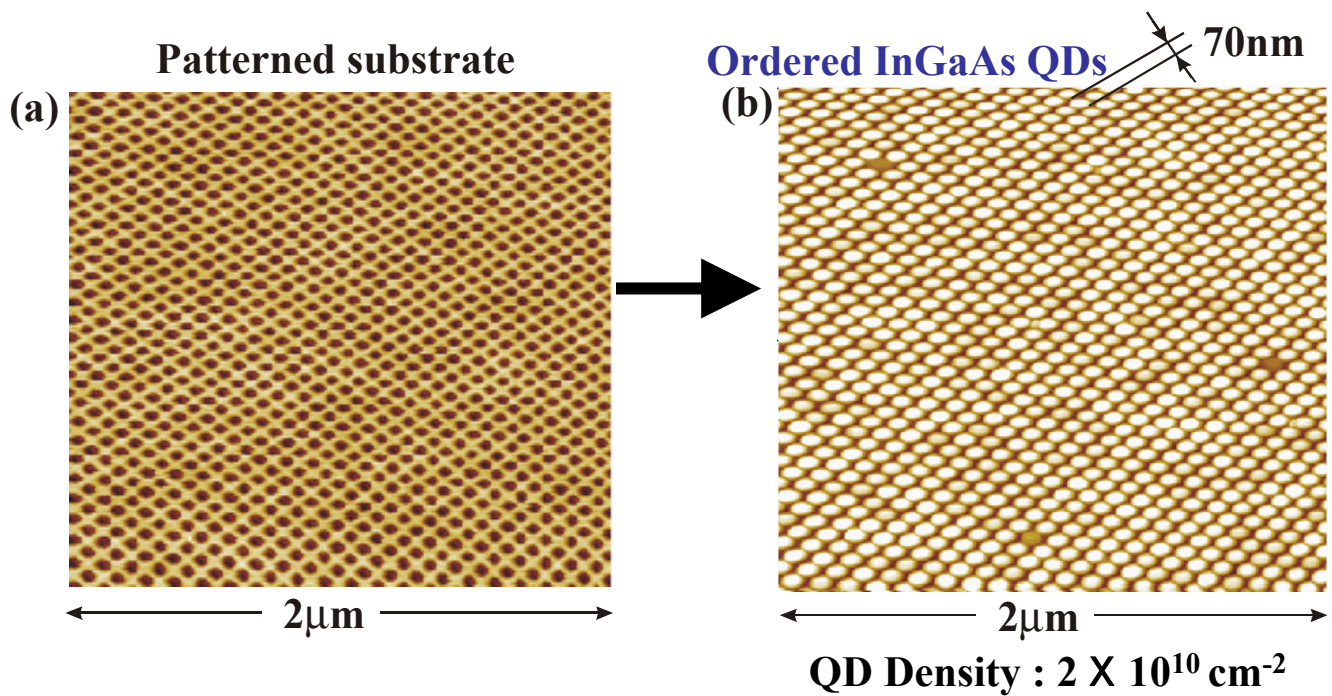
ナノホール基板を用いて、量子ドットの規則配列を行い、さらにそれを積層し、光学特性を測定した。第1図(a)に、積層した量子ドットの模式図を示す。第1図(b)、(d)のSTM像に示されるように、InGaAs量子ドットが100nm周期で規則配列されており、また第1図(e)の断面TEM像に示されるように、積層方向にも配列している。すなわち、量子ドットを単位とした3次元結晶が形成されているのがわかる。この室温フォトルミネッセンスを測定したところ、InGaAs量子ドットによる明瞭なピークが観測されており、光学的にも活性であることが示されている。また、世界で初めて、70nmという短周期においてもほぼ完全なドットの規則配列を実現した(第2図)。さらに、高温での結晶成長により、第3図に示すような完全な選択性も実現している。すなわち、ナノホール領域にのみドット配列が形成されており、平坦領域にはドットの形成は皆無である。

(b) 高品質・自己形成量子ドットの選択成長

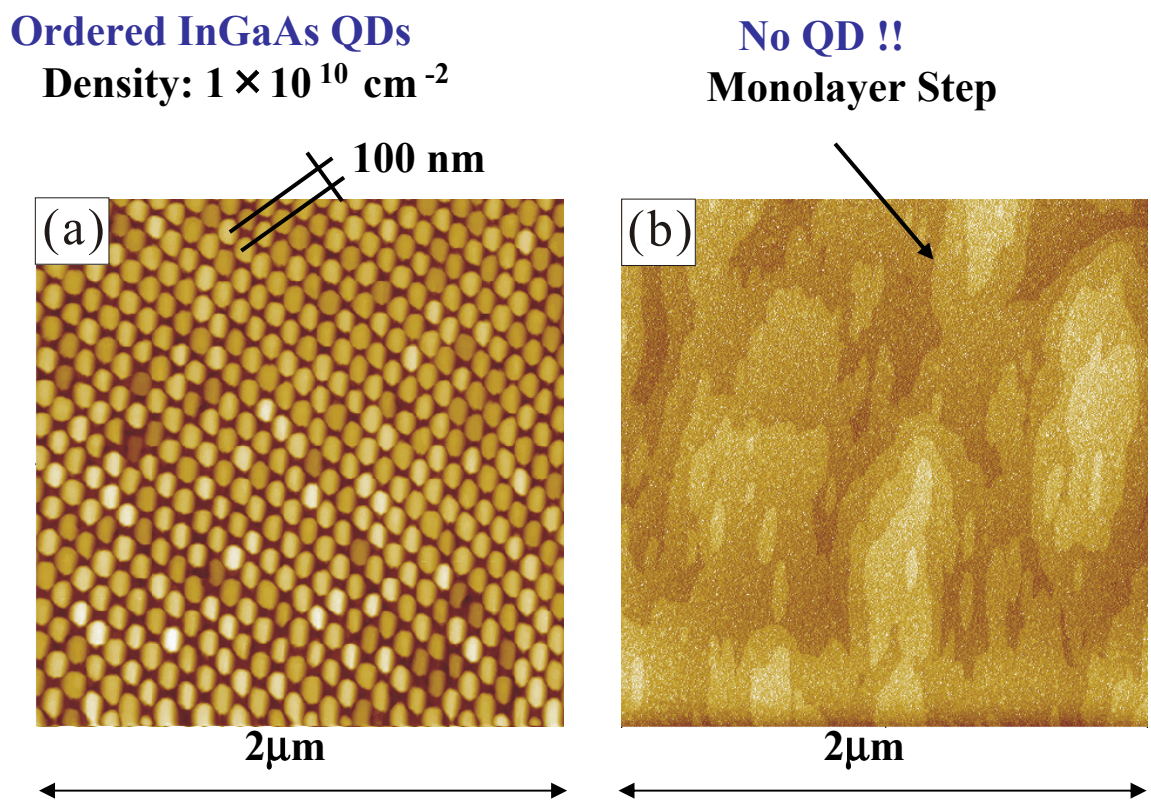
第4図に示したように、波長 $1.3 \mu\text{m}$ 帯の信号光を処理するPC-SMZ光スイッチを実現するためには、フォトリソニック結晶欠陥導波路の位相変調領域のみに、フォトルミネッセンス波長 $1.28 \mu\text{m}$ (制御光波長に対応)、半値幅30meV以下、面密度 $3.0 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$ 以上の高密度で均一な量子ドットを選択的に形成する必要がある。そこで、今回、第5図に示すような、結晶成長装置内で着脱可能なメタルマスクを新たに開発し、昨年度開発した2段階成長法を用いて、特定領域におけるドットの選択成長を試み、上記目標を達成した。なお、この2段階成長法により形成した量子ドット試料を用いて、既に位相変調度の測定が行なわれ、 90° 程度の位相シフトが確認されている。第6図に、メタルマスクを用いて作製した試料表面のSTM像を示す。マスクの開口部(0.3mmまたは1mm幅)には、面密度 $3.0 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$ の高密度ドットが形成されているが、他の領域にはドットは全く形成されておらず、完全な選択成長が実現された。また、第7図にその室温フォトルミネッセンスを示す。マスクの開口部にのみ、波長 $1.3 \mu\text{m}$ 、半値幅30meVの高品質なドットが形成されているのがわかる。今後、この手法により作製する量子ドット試料を用いて、PC-SMZ光スイッチを試作する予定である。



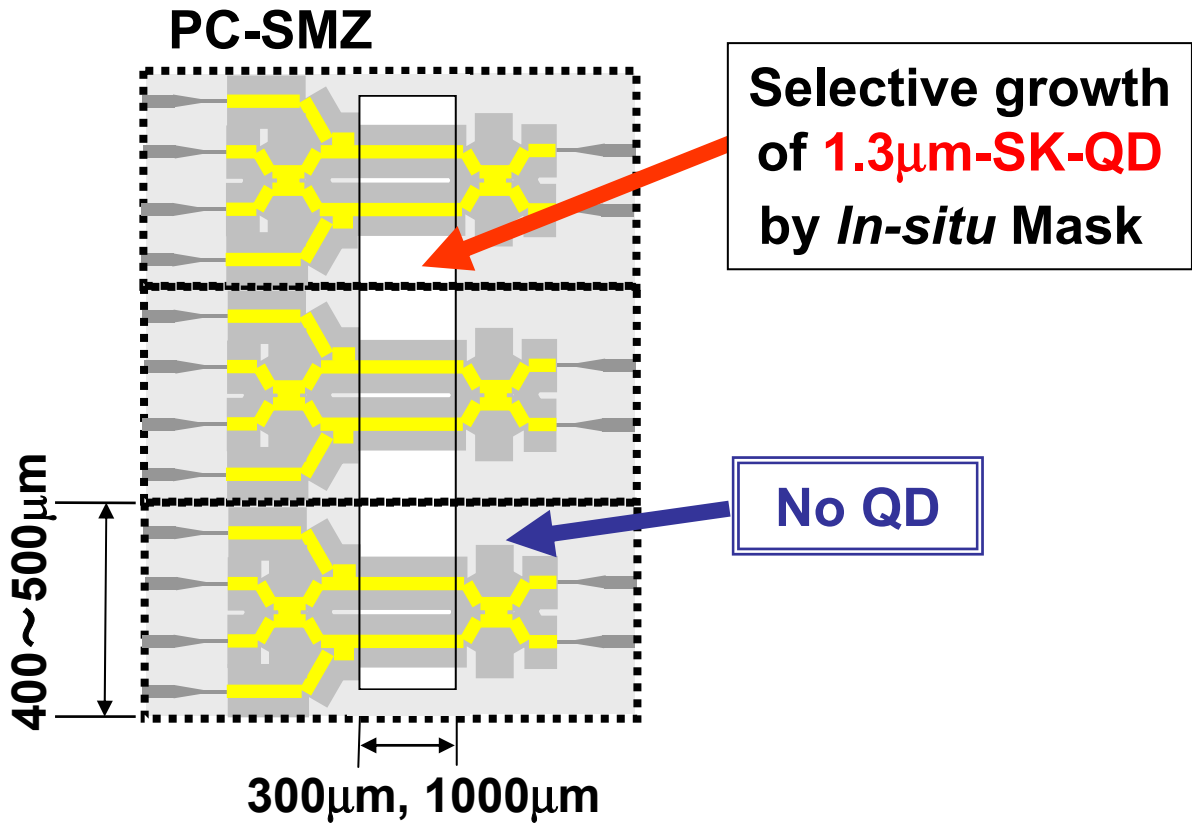
第1図 (a)ナノホール基板を用いた量子ドットの選択成長の模式図(周期100nm)。(b)規則配列したInGaAs量子ドットの2層目と3層目のSTM像をそれぞれ(d)と(b)に示す。(c)室温におけるフォトルミネッセンス。(d)積層構造の断面TEM像。



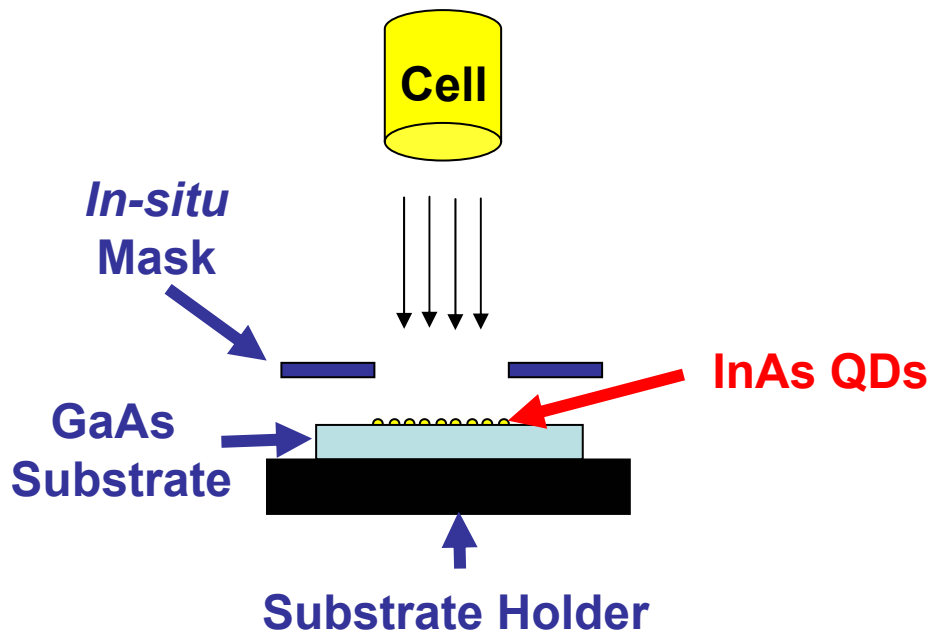
第2図 (a)周期100nmのナノホール基板。
 (b)ほぼ完全に規則配列したInGaAs量子ドットの2層目と3層目のSTM像。



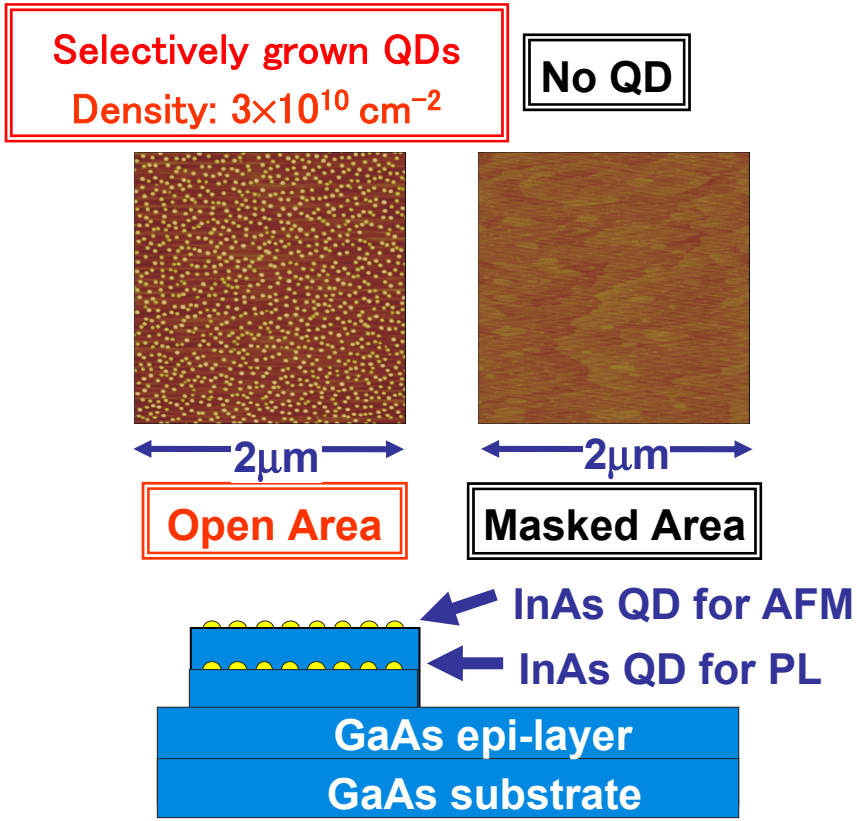
第3図 (a)高温条件で周期100nmのナノホール基板の上に形成したInGaAs量子ドット配列。
 (b)平坦部分には、量子ドットの形成は全く無く、完全な選択性が実現されている。



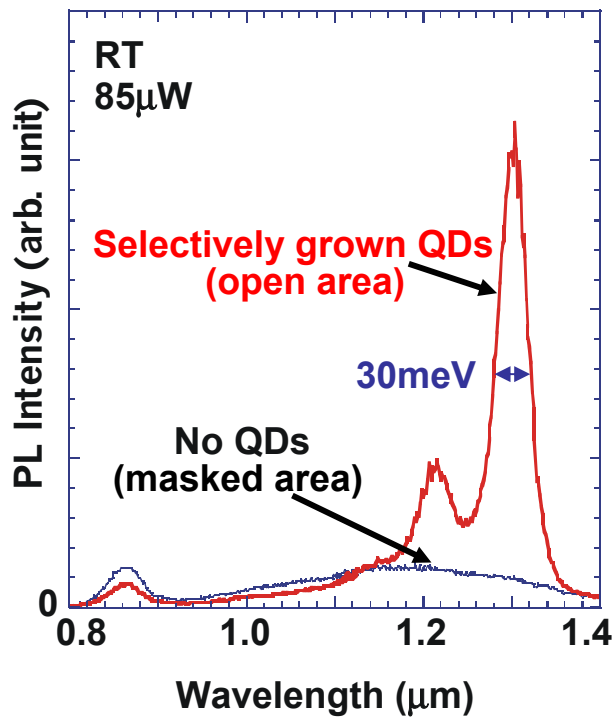
第4図 PC-SMZ光スイッチの位相シフト領域のみにおける量子ドットの選択成長



第5図 In-situマスクを用いた量子ドットの選択成長の模式図



第6図 In-situマスクを用いて選択成長した量子ドットのSTM像。マスクの開口部のみにドットが形成されており、他の領域にはドットは皆無である。



第7図 In-situマスクを用いて選択成長した量子ドットの室温フォトルミネッセンス。マスクの開口部のみに波長1.3μm・半値幅30meVの高品質なドットが形成されている。

5. 成果の対外的発表等

5.1 上期における成果の対外的発表等

(1) 論文発表

- [1] Y. Nakamura, N. Ikeda, Y. Sugimoto, H. Nakamura, S. Ohkouchi, and K. Asakawa
"Two-dimensional ordering of InGaAs quantum dots formed on artificial nano-hole array with 100nm-periodicity"
Physica Status Solidi (b), vol. 238, No.2, pp. 237-240 (2003).
- [2] Y. Sugimoto, Y Tanaka, N. Ikeda, K. Kanamoto, Y. Nakamura, S. Ohkouchi, H. Nakamura, K. Inoue, H. Sasaki, Y. Watanabe, K. Ishida, H. Ishikawa, and K. Asakawa
"Two-dimensional semiconductor-based photonic crystal slab waveguide for ultra-fast optical signal processing devices"
To be published in IEICE Trans. Electron., vol. E87-C, No.3 (2004).
- [3] Y. Nakamura, N. Ikeda, S. Ohkouchi, Y. Sugimoto, H. Nakamura, and K. Asakawa
"Regular array of InGaAs quantum dots with 100-nm-periodicity formed on patterned GaAs substrates"
To be published in Physica E.
- [4] S. Ohkouchi, Y. Nakamura, H. Nakamura, K. Asakawa
"Nano-Probe-Assisted Technology of Indium-Nano-dot formation for High-Throughput site-controlled InAs/GaAs Quantum Dots"
To be published in Physica E.
- [5] Y. Nakamura, H. Nakamura, S. Ohkouchi, N. Ikeda, Y. Sugimoto, and K. Asakawa
"Selective Formation of High-density and High-uniformity InAs/GaAs Quantum Dots for Ultra-small and Ultra-fast All-optical Switches"
To be published in the Proceedings of Compound Semiconductors 2002.

(2) 口頭発表

- [1] Y. Nakamura, N. Ikeda, S. Ohkouchi, Y. Sugimoto, H. Nakamura, K. Asakawa
"Regular array of InGaAs quantum dots with 100nm-periodicity formed on patterned GaAs substrates" The 11th International Conference on Modulated Semiconductor Structures, Nara, Japan, 2003.
- [2] S. Ohkouchi, Y. Nakamura, H. Nakamura, K. Asakawa
"Nano-Probe-Assisted Technology of Indium-Nano-dot formation for High-Throughput Site-Controlled InAs/GaAs Quantum Dots" The 11th International Conference on Modulated Semiconductor Structures, Nara, Japan, 2003.
- [3] Y. Nakamura, N. Ikeda, Y. Sugimoto, S. Ohkouchi, H. Nakamura, and K. Asakawa
"Ordered InGaAs quantum dots with 100nm-periodicity formed on patterned GaAs substrates"

for optical switch”

The 10th International Workshop on Femtosecond Technology, Chiba, Japan, 2003.

- [4] H. Nakamura, K. Kanamoto, Y. Nakamura, Y. Sugimoto, N. Ikeda, Y. Tanaka, S. Ohkouchi, H. Ishikawa, and K. Asakawa

”Optical nonlinear phase shift of InAs quantum dots and its application to all-optical switches”

The 10th International Workshop on Femtosecond Technology, Chiba, Japan, 2003.

- [5] S. Ohkouchi, Y. Nakamura, H. Nakamura, and K. Asakawa

”Indium-Nano-dot Formation by field-Induced deposition with a specially Designed Nano-Probe for Site-controlled InAs Quantum dots”

The 10th International Workshop on Femtosecond Technology, Chiba, Japan, 2003.

- [6] K. Kanamoto, H. Nakamura, Y. Nakamura, Y. Sugimoto, K. Asakawa, and H. Ishikawa

”Two color pump-probe polarization analysis for phase shift measurements in InAs quantum dot waveguides”

The 10th International Workshop on Femtosecond Technology, Chiba, Japan, 2003

(3) 特許等：なし

5. 2 下期における成果の対外的発表等

(1) 論文発表

- [1] Y. Nakamura, N. Ikeda, Y. Sugimoto, H. Nakamura, S. Ohkouchi, and K. Asakawa

”Two-dimensional ordering of InGaAs quantum dots formed on artificial nano-hole array with 100nm-periodicity”

Physica Status Solidi B, Vol. 238, No. 2, pp. 237-240 (2003).

- [2] Y. Nakamura, H. Nakamura, S. Ohkouchi, N. Ikeda, Y. Sugimoto, and K. Asakawa

”Selective Formation of High-density and High-uniformity InAs/GaAs Quantum Dots for Ultra-small and Ultra-fast All-optical Switches”

Proceedings of the 29th International Symposium on Compound Semiconductors 2002, pp. 133-136.

- [3] Y. Nakamura, N. Ikeda, S. Ohkouchi, Y. Sugimoto, H. Nakamura, and K. Asakawa

”Regular array of InGaAs quantum dots with 100-nm-periodicity formed on patterned GaAs substrates” To be published in Physica E.

- [4] Y. Nakamura, N. Ikeda, S. Ohkouchi, Y. Sugimoto, H. Nakamura, and K. Asakawa

”Two-Dimensional InGaAs Quantum-Dot Arrays with Periods of 70 - 100 nm on Artificially

Prepared Nanoholes”

Japanese Journal of Applied Physics, Vol.43, No. 3A, pp. L362-L364 (2004).

(2) 口頭発表 :

- [1] Y. Nakamura, N. Ikeda, S. Ohkouchi, Y. Sugimoto, H. Nakamura, and K. Asakawa
“Regular array of InGaAs quantum dots with 100-nm-periodicity formed on patterned GaAs substrates”
The 11th International Conference on Modulated Semiconductor Structures, Tokyo, Japan (2003).
- [2] Y. Nakamura, N. Ikeda, Y. Sugimoto, S. Ohkouchi, H. Nakamura, and K. Asakawa
“Ordered InGaAs quantum dots with 100nm-periodicity formed on patterned GaAs substrates for optical switch”
The 10th Workshop on Femtosecond Technology, Chiba, Japan (2003).
- [3] 中村 有水、池田 直樹、大河内 俊介、杉本 喜正、中村 均、浅川 潔
“加工基板を用いた InGaAs 量子ドットの MBE 選択成長”
秋季第 6 4 回応用物理学会学術講演会、福岡市(2003).
- [4] 中村 有水、大河内 俊介、中村 均、金本 恭三、池田 直樹、杉本 喜正、田中 有、浅川 潔
“量子ドットの配列制御と極微小・全光スイッチへの応用” (招待講演)
早稲田大学ナノテクノロジーフォーラム、マイクロ/ナノフォトニクス部会、第 2 回研究会、東京(2003).

(3) 特許等 : なし