

**ナノ技術を活用した超高機能ネットワーク技術の研究開発**  
**Research and development on ultra functional network technologies utilizing**  
**nanotechnology**

**代表者** 菊池 和朗 東京大学

**研究期間** 平成 16 年度～平成 20 年度

**【Abstract】**

Through the synthetic and systematic R&D on ultra functional network technologies utilizing nanotechnology, we have developed fundamental technologies for reducing power consumption and size, and improving efficiency. The main results are summarized as followings.

1) A columnar-quantum-dot based waveform reshaping device has been developed and the improved error rate performance for 40 Gbit/s modulated signals has been demonstrated. 2) 20 Gbit/s QPSK and 40 Gbits/s 16 QAM signals have been successfully transmitted over 1,000 km. In the WDM QPSK system, the spectral efficiency of 1.6 bits/s/Hz has been achieved. In addition, it has been demonstrated that the quantum dot could narrow the laser linewidth owing to its intrinsic property of the symmetric density of state. 3) A micro photonic-crystal (PC) optical switch in an area of 15×4 μm<sup>2</sup> has been developed, and its 5-ns response applicable to optical packet switching has been demonstrated. 4) A micro PC optical packet add/drop multiplexing (ADM) filter in an area of 30×30 μm<sup>2</sup> and an integrated 2-ns wire-waveguide optical delay in an area of 5 mm×170 μm have been developed and demonstrated for 10-Gbit/s ADM. 5) Photo detectors with plasmon antennas have been developed and demonstrated for 40 Gbit/s applications.

**1 研究体制**

- **研究代表者** 菊池和朗（東京大学）
- **研究分担者** 北山研一†（大阪大学†）  
菅原充††（富士通株式会社††）  
徳島正敏†††（日本電気株式会社†††）
- **研究期間** 平成 16 年度～平成 20 年度
- **研究予算** 総額 652 百万円  
(内訳)

平成 16 年度	平成 17 年度	平成 18 年度	平成 19 年度	平成 20 年度
135 百万円	139 百万円	137 百万円	123 百万円	118 百万円

## 2 研究課題の目的および意義

本研究は、ナノ技術の優れた特性を活かすことで実現可能となるネットワーク技術の超高機能化に関し、素子レベルからシステムまで研究開発を総合的かつ体系的に実施して、次世代の高度情報通信ネットワークの構築に必要な要素技術の確立を目的とする。これにより、e-Japan 重点計画に掲げる高度情報通信ネットワーク社会の基盤を確立するとともに、本分野における国際的な技術開発競争において、我が国のイニシアティブを確保する。

ナノ技術の優れた特性を活かした超高機能ネットワーク技術等の研究開発を行い、次世代の高度情報通信ネットワークの構築において実用に資する要素技術を2008年度までに確立することを目指し、ナノスケールの物性やサイズに基づく効果を積極的に活用した伝送技術、ノード技術に関する研究開発を行い、伝送容量、処理能力、省電力、小型化等において飛躍的な性能向上を達成する。従来方式による場合と比べ、容量や効率については数倍程度以上、消費電力やサイズについては1/100～1/1000程度以下の達成を目標とする。

## 3 研究成果

### 3.1 ナノ技術を活用した高能率中継技術（課題ア）

ナノ構造活用による新たな多重化等も利用することで、40Gbps ベース以上の信号ラインを高密度に集積可能な手段・構成法により再生中継システムのプロトタイプを開発する。1.3 $\mu$ m 帯を含む通信波長帯において、10Tbps を超える伝送容量に対し、従来方式\*による場合に比べ 1/100 程度の小型化、低消費電力化が実現できることを示す。

\* 従来方式では、光信号を電気に変換して再生中継を行い、再び光信号に戻している。

再生中継システムの基幹デバイスとして、図 3.1.1 に示す量子ドットを用いた波形整形素子の開発を行った。一つの素子で波長の異なる 2 つの 40Gbps 変調信号を同時に波形整形することを目標とし、その実現に小型かつ均一な量子ドットが必要となることを明らかにした。長距離通信波長帯である 1.55 $\mu$ m 帯で動作する量子ドットとして図 3.1.2 に示すような InP 基板上に InAs ドットを近接積層するコラムナ型量子ドットを提案し、底面サイズが約 27nm と従来量子ドット(底面サイズ約 40nm)に比較してサイズの小さな量子ドットの形成に成功した。このコラムナ型量子ドット構造を適用した半導体光増幅器を試作し、利得飽和領域における信号の 1 レベル側の雑音圧縮効果により 40Gbps 変調信号に対するエラーレートの改善を実証した。また、量子ドットを適用した過飽和吸収素子において、信号の 0 レベル側の雑音を約 15%圧縮し、波形整形効果を実証した。さらに 1 つの素子で波長の異なる 2 つの信号を同時に波形整形するために必要な量子ドット構造を理論的に導出したところ、底面サイズが 15nm 以下、サイズばらつきが 3%以内の量子ドットを実現することで、2 波長の 40Gbps 変調信号を同時に波形整形できる見通しを得た。

この量子ドット波形整形素子を適用した再生中継システムの Q 値改善について数値解析を行い、光ファイバ通信システムにおいて、光ファイバ伝送路や光増幅器で生じる振幅雑音を抑圧した高能率中継を実現する可能性があることを明らかにした。さらに、偏光多重した多値変調技術に本技術を組み合わせることによって、従来の再生中継器に対し、ビットレートあたりの消費電力を 1/100 以下に低減できる見通しを得た。

(現行品の 300pin トランスポンダの消費電力は 11W/10Gbps である。提案システムでは、量子ドット波形整形素子の消費電力が約 1.35W、TEC 消費電力が約 4W、合計で約 5.4W で処理できる通信容量は  $40 \times 2(2 \text{ 波長}) \times 4(16\text{QAM}) \times 2(\text{偏光多重}) = 640\text{Gbps}$  となる。1Gbps あたりの消費電力に換算すると、現行品は 1.1W/1Gbps に対し、量子ドット波形整形素子で 8.4mW/1Gbps となる。)

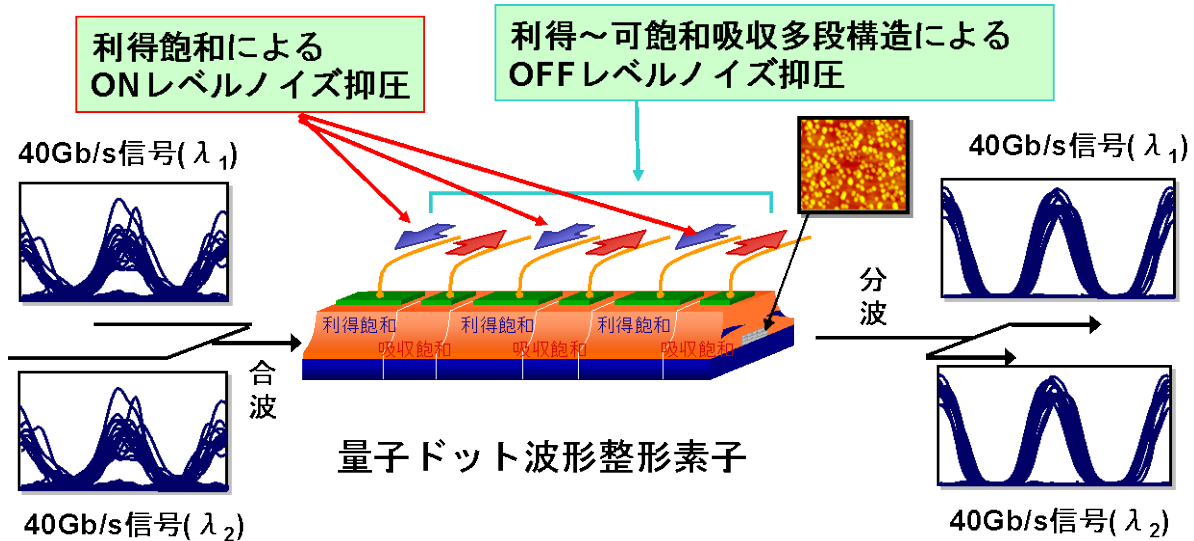


図 3.1.1 量子ドット波形整形素子

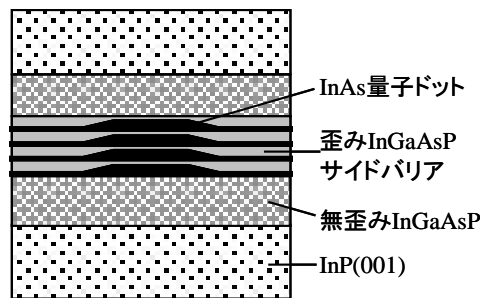


図 3.1.2 コラムナ量子ドット

本成果は、光再生中継に必要なシステム側からの検討（東京大学・富士通担当）、デバイス側からの新規デバイス構造の検討、作製技術の開発（富士通担当）を連携して実施することにより達成した

### 3. 2 ナノ技術を活用した高効率伝送技術（課題イ）

ナノ構造によって発現する効果に基づく高性能光源技術等を活用した高効率な変復調方式等を開発し、 $1.3\mu\text{m}$  帯を含む通信波長帯において、数bps/Hz 程度以上の周波数利用効率を実現することを目標とする。

シンボルレートを維持したまま、ビットレートを上げることができる多値光変復調方式は、将来の光通信システムを大容量化する有力な手段である。多値 PSK 信号、直交振幅変調 (QAM) がその代表的な例である。4 相を超える多値光変調方式ではパワーペナルティーが避けられないが、一方で所要光帯域は狭くなるため、周波数利用効率を高くすることができる。周波数利用効率の上限はシャノン限界として知られているが、多値変調方式はシャノン限界に近づく有力な方法である。

これまでの光通信システムでは、強度変調・直接検波のみが用いられてきたが、多値変復調方式を本格的に導入する場合には、強度変調にかわる位相変調の利用、直接検波にかわるヘテロダイン/ホモダイン検波を利用する必要がある。このなかで光ホモダイン受信器は、受信器の帯域は信号の帯域程度であれば良いので、電気回路に対する負担が小さい。しかし、信号光とローカル光の周波数と位相が完全に一致していることが要求される。このために光学的位同期ループ（OPLL）が古くから検討されてきたが、いまだに実現が難しい。一方、電気段でのデジタル信号処理技術は、アナログ信号処理では得られない高度な機能を比較的安価に実現できる。本プロジェクトでは、ホモダイン位相ダイバーシティ検波とデジタル信号処理を組み合わせた新しい受信器を提案した。受信器の概念を図 3.2.1 に示す。光電界の複素振幅および偏波状態(SOP)が受信されたのち、デジタル領域で処理される。この受信器では搬送波位相を再生する手段として、OPLL ではなく高速デジタル信号処理が用いられており、従来のホモダイン受信器の技術的課題が克服された。本プロジェクトにより、10Gsymbold/s の多値 PSK 信号（2 相、4 相および 8 相）および QAM 信号（16 相）の復調実験に成功したことにより、この技術は国内外から注目を集め、“Digital coherent technology”と呼ばれる新しい技術分野が形成された。

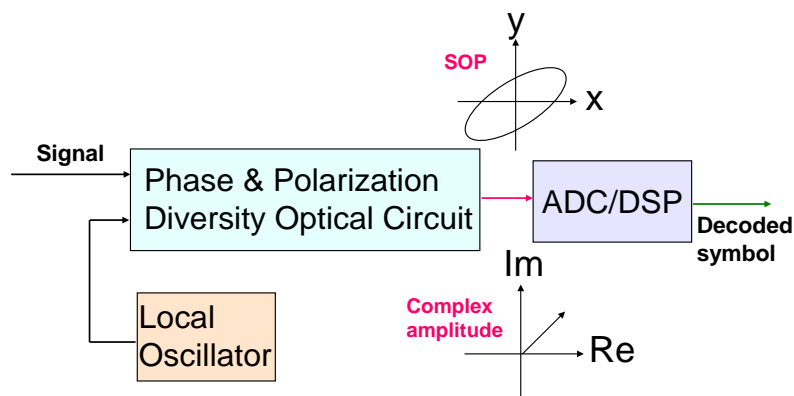


図 3.2.1 デジタルコヒーレント光受信器の構成

本プロジェクトの成果は、より具体的には以下のように要約される。

(1) デジタルコヒーレント光回路の試作

自由空間光学系を用いて、偏波・位相ダイバーシティホモダイン光回路を試作した。光回路部品は小型メタルパッケージに収納され、入出力ポートはファイバ結合されているため、システム実験のための長期安定度が確保された。

(2) デジタル信号処理アルゴリズムの確立

固定分散補償、偏波制御、クロック抽出、キャリア位相推定、適応等化、シンボル識別のためのアルゴリズムを開発し、受信器に実装した。しかし、現時点では実時間動作には至っておらず、測定は全てオフラインで行われた。

(3) 受信感度評価

Back-to-back時における受信感度を、2相、4相、8相PSKおよび16相QAMについて測定した。2相および4相PSKに関しては、ショット雑音限界に近い受信感度が得られたが、8相PSKおよび16相QAMに関しては、符号間干渉 (ISI) により受信感度が劣化した。多値度が上がるにつれて、ISIの影響が無視できなくなる。レーザスペクトル線幅に対する要求条件も検討し、16QAMについては、500kHz程度の線幅でパワーペナルティが2dB以下に抑えられることがわかった。この値が狭線幅ナノ構造DFBレーザの開発

目標となった。図3.2.2に、デジタルコヒーレント光受信器によって測定された、これらの多値変調信号の複素振幅分布を示す。

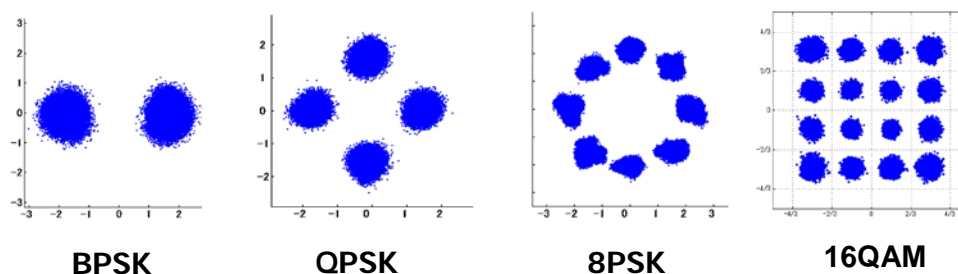


図 3.2.2 デジタルコヒーレント光受信器によって測定された多値変調信号の複素振幅分布

#### (4) 伝送実験

1,000km伝送路を構築して、多値信号の伝送を行った。波長多重(WDM)20Gbit/s QPSK伝送実験ではスペクトル効率1.6bit/s/Hzが達成された。また、1チャンネルながら40Gbit/s 16QAM信号の1,000km伝送にも成功している。WDM化により2bit/s/Hz以上のスペクトル効率が得られることが予想される。

以上のように本プロジェクトでは、デジタルコヒーレント光受信器の提案、試作、評価を行った。多値光変復調システムを構築し、実際に多値信号を伝送することにより、従来方式に比べて3倍以上のスペクトル利用効率が達成できることを示した。

多値位相変復調を用いた高効率かつ大容量伝送方式ではその受信機側にレーザ線幅の非常に狭い光源が要求される。3次元ナノ構造である量子ドットはキャリアを微小領域に閉じ込めるため、理論的には離散的で対称なキャリア状態密度分布が得られる。その結果、利得変化に伴う屈折率変化が無視できて線幅拡張因子が低減し、従来の量子井戸レーザでは達成困難な狭線幅レーザの実現が期待される。以下に本研究課題で達成した成果を述べる。

1.55  $\mu\text{m}$  帯の狭線幅量子ドットレーザの実現に向けて、有機金属気相成長 (MOVPE) 法による従来原料(TMIn, AsH<sub>3</sub>, TMSb)を用いた InP 基板上への微小、高密度、高均一量子ドット成長技術開発を進めた。離散的で対称な状態密度分布形成を目標に、従来材料の InAs よりも長波長を維持しつつ微小量子ドット形成可能な InAsSb 材料を用いた量子ドット成長の検討を進めた。InP 基板上成長で課題となる量子ドット形状の面内異方性改善策として、[1-10]方向に微傾斜した InP 基板の活用が有効であることを発見し、横方向 20~30 nm、高さ 1~2 nm と微小で、かつ、密度  $1\sim 2\times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  と高密度な InAsSb 量子ドットの形成に成功した。また、回折格子を形成した微傾斜 InP 基板上において量子ドット層の 10 層までの多層化成長を実現し、微傾斜 InP 基板上微小・高密度 InAsSb 量子ドット DFB レーザ作製の要素技術を確立した。

上記量子ドットを用いて 1.55  $\mu\text{m}$  帯 DFB レーザ試作を進めた。600  $\mu\text{m}$  の長共振器を用いて 100  $^{\circ}\text{C}$  までの単一モード発振に成功した。線幅拡張因子に関しては低注入電流領域で 1 程度までの低減を実現した一方、高注入電流領域では量子井戸よりも大きいことが分かった。次試作ではしきい値電流の低減やモード利得増大を確認したが、線幅拡張因子は量子井戸と大きな差異がなかった。このことから量子ドット狭線幅レーザの達成に向けて更なる利得の増大、基底準位と励起準位間隔の伸長、量子ドットサイズ不均一拡がりの抑制が必要であることを明らかにした。

この素子特性の結果を受けて量子ドット成長に関して更なるサイズ不均一拡がり低減に向けて、従来原料よりも高分解効率の原料(TEIn、TBAs、TESb)の使用による成長制御性改善、および結合量子ドット導入による形状制御性改善を検討した。原料の分解効率向上による量子ドット形成を確認し、新規原料での結合量子ドット成長の基本条件を取得した。不均一幅拡がり低減に関して大きな改善は見られなかったものの、状態密度分布の離散化に起因すると思われる PL 波長ピーク位置の励起強度依存性の小さい結合量子ドットの形成に成功した(図 3.2.3)。このことは不均一幅拡がりの低減が進めば、狭線幅レーザに適用可能な InP 基板上量子ドット形成可能なことを示すものである。

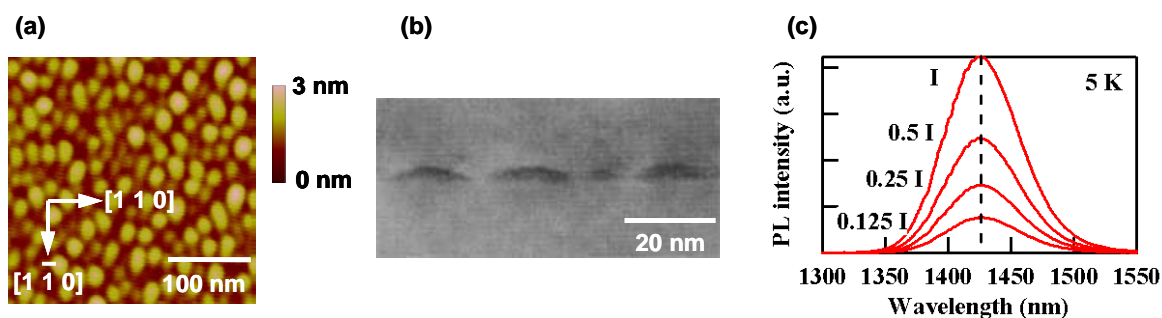


図 3.2.3 (a)微傾斜 InP 基板上微小・高密度 InAsSb 量子ドットの AFM 像、(b)結合量子ドットの断面 TEM 像、(c)結合量子ドットの PL スペクトル励起強度依存性

また狭線幅化への量子ドット適用の有効性に対して多角的に検証を進めるため、GaAs 基板上波長 1.3  $\mu\text{m}$  帯 InAs 量子ドットを活性層に適用した量子ドットレーザを用いた検討を進めた。GaAs 基板上量子ドットは InP 基板上量子ドットと比較して、結晶成長開発が進み、量子ドットの小型化、均一化に成功している。そのため、サイズ不均一拡がりが低減し、離散的な対称状態密度分布が形成されるため、線幅拡張因子の低減が期待される。このような量子ドットを活性層とした共振器 400  $\mu\text{m}$  で端面に AR/HR 膜を施した波長 1.3  $\mu\text{m}$  帯 DFB レーザを作製し、その線幅拡張因子とレーザ線幅の評価を行い、狭線幅化に対する量子ドットの有効性の検証を行った。しきい値電流以上で 2 程度と、1.55  $\mu\text{m}$  帯量子ドットレーザと比べて小さい線幅拡張因子を実現した。またレーザ線幅は低注入領域において 2 MHz の小さい値を示し、量子井戸レーザより狭い線幅を確認した(図 3.2.4)。以上より対称な状態密度分布を持つ量子ドット活性層は狭線幅レーザ実現に非常に有効であることを示した。

図 3.2.4 波長 1.3  $\mu\text{m}$  帯量子ドットレーザ線幅

本成果は、システム側からの多値位相変調を用いた伝送方式の検討(東京大学担当)、デバイス側からの新規デバイス構造の検討、作製技術の開発(富士通担当)を連携して実施することにより達成した。

### 3. 3 ナノ技術を活用した超高速光スイッチ技術（課題ウ）

ナノ構造によって発現する効果を活用することで、切り替え時間が 100 ピコ秒以下の高速光スイッチを、 $1.3\mu\text{m}$  帯を含む通信波長帯において、従来方式\*による場合の 1/100 以下のサイズで実現することを目標とする。（\* 従来方式として、ニオブ酸リチウム結晶を用いる場合を想定）

ピラー型フォトニック結晶ナノ構造（図 3.3.1）のスローライト効果を活用して、100Mb/s（5 ナノ秒以下の応答）で動作する新規な微小スタブ構造の光スイッチを、波長  $1.5\mu\text{m}$  の光通信波長帯において、長さ  $15\mu\text{m} \times$  幅  $4\mu\text{m}$  角（従来の 1/10000 以下の面積。目標の更に 1/100。）でシリコン・チップ上に実現した（図 3.3.2）。本光スイッチは課題エ）で開発する高性能ルーティング装置と共に、シリコン・チップ上に集積化可能である。本成果によって、光パケット通信に必要な速度で動作する、光集積回路化が可能な超高速光スイッチの基盤技術を確認した。

実現した光スイッチは光制御の光スイッチであり、10Mbit/s 程度までは制御光の吸収による熱光学効果で動作するが、それ以上の速度では、フォトニック結晶のスローライト効果で高められた 2 光子吸収によるキャリア発生と、それに伴う屈折率変化が原因と考えられる原理で動作する（図 3.3.3）。光パケット通信に必要な光スイッチの動作速度は 100 ナノ秒以下であると言われており、本光スイッチはその要求速度を十分に満たした（図 3.3.4）。尚 動作実証の波長帯は、 $1.3\mu\text{m}$  帯から、幹系やメトロ系で標準的に用いられる  $1.5\mu\text{m}$  帯に移し、光ネットワーク・ノード装置用光スイッチとしての動作実証の意義を高めた。更に、40Gbit/s の擬似ランダム光信号を用いて、エラーフリー透過も確認し、本光スイッチの高速信号に対する高い適正を実証した（図 3.3.5）。

本成果は、光パケット・スイッチングに十分な 5 ナノ秒の高速動作で 40Gbit/s 高速信号の無歪み透過が可能であり、かつシリコン・チップ上に集積可能な  $1.5\mu\text{m}$  以下の微小光スイッチを、世界で初めて実現したものである。

本成果は、光パケット通信用光スイッチに必要なシステム側からの検討（大阪大学担当）、デバイス側からの新規デバイス構造の検討、作製技術の開発（NEC 担当）を連携して実施することにより達成した。

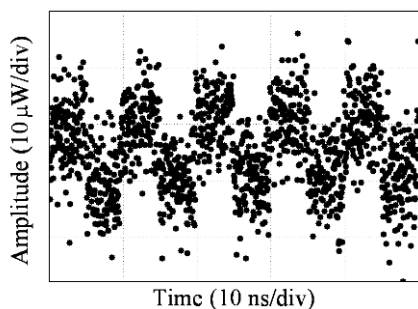
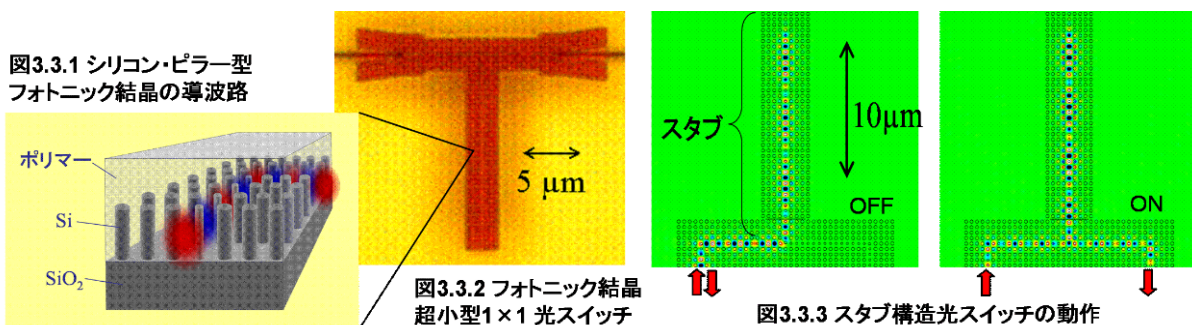


図3.3.4 光スイッチの100Mbit/s動作の実証

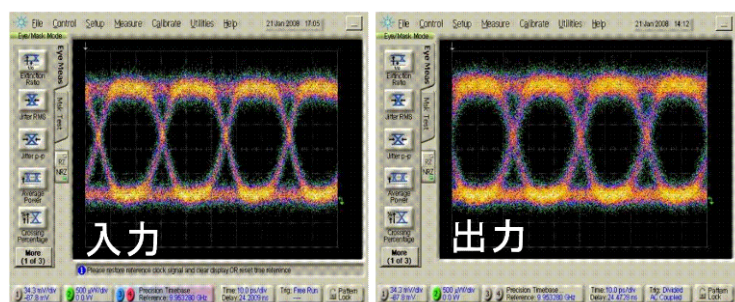


図3.3.5 光スイッチの40Gbit/s光信号のエラーフリー透過の実証

### 3. 4 ナノ技術を活用した高機能ルーティング技術（課題エ）

ナノ構造によって発現する効果を活用することで、光スイッチ、ヘッダ処理用バッファ等を有する光パケットルーターの基本構成（但し、ヘッダ処理は電氣的に行う）に関するプロトタイプを  $1.3\mu\text{m}$  帯を含む通信波長帯において開発する。具体的には、切り替え時間 100 ピコ秒以下の光スイッチ、数 10 ナノ秒程度のデータ待機時間を可能とする光遅延器等との集積化により、OADM等において光パケット単位の経路切り替えが実現できることを示す。開発に当たっては、従来方式\*による場合に比べ 1/1000 の小型化、従来のルーター\*\*に比べ数十分の一程度の低消費電力化を達成することを目標とする。

\* 従来方式として、遅延ファイバを用いる場合を想定

\*\* 従来方式では、光信号を電気に変換してパケット単位のルーティングを行い、再び光信号に戻している。

シリコン・ピラー型フォトニック結晶導波路を用いた超高集積光デバイス技術の活用により、課題ウ)で開発した微小高速光スイッチとシリコン・チップ上にモノリシック集積可能な大きさが約  $30\mu\text{m}$  角の微小パケット OADM フィルタ素子（図 3.4.1）と、2 ナノ秒のデータ待機時間を有する  $5\text{mm}\times 170\mu\text{m}$  のサイズの集積化シリコン細線微小光遅延素子（図 3.4.2）とを開発し、微小 OADM フィルタと微小光遅延器とを含む光パケット OADM 実証回路によって、波長  $1.5\mu\text{m}$  の光通信波長帯で、10Gbit/s 光パケット信号の OADM 動作を実証した。

ヘッダ処理用バッファとなる微小光遅延素子の大きさは、従来方式による直径 10 cm で束ねた長さ 40 cm の光ファイバ遅延線（遅延時間 2 ナノ秒）と比較して、1/10000 の小型化を達成した。この結果から、遅延時間が 20 ナノ秒とし、更に、今回開発した微小パケット OADM フィルタを加える場合を想定しても、従来方式の 1/1000 の小型化が可能であることを実証した。また、今回の実証回路では光・電気・光変換を含まないこととバッファとしての光バッファが電力を消費しないことにより、ルーターに応用した場合も、これらの分の消費電力をゼロできることを実証した。

尚、動作実証の波長帯は、 $1.3\mu\text{m}$  帯から、幹系やメトロ系で標準的に用いられる  $1.5\mu\text{m}$  帯に移し、光ネットワーク・ノード装置用光パケット OADM としての動作実証の意義を高めた。

微小パケット OADM フィルタの開発には、ピラー型フォトニック結晶の導波路が有する導波モードのカットオフをローパスフィルタとして活用し、更に、数  $\mu\text{m}$  角の微小 3 dB カプラーを組み合わせることによって、ドロップ波長帯域の調整が容易なバンドパスフィルタ型のパケット OADM フィルタを実現した。微小共振器と同様に微小な構造でありながらバンドパス特性を有することによってドロップ帯域のフラットトップ化を容易にした（図 3.4.3）。

遅延素子の開発には、多モード・シリコン細線導波路とミラー曲がりとを組み合わせる新規構造を採用し、C 帯全体を含む波長範囲にわたって遅延時間 2 ナノ秒を達成する（図 3.4.4）と共に、 $5\text{mm}\times 170\mu\text{m}$  角の面積に集積化した。この結果は、同じ帯域幅で動作する集積遅延素子としては世界最小の面積で最長の遅延時間を実現したものである。

これらの微小光パケット OADM フィルタ素子と光遅延素子とを含む、光パケット OADM 回路の実験系（図 3.4.5）によって、スルー／アド／ドロップの全てで、10Gbit/s 擬似ランダム光パケット信号のエラーフリー透過を実証した（図 3.4.6）。



本課題に係わる研究開発の遂行に際しては、システム側からの検討によるデバイスの仕様の提示と(大阪大学担当)、デバイス側からの検討による新規デバイス構造の開発、作製を行い(NEC 担当)、最適なデバイス形態の検討を進めると共に、システム評価とデバイス評価を共同で実施するなど、システム-デバイス間連携及び産学間連携の研究体制を最大限に活用した。

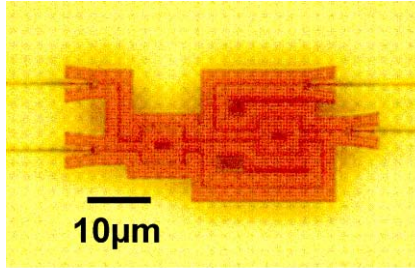


図3.4.1 シリコン・ピラー型  
フォトニック結晶の  
微小パッケージOADMフィルタ素子

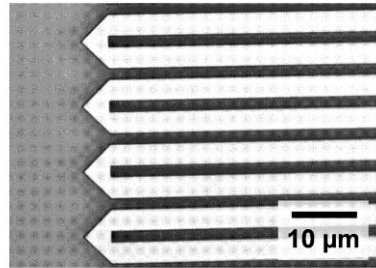


図3.4.2 多モード・シリコン細線  
集積光遅延素子の曲がり部分

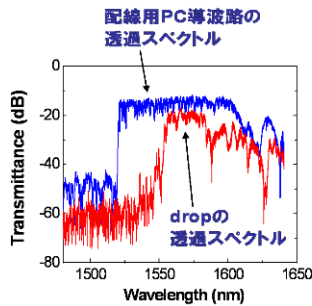


図3.4.3 微小パッケージOADMフィルタ  
素子のバンドパス型ドロップ特性

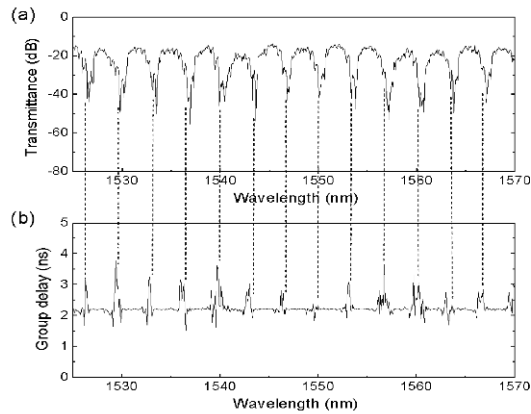


図3.4.4 光遅延素子の(a)透過スペクトルと  
(b)群遅延スペクトル

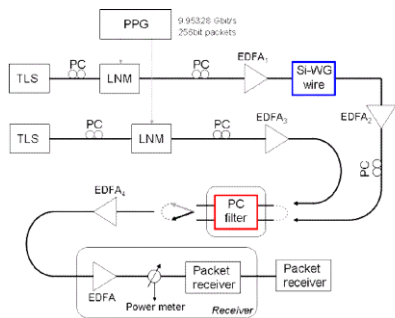


図3.4.5 光パッケージOADM回路の実験系

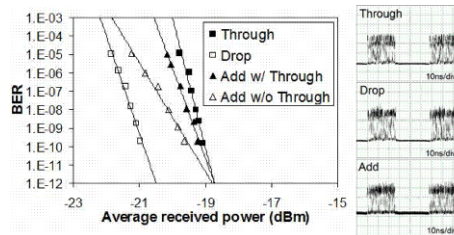


図3.4.6 ビット誤り率測定(左)と観測波形

### 3. 5 ナノ技術を活用した高機能インターフェース技術(課題オ)

40 Gbps 以上に対応する超小型 ONU に用いる超小型光電変換デバイスを開発する。

プラズモンアンテナ構造を世界で初めて多層化合物半導体基板上に積層して作製し、受光感度の各種設計パラメータに対する依存性を検討・最適化することにより高効率化を行い、40Gbps 伝送に対応したナノ光電気変換技術を開発した。プラズモンアンテナ構造と半導体周期積層構造とからなる多層膜を組合せた、新しいナノ光配線構造の動作を FDTD (Finite Difference Time Domain:有限差分時間領域) 法

を用いて解明し、プラズモンアンテナの周期と厚さおよび半導体多層膜構造の膜厚構成を最適化することにより、近接場光の増強効果を大幅に向上する最適パラメータを抽出することで、ナノ光配線構造における光結合効率を大幅に改善する技術を確立した。特に、図 3.5.1 に示すように不必要な領域でのキャリア発生を防ぐため半導体部にメサ構造を導入することで、高周波特性を大きく伸ばすことが可能になった(図 3.5.2)。図 3.5.3 および図 3.5.4 には半導体周期構造によるブラッグ反射構造とその効果を示す。さらに、図 3.5.5 のようにプラズモンアンテナを同心円形状とすることにより、入射光の偏光方向に依存せず高効率を得られることも示した。これらの開発により、一次元周期構造からなるスリットアレイアンテナに比較して、波長帯域を改善した量子効率 80%以上のナノインターフェース構造が得られることを明らかにした。その結果、伝送速度 40Gbps 以上に対応したナノ光電気変換装置の基本技術を確立することができた。

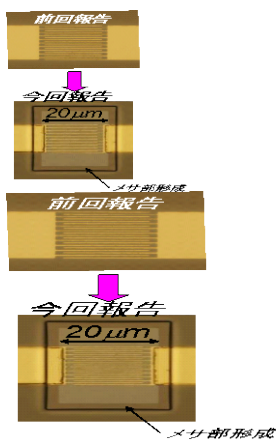


図 3.5.1 半導体上に形成されたプラズモンアンテナと、高速動作用にメサ形成を行ったナノフォトダイオード

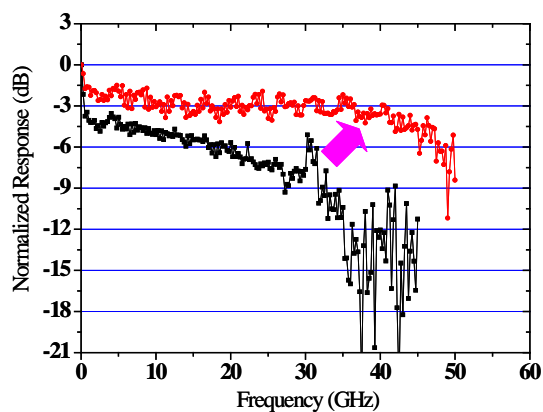


図 3.5.2 プラズモンアンテナを半導体上に形成したナノフォトダイオード(下)と、メサ形成を追加したナノフォトダイオード(上)の周波数応答特性比較

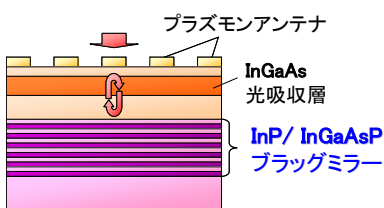


図 3.5.3 ブラッグミラーを追加したナノフォトダイオードの断面構造図

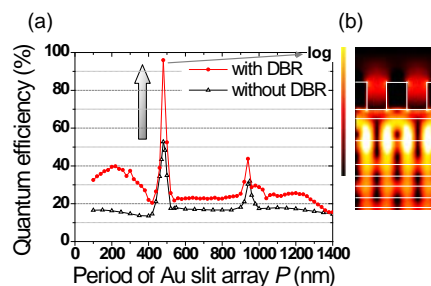


図 3.5.4 ブラッグミラー追加ナノフォトダイオードの電界シミュレーション結果(b)と量子効率のアンテナスリット間隔依存性(a)



図 3.5.5 偏光方向無依存型のナノフォトダイオード

### 3. 6 その他の研究実績「システム像／新ネットワーク機能検討」

本プロジェクトではサブテーマ間の連携を進めるため、プロジェクト内に「ナノ技術を活用した超高機能ネットワーク全体システム像／展開ロードマップ検討委員会」を設置し、本プロジェクトの目指すネットワークの将来システム像とナノ技術展開の時間経過に関する議論を行った。平成17年度には、将来ネットワークシステム技術の主要課題の整理とナノ技術の適用が期待される技術領域の抽出を行っ

た。平成18年度には、各サブテーマで開発している技術との関連によりブレークダウンを行い、議論を進めた。これを基に、特に各サブテーマに関連した、伝送技術・ノード技術に絞って、ナノテクノロジーのネットワーク技術への適用に関して、プロジェクト後の展開を検討し、この内容を平成18年度末に中間報告書にまとめた。平成19年度、平成20年度には、各ナノテクノロジーのネットワーク技術への展開に関しての議論を進め、平成20年度末に最終報告書をまとめた。その成果として、ナノ技術を活用したネットワーク技術のロードマップを図3.6.1に、2025年の伝送装置を図3.6.2、2025年のノード装置を図3.6.3、2025年の光・電気インターフェース装置を図3.6.4にそれぞれ示す。

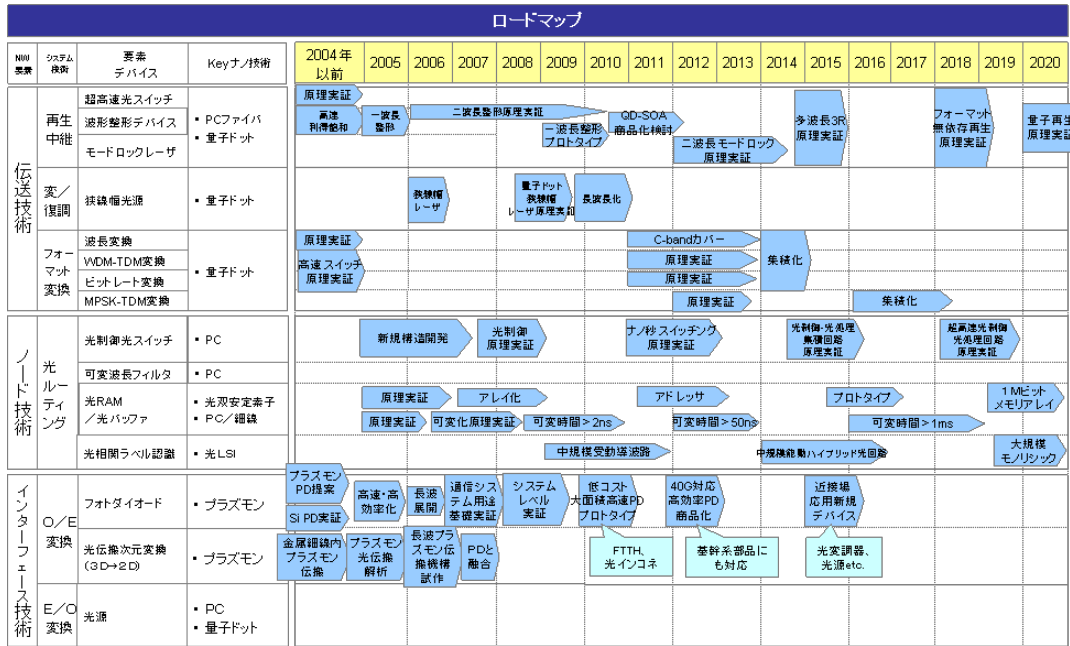
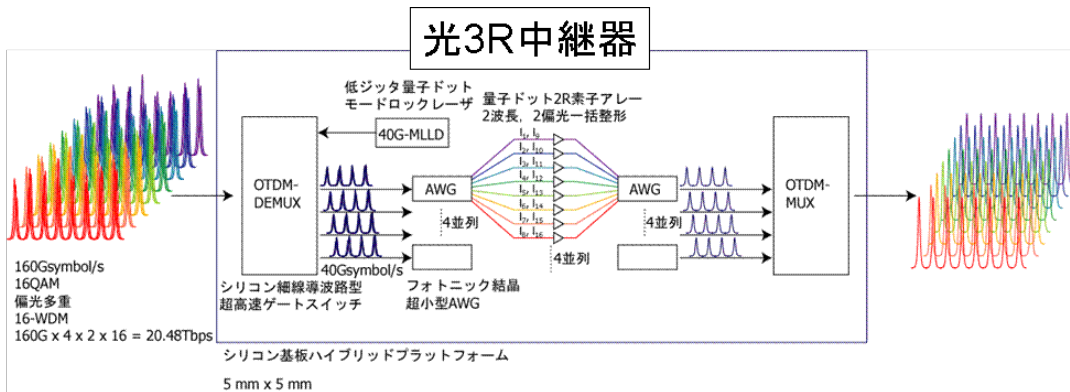


図 3.6.1 ナノ技術を活用したネットワーク技術ロードマップ



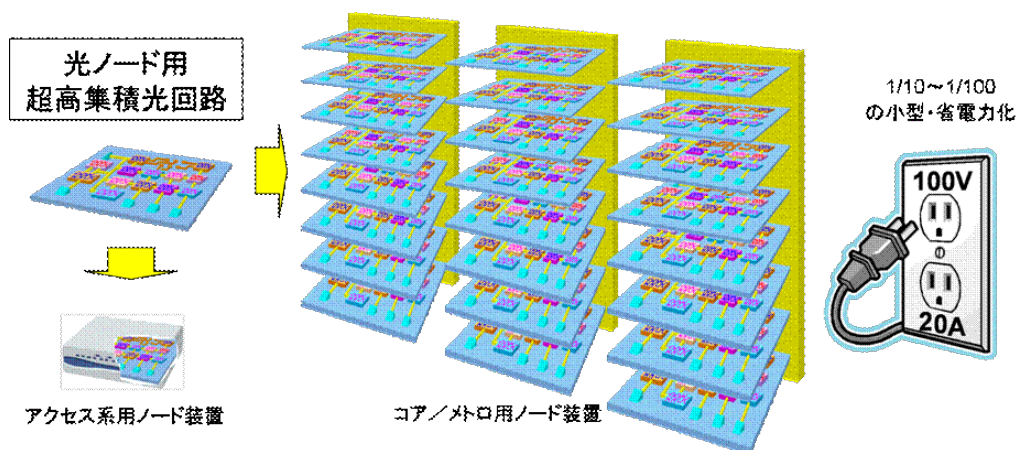
特徴:

1. シンボルレート160Gsymbol/s, 多値変調 (e.g. 16QAM), 偏波多重により1.28Tbit/sの達成
2. 光3Rによる再生中継
3. SCLバンド光増幅, Raman増幅, 広帯域SOAにより帯域100nm以上を確保

特徴:

1. 低シンボルレートによる省電力化
2. 多波長一括光3Rによる低消費電力化

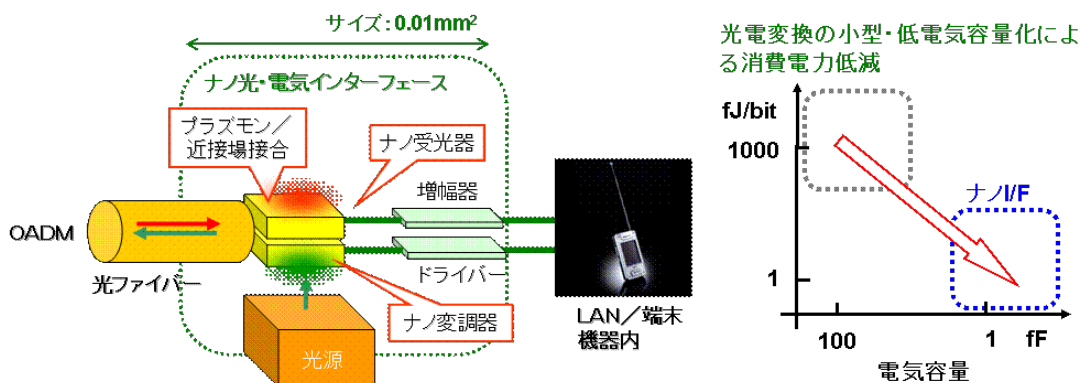
図 3.6.2 2025年の伝送装置



- 特徴(数値):
1. OADMにパケット選択機能を付与することによるOADMの高機能化
  2. Siフォトニック結晶フィルタ、光スイッチ、カップラによる1/10の小型化

- 特徴(数値):
1. Siフォトニック結晶スイッチの導入により1/3の低消費電力化
  2. OADMからパケットOADMへの置換えによる波長資源の~1/10の節約

図 3.6.3 2025 年のノード装置



- 特徴(数値):
1. プラズモン/近接場光利用で受光器、変調器サイズを $10\mu\text{m}$ 台に小型化
  2. 単純な構造で100Gbpsを実現
  3. 低電気容量で増幅器(TIA)、ドライバーの簡素化が可能

- 特徴(数値):
1. 変換部の小型化により低電気容量(1fF以下)し、光电変換・電気光変換全体の消費電力を低減(1fJ/bit以下)

図 3.6.4 2025 年の光・電気インターフェース装置

#### 4 研究成果の更なる展開に向けて

##### 課題ア

量子ドット波形整形素子は、従来の半導体光増幅器では実現できない、波形整形効果を持つ半導体光増幅器である。現在、GPON システムや 100G イーサシステムへの半導体光増幅器の適用が検討されている中、本素子のユニークな波形整形機能が有利に働く期待があり、今後の市場動向に注目しながら

(株)QD レーザ社を通しての製品化の可能性を検討する。今後、波形整形素子の高性能化に向け小型、高均一量子ドット形成技術を継続研究し、ネットワーク機器の小型化、省電力化を目指す。

小型かつ低消費電力の再生中継器の実現に向けて、今後リタイミング機能の開発が求められる。そのキーデバイスとして、低ジッタの多波長モードロックレーザ、超高速ゲートスイッチが必要となるが、本研究における量子ドットレーザおよびシリコンフォトニック結晶による光制御スイッチの開発成果およびそこで得られた知見を、有効に活用できると考えられる。

#### 課題イ

デジタルコヒーレント光受信器に関する最大の課題は、実時間動作のための ASIC の開発である。2008 年にカナダ ノーテル社が、サンプリングレート 23GHz、4 チャンネル AD コンバータを搭載した偏波多重 QPSK 信号処理 ASIC を開発しており、その後、各国で開発競争が激化している。我が国でも、後継プロジェクトにより、更なる多値化に向けた ASIC 開発に着手すべき時期と思われる。

デジタルコヒーレント光受信器を用いた 25Gsymbol/s 偏波多重 QPSK もしくは 12.5Gsymbol/s 偏波多重 16QAM 方式は、次世代 100Gb Ether 用シリアル伝送方式の有力候補と見なされており、遅滞なく研究開発を推進すべきである。

量子ドット狭線幅レーザに関しては量子ドットの狭線幅化に対する有効性を示すことができた。今後は 1.55  $\mu\text{m}$  帯量子ドットの結晶成長技術をさらに改善し、狭線幅レーザ実現に向けた開発を加速、(株)QD レーザ社を出口とした事業化の可能性を検討する。量子ドット狭線幅レーザが実現すれば、多値位相変復調を用いた伝送方式の更なる高効率、大容量化が進むと予想される。

#### 課題ウ

- ・予測できる波及効果：

集積化可能な光制御光スイッチの構造を開発したことにより、本技術を電気制御の光スイッチへと展開できるだけでなく、この光スイッチを含むデバイス自体には電源をもたせず、光ファイバを通じた遠隔操作で光スイッチを ON/OFF できる光ネットワーク用スイッチ・システムへも展開できると考えられる。これは、半パッシブの光スイッチということになり、大幅な省電力化に繋がると考えられる。また、光スイッチ同士を接続して光ロジック回路を構成することが可能となり、これを利用した、光ノード装置の高機能化も期待できる。

本プロジェクトにおける直接的な応用としては、本技術課題ウで開発した光スイッチの技術を技術課題エに適用することによって、パケット OADM 回路の性能向上に寄与する。

- ・今後の研究成果の展開：

近年、シリコンフォトニクスによる光ネットワーク装置の高機能化を目指した研究開発が多く行われるようになった。シリコンフォトニクスに更にフォトニック結晶技術を組み合わせる本研究成果は、そのようなシリコンフォトニクスによる光ノード装置の高機能化、小型化、省電力化を加速するブースター技術と位置づけられる。今後も、システム-デバイス間連携と産学官連携を通して、本研究成果に係わる技術の性能向上と技術改良を継続すると共に、本成果の事業化と普及を図るべく、社内外への技術移転や技術協力を積極的に行っていく予定である。

#### 課題エ

・予測できる波及効果：

現状のネットワークにおいてコアルーターとエッジルーターを合わせたルーターの消費電力は、ネットワーク全体の消費電力の約 90%を占めており、ルーターの低消費電力化が『グリーン ICT』の鍵を握っている。ルーターの全光化はその解決策の切り札として期待されており、パケット OADM は光ルーターの基本構成サブシステムに位置付けられる。今回動作を実証した超小型 OADM デバイスでは、ピラー型フォトニック結晶導波路を用いることにより、①90 度曲がりによって光回路をコンパクトにし、②ローパスフィルタ特性に利用によって超高速信号を無歪みで波長選択する、という効果を利用した。ピラー型フォトニック結晶導波路には更に③スローライトによって回路の短縮や高効率可変動作をする、との特徴があることから、今後、この特徴を更に組み合わせることによって、パケット OADM 回路だけでなく光ネットワーク・ノードの他の機能についても超小型化を進め、最終的には光ルーター装置の必要な全機能の実装を行うと共に、温調デバイスの消費電力低下などによる大幅な省電力化に貢献できるものと考えられる。

・今後の研究成果の展開：

近年、シリコンフォトニクスによる光ネットワーク装置の高機能化を目指した研究開発が多く行われるようになった。シリコンフォトニクスに更にフォトニック結晶技術を組み合わせる本研究成果は、そのようなシリコンフォトニクスによる光ノード装置の高機能化、小型化、省電力化を加速するブースター技術と位置づけられる。今後も、システム-デバイス間連携と産学官連携を通して、本研究成果に係わる技術の性能向上と技術改良を継続すると共に、本成果の事業化と普及を図るべく、社内外への技術移転や技術協力を積極的に行っていく予定である。

#### 課題オ

・予測できる波及効果：

ブロードバンド・ネットワークをベースにしたユビキタス情報化社会が実現されつつある中で、今や家庭あるいは個人レベルでこれまでにない大量の情報伝送を自由に利用する時代に入りつつある。この、アクセスレベルにおける大量の情報伝達には、超大容量光ネットワークの構築とともに、高速・大容量の光信号を扱う低コストで高性能のインターフェース技術の開発が必須である。本研究で開発したナノインターフェース構造および超小型光電気変換技術は、FTTH の将来展開としてのクラウド・コンピューティング時代の ONU(Optical Network Unit)あるいは OLT(Optical Line Terminal)に使われる技術として期待している。

・今後の研究成果の展開

この分野では製造コストの低減が重要であることから、使用する材料および製造プロセスについて柔軟に考慮しながら研究開発を継続したいと考えている。

## 5 査読付き誌上発表リスト

### 課題ア

- [1]Kenichi Kawaguchi, Mitsuru Ekawa, Tomoyuki Akiyama, Haruhiko Kuwatsuka and Mitsuru Sugawara, “Surfactant-related Growth of InAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> Quantum Structures on InP(001) by Metalorganic Vapor-phase Epitaxy”、Journal of Crystal Growth Vol.291 No.1 pp154-159 (2006年5月15日) :
- [2]Kenichi Kawaguchi, Mitsuru Ekawa, Tomoyuki Akiyama, Haruhiko Kuwatsuka and Mitsuru Sugawara, “Controlling Shape of InAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> Quantum Structures on InP for Quantum Dots with 1.55- $\mu$ m Emission”、Journal of Crystal Growth Vol.298C pp558-561 (2007年1月) :

### 課題イ (東京大学)

- [1]D.-S. Ly-Gagnon, K.Katoh, and K. Kikuchi, “Unrepeated transmission of 20-Gbit/s quadrature phase-shift keying signals over 210 km using a homodyne phase-diversity receiver and digital signal processing”、Electron. Lett., vol.41, no.4, pp.59-60 (2005年2月) :
- [2]D.-S. Ly-Gagnon, S. Tsukamoto, K. Katoh, and K. Kikuchi, “Coherent detection of optical quadrature phase-shift keying signals with carrier phase estimation”、J. of Lightwave Technol., vol.24, no.1, pp.12- 21 (2006年1月) :
- [3]S. Tsukamoto, K. Katoh and K. Kikuchi, “Unrepeated transmission of 20-Gbit/s optical quadrature phase-shift keying signal over 200-km standard single-mode fiber based on digital processing of homodyne-detected signal for group-velocity dispersion compensation”、IEEE Photon. Technol. Lett., vol.18, no.9, pp.1016-1018 (2006年5月) :
- [4]S. Tsukamoto, K. Katoh and K. Kikuchi, “Coherent demodulation of optical multilevel phase shift-keying signals using homodyne detection and digital signal processing”、IEEE Photon. Technol. Lett., vol.18, no.10, pp.1131-1133 (2006年5月) :
- [5]K. Kikuchi, “Phase-diversity homodyne detection of multi-level optical modulation with digital carrier phase estimation”、IEEE J. Selected Topics on Quantum. Electron., vol.12, no.4, pp.563-570 (2006年7/8月) :
- [6]K. Kikuchi, “Electronic post-compensation for nonlinear phase fluctuations in a 1000-km 20-Gbit/s optical quadrature phase-shift keying transmission system using the digital coherent receiver”、Optics Express, vol.16, no.2, pp.889-896 (2008年1月) :
- [7]K. Kikuchi and S. Tsukamoto, “Evaluation of sensitivity of the digital coherent receiver”、J. Lightwave. Technol., vol. 26, no. 13, pp.1817-1822 (2008年7月) :
- [8]Y. Mori, C. Zhang, K. Igarashi, K. Katoh, and K. Kikuchi, “Unrepeated 200-km transmission of 40-Gbit/s 16-QAM signals using digital coherent receiver”、Optics Express, Vol. 17 Issue 3, pp.1435-1441 (2009年1月) :
- [9]C. Zhang, Y. Mori, K. Igarashi, K. Katoh, and K. Kikuchi, “Ultrafast operation of digital coherent receivers using their time-division demultiplexing function”、J. Lightwave Technol., vol.27, no.3, pp.224-232 (2009年2月) :
- [10]菊池和朗, “デジタル信号処理を駆使した新しいコヒーレント光通信技術”、レーザー研究、37 巻 3 号, pp.164-170 (2009年3月) :

### 課題イ (富士通)

- [1] Kenichi Kawaguchi, Manabu Matsuda, Mitsuru Ekawa, Tsuyoshi Yamamoto, Haruhiko Kuwatsuka, Mitsuru Sugawara and Yasuhiko Arakawa, “Formation of InAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> quantum dots on vicinal InP(001) for 1.55- $\mu$ m DFB laser applications”、Journal of Crystal Growth Vol.310 No.12 pp2999-3003 (2008年6月1日) :

### 課題ウ

- [1]M. Tokushima, J. J. Vegas Olmos, and K. Kitayama, “Ultracompact Photonic-Waveguide Circuits in Si-Pillar Photonic-Crystal Structures for Integrated Nanophotonic Switches (Invited)”、J. Nanoscience and Nanotechnology (accepted) :

### 課題エ

- [1]N. Kataoka, N. Wada, and K. Kitayama, “Photonic packet-by-packet add/drop multiplexing”, IEEE J. Lightwave Technol. Vol.22 No.11 pp2377-2385 (2004年11月) :
- [2]N. Kataoka, K. Kitayama, N. Wada, and F. Kubota, “Concurrent generation of an optical code label and payload data by use of phase and intensity modulators for all-optical packet switching”, OSA Optics Letters Vol.30 No.19 pp2539-2541 (2005年10月) :
- [3]M. Tokushima, J. Ushida, A. Gomyo, and H. Yamada, “Efficient Transmission Mechanisms for Waveguides with 90° Bends in Pillar Photonic Crystals”, J. Opt. Soc. Am. Vol.B22 No.11 pp2472-2479 (2005年11月) :
- [4]N. Kataoka, N. Wada, F. Kubota, K.Sone, Y. Aoki, H.Miyata, H.Onaka, and K. Kitayama, “Field trial of data-granularity-flexible reconfigurable OADM with wavelength-packet-selective switch”, IEEE J. Lightwave Technol. Vol.24 No.1 pp88-94 (2006年1月) :
- [5]S. Yosima, N. Wada, G. Cincotti, T. Miyazaki, and K. Kitayama, “Multicast-capable optical-code label packet switch: Proposal and its Experimental Demonstration”, Optical Switching and Networking Vol.5 No.1 pp29-37 (2007年11月12日) :
- [6]N. Kataoka, K. Sone, N. Wada, Y. Aoki, H. Miyata, S. Kinoshita, T. Miyazaki, H. Onaka, and K. Kitayama, “Field Trial of 640-Gbit/s-Throughput, Granularity-Flexible Optical Network using Packet-Selective ROADM Prototype,” IEEE J. Lightwave Technol. Vol.27 No.7 pp825-832 (2009年4月1日) :
- [7]M. Tokushima, J. J. Vegas Olmos, and K. Kitayama, “Multimode Si-wire waveguides for integrated optical delay lines”, Electron. Lett. (accepted) :

課題オ

- [1]D. Okamoto, J. Fujikata, K. Nishi, and K. Ohashi, “Numerical Study of Near-Infrared Photodetectors with Surface-Plasmon Antenna for Optical Communication”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.47 pp2921-2923 (2008年4月25日) :

## 6 その他の誌上発表リスト

課題イ

- [1]菊池, “コヒーレント光ファイバ通信の復活”, O plus E, vol.29, no.8, pp.11-15 (2007年8月) :

## 7 口頭発表リスト

課題ア

- [1] T. Akiyama, M. Sugawara, M. Ekawa, K. Kawaguchi, H. Kuwatsuka, H. Sudo, H. Ebe, A. Kuramata, and Y. Arakawa, “Recent Progress of Quantum-Dot Semiconductor Optical Amplifiers”, Optics East 2004 (Philadelphia) (2004年10月25-28日)
- [2] T. Akiyama, K. Kawaguchi, K. Kuwatsuka, M. Sugawara, M. Ekawa, F. Futami, H. Sudo, H. Ebe, A. Kuramata, Y. Arakawa, and S. Watanabe, “A 40-Gb/s Quantum-Dot Regenerative Semiconductor Optical Amplifier with Receiver-Sensitivity Improving Capability of 4 dB at BER of  $10^{-9}$  and High Output Power of  $> 19$  dBm”, 8th International Symposium Conference on Contemporary Photonic Technology 2005 (Tokyo) (2005年1月14日)
- [3]S. Okumura, K. Kawaguchi, T. Akiyama, O. Aoki, H. Kuwatsuka, M. Ekawa, and M. Sugawara, “MOVPE growth of InAs quantum dots on InAlGaAs buffer/(100) InP for multi-wavelength optical regeneration”, JAPAN NANO 2005 (Tokyo) (2005年2月21日)
- [4]T. Akiyama, M. Ekawa, M. Sugawara, K. Kawaguchi, H. Sudo, H. Kuwatsuka, H. Ebe, A. Kuramata, Y. Arakawa, “Quantum Dots for Semiconductor Optical Amplifiers”, Conference on Optical Fiber Communication 2005 (Anaheim) (2005年3月6日)
- [5]秋山知之、河口研一、鎌塚治彦、菅原充、江川満、二見史生、須藤久男、倉又朗人、荒川泰彦、渡辺茂樹 “量子ドット半導体光増幅器による 40Gb/s 信号再生”、2005年春季第52回応用物理学関係連合講演会 (さいたま市) (2005年3月31日)
- [6]T. Akiyama, K. Kawaguchi, M. Ekawa, M. Sugawara, H. Kuwatsuka, H. Sudo, K. Otsubo,



- S.Okumura, A. Uetake, F. Futami, S. Watanabe, “Recent Progress in Quantum-Dot Semiconductor Optical Amplifiers for Optical Signal Processing”, Optical Amplifiers and their applications, (Budapest) (2005年8月8日)
- [7]河口研一、江川満、秋山知之、鍬塚治彦、菅原充、“InP(001)上InAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>量子構造のMOVPE成長”、2005年秋季第66回応用物理学会学術講演会(徳島市)(2005年9月8日)
- [8]秋山知之、二見史生、河口研一、鍬塚治彦、菅原充、江川満、須藤久男、渡辺茂樹、“量子ドット可飽和利得・吸収連鎖構造の波形整形特性と伝送特性改善効果”、2005年秋季第66回応用物理学会学術講演会(徳島市)(2005年9月8日)
- [9]T. Akiyama, “Quantum-Dot Devices for Optical Amplification and Regeneration”, Optical Fiber Conference 2006 (Anaheim) (2006年3月6日)
- [10]河口研一、江川満、秋山知之、鍬塚治彦、菅原充、“微傾斜InP基板を用いたMOVPE成長InAsSb量子構造の形状制御”、2006年秋季第67回応用物理学会学術講演会(草津市)(2006年8月30日)
- [11]奥村滋一、河口研一、江川満、鍬塚治彦、菅原充、“InP(001)基板上InAs量子構造形成への下地組成・歪の効果”、2007年春季第54回応用物理学関係連合講演会(相模原市)(2007年3月29日)
- [12]Kenichi Kawaguchi, Mitsuru Ekawa, Tomoyuki Akiyama, Haruhiko Kuwatsuka and Mitsuru Sugawara, “Controlling Shape of InAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> Quantum Structures on InP for Quantum Dots with 1.55-um Emission”, 13th International Conference on Metal Organic Vapor Phase Epitaxy, (Miyazaki) (2007年5月24日)
- [13]関口茂昭、安岡奈美、奥村滋一、河口研一、江川満、森戸健、菅原充、“InP上コラムナ量子ドットSOAを用いた40Gbps NRZ信号の波形整形”、2009年春季第56回応用物理学会関係連合講演会(つくば市)(2009年4月2日)

課題イ(東京大学)

- [1]菊池、“光変復調—光情報の極限利用のために—”、応用物理学会/日本光学会/微小光学研究グループ 第14回微小光学特別セミナー「今こそ微小光学の基礎」(東京)(2004年6月1-2日)
- [2]菊池、“位相を用いる光変復調方式の新展開”、電子情報通信学会第2種研究会 超高速光ネットワークのための光変復調符号化技術に関する研究会(米沢市)(2004年6月17日)
- [3]D.-S. Ly-Gagnon, K. Katoh, and K. Kikuchi, “Coherent demodulation of differential 8-phase-shift keying with optical phase diversity and digital signal processing”, IEEE LEOS Annual Meeting, Paper WR2 (Rio Grande, Puerto Rico) (Nov.7-11, 2004)
- [4]K. Kikuchi, “Highly functional photonic networks using photonic nanostructure devices”, CPT 2005, Paper G1 (Tokyo) (Jan.12-14, 2005)
- [5]K. Kikuchi, “Ultra-high speed optical signal processing through third-order fiber nonlinearity”, Photonics West, Paper 5725-36 (San Jose) (Jan.22-27, 2005)
- [6]D.-S. Ly-Gagnon, K. Katoh and K. Kikuchi, “Unrepeated 210-km transmission with coherent detection and digital signal processing of 20-Gb/s QPSK signal”, OFC/NFOEC 2005, OTuL4 (Anaheim) (March 6-11, 2005)
- [7]S. Tsukamoto, D.-S. Ly-Gagnon, K. Katoh and K. Kikuchi, “Coherent demodulation of 40-Gbit/s polarization-multiplexed QPSK signals with 16-GHz spacing after 200-km transmission”, OFC/NFOEC 2005, PDP29 (Anaheim) (March 6-11, 2005)
- [8]菊池、D.-S. Ly-Gagnon, “光位相情報の活用を目指した光複素振幅測定システムの構築”、第52回応用物理学関係連合講演会、30p-ZH-5、(さいたま市)(2005年3月29日-4月1日)
- [9]S. Tsukamoto, D.-S. Ly-Gagnon, K. Katoh, and K. Kikuchi, “Demodulation of Co-polarized 20-Gbit/s QPSK signals with 16-GHz spacing after 200-km transmission using coherent detection and digital signal processing”, Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2005), CWO3 (Baltimore, MA) (May 22-27, 2005)
- [10]菊池和朗、D.-S. Ly-Gagnon、塚本聡、“高速デジタル信号処理を用いた多値位相変調信号のホモダイン受信”、電子情報通信学会第2種研究会 第2回超高速光ネットワークのための光変復調符号化技術に関する研究会、(甲府市)(2005年6月16-17日)
- [11]菊池和朗、“位相を用いた光変復調方式の新展開”、第66回応用物理学会学術講演会、8p-ZE-4、(徳

- 島市) (2005年9月7-11日)
- [12]K. Kikuchi, “Recent progress in coherent optical communications and signal processing”, The 4<sup>th</sup> International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON 2005), (Bangkok, Thailand) (Dec. 14-16, 2005)
- [13]菊池和朗, “超高速光ネットワークのための光変復調技術”, レーザー学会学術講演会第26回年次大会, (さいたま市) (2006年2月9-10日)
- [14]S. Tsukamoto, K. Katoh and K. Kikuchi, “Coherent demodulation of optical 8-phase shift-keying signals using homodyne detection and digital signal processing”, Optical Fiber Communication Conference (OFC 2006), OThR5 (Anaheim, CA) (March 5-10, 2006)
- [15]S. Tsukamoto, K. Katoh and K. Kikuchi, “Unrepeated 20-Gbit/s QPSK transmission over 200-km standard single-mode fiber using homodyne detection and digital signal processing for dispersion compensation”, Optical Fiber Communication Conference (OFC 2006), OWB4 (Anaheim, CA) (March 5-10, 2006)
- [16]K. Kikuchi, “Coherent detection of phase-shift keying signals using digital carrier-phase estimation”, Optical Fiber Communication Conference (OFC 2006), OTuI4 (Anaheim, CA) (March 5-10, 2006)
- [17]菊池, “コヒーレント光検波におけるデジタル信号処理技術のインパクト”, 電子情報通信学会通信ソサイエティー第二種研究会「第3回 超高速光ネットワークのための光変復調符号化技術に関する研究会」, (三島市) (2006年6月15-16日)
- [18]K. Kikuchi, “Phase-diversity homodyne receiver for coherent optical communications”, Coherent Optical Technologies and Applications (COTA 2006), Whistler, CThB3 (British Columbia, Canada) (25-30 June 2006)
- [19]S.-Y. Kim and K. Kikuchi, “Ultra long-haul transmission of QPSK DWDM signals using coherent detection”, 電子情報通信学会ソサイエティー大会, B-10-48, (金沢市) (2006年9月19-22日)
- [20]M. Fukase, K. Kikuchi and S.-Y. Kim, “Electronic compensation of nonlinear phase noise in a 1000 km QPSK transmission system using homodyne detection and digital signal processing”, 電子情報通信学会ソサイエティー大会, B-10-49, (金沢市) (2006年9月19-22日)
- [21]S. Tsukamoto, Y. Ishikawa, and K. Kikuchi, “Optical homodyne receiver comprising phase and polarization diversities with digital signal processing”, European Conference on Optical Communication (ECOC 2006), Mo4.2.1 (Cannes, France) (24-28 Sept. 2006)
- [22]K. Kikuchi, “Coherent detection: Born again?”, IEEE LEOS Annual Meeting (LEOS 2006), WP1 (Montreal, QC, Canada) (29 Oct.-2 Nov. 2006)
- [23]菊池和朗, “光通信におけるホモダイン検波技術”, 電子情報通信学会 第3回超高速光エレクトロニクス研究会, (沖縄市) (2006年11月15-16日)
- [24]菊池和朗, “多値光変復調技術”, 電子情報通信学会第1回マイクロ波・ミリ波フォトニクス(MWP)研究会, (ふじみ野市) (2005年11月21日)
- [25]菊池和朗, “コヒーレント光通信と信号処理の展望”, 電子情報通信学会第19回光通信システムシンポジウム, (三島市) (2006年12月1-2日)
- [26]石川, 加藤, 菊池, “直交光デュオバイナリ信号のコヒーレント受信”, 電子情報通信学会総合大会, BS-7-2, (名古屋市) (2007年3月20-23日)
- [27]五十嵐, 加藤, 菊池, “Fabry-Perot 電気光学変調器と光フィルタを用いる 10 GHzピコ秒光パルス列発生”, 電子情報通信学会総合大会, C-4-28, (名古屋市) (2007年3月20-23日)
- [28]K. Kikuchi, M. Fukase, and S.-Y. Kim, “Electronic post-compensation for nonlinear phase noise in a 1000-km 20-Gbit/s optical QPSK transmission system using the homodyne receiver with digital signal processing”, Optical Fiber Communication Conference (OFC 2007), 2007, OTuA2 (Anaheim, CA) (25-29 March 2007)
- [29]S.-Y. Kim and K. Kikuchi, “1,000-km transmission of 20-Gbit/s QPSK-NRZ co-polarized DWDM signals with spectral efficiency of 1 bit/s/Hz using coherent detection”, Optical Fiber Communication Conference (OFC 2007), 2007, OThS4 (Anaheim, CA) (25-29 March 2007)

- [30]K. Kikuchi, “Digital coherent optical receivers”、Conference on Optical Internet (COIN/ACOFT 2007), WeB3-3 (Melbourne, Australia) (24-27 June 2007)
- [31]K. Kikuchi, “Coherent detection of multi-level coded optical signals”、Optoelectronics and Communications Conference/International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication (OECC/IOOC 2007), 11B3-1 (Yokohama, Japan) (9-13 July 2007)
- [32]菊池和朗、“デジタルコヒーレントレーバの最新動向～電氣的等化技術～”、電子情報通信学会第2種研究会、第4回超高速光ネットワークのための光変復調符号化技術に関する研究会、(米沢市) (2007年7月19日)
- [33]K. Kikuchi, “Optical homodyne receiver comprising phase and polarization diversities with digital signal processing”、2007 IEEE/LEOS Summer Topical Meetings, TuA4.5 (Portland, OR, USA) (23-25 July 2007)
- [34]菊池和朗、“コヒーレント光信号処理による分散補償技術”、2007年電子情報通信学会ソサイエティ大会、BCS-2-10、(鳥取市) (2007年9月10-14日)
- [35]S.-Y. Kim and, K. Kikuchi, “1,000-km polarization-interleaved WDM transmission of 20-Gbit/s QPSK signals on the frequency grid with 12.5-GHz channel spacing using digital coherent receiver”、European Conference on optical Communication (ECOC 2007), 8.3.2 (Berlin, Germany16-20) (Sept. 2007)
- [36]K. Kikuchi, Y. Ishikawa and Kazuhiro Katoh, “Coherent demodulation of optical quadrature duobinary signal with spectral efficiency of 4 bit/s/Hz per polarization”、European Conference on optical Communication (ECOC 2007), 9.3.4 (Berlin, Germany16-20) (Sept. 2007)
- [37]C. Zhang, Y. Mori, K. Igarashi, and K. Kikuchi, “Demodulation of 640-Gbit/s Polarization-multiplexed OTDM QPSK Signals using a Digital Coherent Receiver”、in Optical Fiber Communication Conference, OFC 2008, PDP6 (San Diego, CA) (Feb. 2008)
- [38]K. Kikuchi, K. Igarashi, Y. Mori, and Chao Zhang, “Demodulation of 320-Gbit/s optical quadrature phase-shift keying signal with digital coherent receiver having time-division demultiplexing function Optical Fiber Communication Conference (OFC 2008), OTuO4 (San Diego, CA) (Feb. 2008)
- [39]張超、五十嵐浩司、加藤一弘、菊池和朗、“時間多重分離機能を持つデジタルコヒーレント受信器による光 QPSK 信号の復調”、電子情報通信学会総合全国大会、B-10-98、(北九州市) (2008年3月18-21日)
- [40]森洋二郎、五十嵐浩司、加藤一弘、菊池和朗、“デジタルコヒーレント光受信器における適応等化アルゴリズムを用いた搬送波位相推定”、電子情報通信学会総合全国大会、B-10-99、(北九州市) (2008年3月18-21日)
- [41]Y. Mori, K. Igarashi, K. Katoh, and K. Kikuchi, “Decision-feedback carrier-phase estimation for digital coherent optical receivers”、Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2008), WeF-4 (Sydney, Australia) (7-10 July 2008)
- [42]Y. Mori, C. Zhang, K. Igarashi, K. Katoh, and K. Kikuchi, “Unrepeated 200-km Transmission of 40-Gbit 16-QAM signals using digital coherent optical receiver”、Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2008), PDP-4 (Sydney, Australia) (7-10 July 2008)
- [43]菊池和朗、五十嵐浩司、張超、森洋二郎、“光 DEMUX 技術を用いた超高速デジタル・コヒーレント光受信器”、電子情報通信学会第2種研究会、第5回超高速光ネットワークのための光変復調符号化技術に関する研究会、(甲府市) (2008年7月18日)
- [44]K. Kikuchi, “Polarization-demultiplexing algorithm in the digital coherent receiver”、LEOS Summer Topicals, TuC1.1 (Acapulco, Mexico) (21-23 July 2008)
- [45]K. Kikuchi and S.-Y. Kim, “Investigation of nonlinear impairment effects on optical quadrature phase-shift keying signals transmitted through a long-haul system”、LEOS Summer Topicals, WC2.2 (Acapulco, Mexico) (21-23 July 2008)
- [46]K. Kikuchi, “History of coherent optical communication and challenges for the future”、LEOS Summer Topicals, TuC1.1 (Acapulco, Mexico) (21-23 July 2008)
- [47]張超、森洋二郎、五十嵐浩司、加藤一弘、菊池和朗、“光時間多重分離機能によるデジタルコヒーレント受信器の超高速化”、電子情報通信学会光通信システム研究会、(札幌市) (2008年8月28-29日)

- [48]森洋二郎、張超、五十嵐浩司、加藤一弘、菊池和朗、“デジタルコヒーレント光受信器を用いた 10Gsymbol/s, 16-QAM 信号の伝送”、電子情報通信学会光通信システム研究会、(札幌市) (2008年8月28-29日)
- [49]森洋二郎、張超、五十嵐浩司、加藤一弘、菊池和朗、“デジタルコヒーレント受信器を用いた 40Gbit/s, 16-QAM 信号の 200km 無中継伝送”、電子情報通信学会 2008 年ソサイエティ大会、B-10-71、(川崎市) (2008年9月16-19日)
- [50]張超、森洋二郎、五十嵐浩司、加藤一弘、菊池和朗、“デジタルコヒーレント受信器による 480-Gbit/s OTDM-8PSK 信号の復調”、電子情報通信学会 2008 年ソサイエティ大会、B-10-72、(川崎市) (2008年9月16-19日)
- [51]C. Zhang, Y. Mori, K. Igarashi, K. Katoh, and K. Kikuchi, “Demodulation of 480-Gbit/s 8PSK OTDM signal with digital coherent receiver”、European Conference on Optical Communication (ECOC 2008), Paper Mo.4.D.6 (Brussels, Belgium) (21-25 Sept. 2008)
- [52]K. Kikuchi, “Coherent transmission systems,” Tutorials, European Conference on Optical Communication (ECOC 2008) (Brussels, Belgium) (21-25 Sept. 2008)
- [53]Y. Mori, C. Zhang, K. Igarashi, K. Katoh, and K. Kikuchi, “Transmission of 40-Gbit/s 16-QAM signal over 100-km standard single-mode fiber using digital coherent optical receiver”、European Conference on Optical Communication (ECOC 2008), Tu.1.E.4 (Belgium, Brussels) (21-25 Sept. 2008)
- [54]C. Zhang, Y. Mori, K. Igarashi, K. Katoh, and K. Kikuchi, “Demodulation of 1.28-Tbit/s polarization-multiplexed 16-QAM signals on a single carrier with digital coherent receiver”、Optical Fiber Communication Conference (OFC 2009), OTuG3 (San Diego, CA, USA) (22-26 Feb. 2009)
- [55]Y. Mori, C. Zhang, K. Igarashi, K. Katoh, and K. Kikuchi, “Phase-noise tolerance of optical 16-QAM signals demodulated with decision-directed carrier-phase estimation”、Optical Fiber Communication Conference (OFC 2009), OWG7 (San Diego, CA, USA) (22-26 Feb. 2009)
- [56]菊池和朗、“多値光変復調を用いた大容量光伝送技術の動向”、電子情報通信学会 2009 年総合大会、CS-9-1、(松山市) (2009年3月17-20日)

#### 課題イ (富士通)

- [1]M. Matsuda, K. Kawaguchi, A. Uetake, H. Kuwatsuka, M. Ekawa, T. Yamamoto, M. Sugawara, and Y. Arakawa, “1.55- $\mu\text{m}$ -Wavelength  $\lambda/4$ -Shifted DFB Lasers with High-Density InAsSb Quantum-Dot Active Layers,” 12th Optoelectronics and Communications Conference/16th International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication(OECC/IOOC2007), (横浜市) (2007年7月13日)
- [2]河口研一、松田学、江川満、植竹理人、鋤塚治彦、山本剛之、菅原充、荒川泰彦、“DFB レーザ応用に向けた微傾斜 InP 基板上 InAsSb 量子ドットの MOVPE 成長”、2007 年秋季 第 68 回応用物理学会学術講演会 (札幌市) (2007年9月6日)
- [3]松田学、河口研一、植竹理人、鋤塚治彦、江川満、山本剛之、菅原充、荒川泰彦、“高密度 InAsSb 量子ドットを有する 1.55  $\mu\text{m}$  帯  $\lambda/4$  シフト DFB レーザ”、2007 年秋季 第 68 回応用物理学会学術講演会 (札幌市) (2007年9月7日)
- [4] 河口研一、松田学、江川満、山本剛之、田中有、菅原充、荒川泰彦、“InP(001)上近接積層量子ドットの MOVPE 成長と DFB レーザの作製”、2008 年秋季 第 69 回応用物理学会学術講演会 (春日井市) (2008年9月2日)

#### 課題ウ

- [1]徳島正敏、“超小型ピラー型フォトニック結晶マッハツェンダー干渉計”、電子情報通信学会 2009 年ソサイエティ大会 (神奈川県川崎市) (2008年9月19日)
- [2]M. Tokushima, “Ultra-Compact Photonic-Crystal-Based Tuneable Mach-Zehnder Interferometer for Low-Power Integrated Optical Switches”、34th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC2008) (ブリュッセル (ベルギー)) (2008年9月25日)

#### 課題エ

- [1]N. Kataoka, K. Kitayama, N. Wada, F. Kubota, K. Sone, H. Miyata, and H. Onaka, “Demonstration of data granularity-adjustable ring network using wavelength-tunable and packet-selective OADM”、

- the European Conference on Optical Communication 2004 (ECOC 2004) (ストックホルム (スウェーデン)) (2004年9月5日)
- [2] 徳島正敏、牛田淳、五明明子、白根昌之、山田博仁、“2次元フォトニック結晶導波路曲がりの光透過メカニズム”、電子情報通信学会フォトニックネットワーク/光エレクトロニクス/光ファイバ応用技術/レーザ・量子エレクトロニクス合同研究会 (大阪府) (2005年1月26日)
- [3] 牛田淳、五明明子、篠田啓介、徳島正敏、“Micro Optical Filter in Photonic Crystal for Optical Add Drop Multiplexer”、文部科学省 ナノテクノロジー総合シンポジウム (JAPAN NANO) (東京都) (2005年2月21日)
- [4] M. Tokushima, J. Ushida, and A. Gomyo, “Waveguides in Pillar Photonic Crystals for Integrated Optical Buffers”、International Symposium on Quantum Dots and Photonic Crystals 2005 3 ISQDPC 2005 (東京都) (2005年3月8日)
- [5] J. Ushida, A. Gomyo, and M. Tokushima, “Design of Optical Filer in Rod-type Photonic Crystal Slab”、International Symposium on Quantum Dots and Photonic Crystals 2005 (ISQDPC 2005) (東京都) (2005年3月8日)
- [6] N. Kataoka, N. Wada, F. Kubota, K. Sone, Y. Aoki, H. Miyata, H. Onaka, and K. Kitayama, “Field trial of granularity-flexible ROADM with wavelength-Packet-selective switch using concurrent generation technique of optical code label and payload data”、the Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference 2005 (OFC/NFOEC 2005) (アナハイム (米国)) (2005年3月9日)
- [7] M. Tokushima, “Experimental Demonstration of Waveguides in Arrayed-Rod Photonic Crystals for Integrated Optical Buffers”、the Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference 2005 (OFC/NFOEC 2005) (アナハイム (米国)) (2005年3月9日)
- [8] 徳島正敏、牛田淳、五明明子、白根昌之、“ロッド型正方格子フォトニック結晶導波路における単純直角曲がりの高透過率条件の解析”、応用物理学会 春季応用物理学関係連合講演会 (さいたま市) (2005年3月30日)
- [9] 牛田淳、五明明子、徳島正敏、“ロッド型フォトニック結晶スラブを用いた波長フィルターの設計”、応用物理学会 春季応用物理学関係連合講演会 (さいたま市) (2005年3月30日)
- [10] M. Tokushima, J. Ushida, and A. Gomyo, “Waveguides in Pillar Photonic Crystals for Integrated Optical Buffers”、International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures (PECS VI) (クレタ (ギリシャ)) (2005年6月23日)
- [11] J. Ushida, A. Gomyo, and M. Tokushima, “Design of Optical Filer in Rod-type Photonic Crystal Slab”、International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures (PECS VI) (クレタ (ギリシャ)) (2005年6月23日)
- [12] M. Tokushima, J. Ushida, and A. Gomyo, “Pillar Photonic Crystal Waveguides for Integrated Optical Buffers”、Int. Quantum Electronics Conference (IQEC) 2005 and the Pacific Rim Conf. on Lasers & Electro-Optics (CLEO-PR) 2005 (東京都) (2005年7月13日)
- [13] J. Ushida, A. Gomyo, and M. Tokushima, “Micro Optical Filter in Rod-type Photonic Crystal Slab for optical add drop multiplexer”、Int. Quantum Electronics Conference (IQEC) 2005 and the Pacific Rim Conf. on Lasers & Electro-Optics (CLEO-PR) 2005 (東京都) (2005年7月13日)
- [14] M. Tokushima, J. Ushida, A. Gomyo, and K. Shinoda, “Optical Properties of Line-Defect Waveguides in Square-Lattice-of-Pillars Photonic Crystals for Optical Buffer Application”、2005 International Conference on Solid State Devices & Materials (SSDM) (神戸市) (2005年9月14日)
- [15] N. Kataoka, N. Wada, K. Sone, Y. Aoki, H. Miyata, S. Kinoshita, H. Miyata, H. Onaka, K. Kitayama, “40 Gbit/s Packet-Wavelength-Selective, Reconfigurable Optical Add/drop Multiplexing Using Label-Selectivity-Enhanced Optical En/Decoder and Wide-Passband AOTF”、the Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference 2005 (OFC/NFOEC 2005) (アナハイム (米国)) (2005年3月7日)
- [16] 片岡伸元、曾根恭介、和田尚也、青木泰彦、宮田英之、尾中寛、北山研一、“データ粒度可変光波長/パケット分岐挿入ノードフィールド実験”、PN/OCS/CS 研究会 (沖縄) (2005年5月)

- [17]五明明子, 牛田淳, 徳島正敏, “ロッド型フォトニック結晶のスラブ導波路モードギャップを利用した光分波器”、応用物理学会 2006 年春季応用物理学関係連合講演会 (東京都) (2006 年 3 月 22 日)
- [18]牛田淳, 五明明子, 徳島正敏, “Si 細線導波路からなる方向性結合器の理論解析”、応用物理学会 春季応用物理学関係連合講演会 (東京都) (2006 年 3 月 22 日)
- [19]徳島正敏, 牛田淳, 五明明子, “ピラー型フォトニック結晶導波路の群遅延測定”、電子情報通信学会 総合大会 (東京都) (2006 年 3 月 27 日)
- [20]片岡伸元, 和田尚也, 曾根恭介, 青木泰彦, 宮田英之, 木下進, 尾中寛, 北山研一, “40 Gbit/s データ粒度可変光パケット/波長分岐挿入ノード実験”、電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会 (稚内) (2006 年 8 月)
- [21]N. Kataoka, K. Sone, N. Wada, Y. Aoki, H. Miyata, S. Kinoshita, T. Miyazaki, H. Onaka, and K. Kitayama, “Field Trial of 640Gbit/s-Throughput, Granularity-Flexible, 3-node Optical Network using Packet-Selective ROADM Prototypes”、the European Conference on Optical Communication 2006 (ECOC 2006) (カンヌ (フランス)) (2006 年 9 月 24 日)
- [22]K. Kitayama, N. Kataoka, S. Yoshima, N. Wada, H. Onaka, and G. Cincotti, “Optical Code Label Switching and its Applications (Invited)”、the International Conference on Photonics in Switching 2006 (PS 2006) (クレタ (ギリシャ)) (2006 年 10 月)
- [23]H. Furukawa, N. Wada, H. Harai, M. Naruse, H. Ohtsuki, T. Miyazaki, K. Ikezawa, A. Tohyama, N. Itoh, H. Shimizu, H. Fujinuma, H. Iizuka, G. Cincotti, and K. Kitayama, “IP over Optical Packet Switched Network”、The 12th OptoElectronics and Communications Conference and 16th International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication (OECC/IOOC 2007) (横浜市) (2007 年 7 月 9 日)
- [24]N. Kataoka, K. Sone, N. Wada, Y. Aoki, H. Miyata, S. Kinoshita, T. Miyazaki, H. Onaka, and K. Kitayama, “Wavelength-Packet-Selective ROADM-Enabled Granularity-Flexible WDM Network”、2007 International Conference on Photonics in Switching (PS2007) (サンフランシスコ (米国)) (2007 年 8 月)
- [25]Y. Awaji, S. Koh, and K. Kitayama, “Novel Transparent Optical-code-based Label Swapping Technique Using Multiport Encoder/Decoder”、2007 International Conference on Photonics in Switching (PS2007) (サンフランシスコ (米国)) (2007 年 8 月)
- [26]H. Furukawa, N. Wada, H. Harai, Y. Awaji, M. Naruse, H. Ohtsuki, T. Miyazaki, K. Ikezawa, A. Tohyama, N. Itoh, H. Shimizu, H. Fujinuma, H. Iizuka, E. Kong, P. Chan, R. Man, G. Cincotti, and K. Kitayama, “Demonstration of Contention Resolution and 100 km Transmission for IP over 80 Gbit/s (81 x 10 Gbit/s) Colored Optical Packet Switching Network using 160 Gbit/s Through-put Optical Packet Switch Prototype with Fiber-Delay-Line Buffer and Transient-Response-Suppressed EDFA”、33rd European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC2007) (ベルリン (ドイツ)) (2007 年 9 月 16 日)
- [27]N. Kataoka, N. Wada, G. Cincotti, K. Kitayama, and T. Miyazaki, “A Novel Multiplexed Optical Code Label Processing with Huge Number of Address Entry for Scalable Optical Packet Switched Network”、33rd European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC2007) (ベルリン (ドイツ)) (2007 年 9 月 16 日)
- [28] N. Kataoka, K. Sone, N. Wada, Y. Aoki, S. Kinoshita, H. Onaka, T. Miyazaki, and K. Kitayama, “Experimental Demonstration of Multicast-Capable Variable Bandwidth Colored Switching Using SOA Switch and Stacked OC Label Processing”、Optical Fiber Communication Conference (OFC2008) (サンディエゴ (米国)) (2008 年 2 月)
- [29]G. Hayashi, Y. Awaji, N. Wada, G. Cincotti, T. Miyazaki, and K. Kitayama, “Demonstration of multi-hop transparent optical code label swapping by self-seed pulse technique using a multi-port en/decoder”、Optical Fiber Communication Conference (OFC2008) (サンディエゴ (米国)) (2008 年 2 月)
- [30]片岡伸元, 和田尚也, G. Cincotti, 北山研一, 宮崎哲弥, “光パケットネットワークにおけるアドレス空間拡張多重光符号ラベル処理”、電子情報通信学会 フォトニックネットワーク研究会 (大阪府) (2008 年 1 月)
- [31]徳島正敏, “ピラー型フォトニック結晶を用いた導波路スタブの透過特性”、2008 年春季 第 55 回応

用物理学関係連合講演会（千葉県船橋市）（2008年3月27日）

- [32] 徳島正敏, ベガス オルモス ホアン ホセ, 北山研一, “フォトニックノードの超高機能化に向けたフォトニック結晶シリコン光回路デバイス（招待講演）”、電子情報通信学会 2009年総合大会（愛媛県松山市）（2009年3月18日）
- [33] 徳島正敏, ベガス オルモス ホアン ホセ, 北山研一, “多モードSi細線導波路を用いた集積光遅延素子”、2009年春季第56回応用物理学関係連合講演会（茨城県つくば市）（2009年4月1日）
- [34] J. J. Vegas Olmos, K. Kitayama, and M. Tokushima, “Packet Switching Demonstrator Using an Integrated and Pigtailed Add-Drop Filter based on Photonic Crystal Structures”、the 29th Conference on Lasers and Electro Optics and the 27th International Quantum Electronics Conference (CLEO/IQEC 2009)（メリーランド州ボルチモア（米国））（2009年6月2日）

課題オ

- [1] K. Ohashi, K. Ohashi, J. Fujikata, T. Ishi, D. Okamoto, K. Makita, and K. Nishi, “Development and Applications of a Si Nano-Photodiode with a Surface Plasmon Antenna (Invited)”、Asia-Pacific Optical Communications Conference 2006 (APOC 2006)（ソウル（韓国））（2006年9月3日）
- [2] K. Nishi, J. Fujikata, T. Ishi, D. Okamoto, K. Makita, and K. Ohashi, “Development of Si Nano-Photodiodes with a Surface Plasmon Antenna”、International Symposium on Contemporary Photonics Technology 2007 (CPT 2007)（東京都）（2007年1月10日）
- [3] 岡本大典, 藤方潤一, 牧田紀久夫, 西研一, “1次元プラズモンアンテナを用いた光通信波長帯ナノフォトダイオード”、2006年秋季第67回応用物理学学会学術講演会（滋賀県草津市）（2006年8月29日）
- [4] 岡本大典, 藤方潤一, 西研一, 大橋啓之, “プラズモンアンテナによる光通信波長帯ナノフォトダイオードの高効率化”、2007年春季第54回応用物理学関係連合講演会（神奈川県相模原市）（2007年3月27日）
- [5] 岡本大典, 藤方潤一, 西研一, 大橋啓之, “1次元プラズモンアンテナを用いた光通信波長帯ナノフォトダイオードの解析”、ナノオプティクス研究グループ第15回研究討論会（浜松市）（2006年7月20日）
- [6] D. Okamoto, J. Fujikata, K. Nishi, and K. Ohashi, “Application of Surface-Plasmon Antenna to Near-Infrared Photodetectors for Optical Communication”、2007 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2007)（茨城県つくば市）（2007年9月18日）
- [7] 岡本大典, 藤方潤一, 西研一, 大橋啓之, “プラズモンアンテナとブラッグミラーを組み合わせた高効率ナノフォトダイオード”、2007年秋季第68回応用物理学学会学術講演会（北海道札幌）（2007年9月4日）
- [8] Keishi Ohashi and Junichi Fujikata, “Photodetector Using Surface-Plasmon Antenna for Optical Interconnect”、Mater. Res. Soc. (MRS) 2008 Fall Meeting（マサチューセッツ州ボストン（米国））（2008年12月1日）
- [9] 岡本大典, 藤方潤一, 大橋啓之, “プラズモンアンテナを用いた高効率な通信波長帯ナノフォトダイオード”、日本光学会ナノオプティクス研究グループ第17回研究討論会 第6回プラズモニクスシンポジウム（茨城県つくば市）（2008年6月26日）
- [10] K. Ohashi, “Plasmonic Coupling for Photonic Device Shrink”、MIT Microphotonics Center Fall Meeting 2008（マサチューセッツ州ケンブリッジ（米国））（2008年11月20日）
- [11] 大橋啓之, “シリコンナノフォトダイオード”、光エレクトロニクス第130委員会、第263回研究会（東京都新宿区）（2008年11月10日）
- [12] 大橋啓之, “LSIチップ光配線”、応用物理学学会関西支部、平成20年度第2回講演会（大阪市）（2009年1月30日）

## 8 出願特許リスト

課題ア

- [1] 奥村滋一, 光半導体装置とその製造方法、日本、2005年2月18日
- [2] 河口研一, 半導体量子ドット装置、日本、2005年12月22日

- [3]河口研一、SEMICONDUCTOR DEVICE WITH ANISOTROPY-RELAXED QUANTUM DOTS、米国、2006年3月28日
- [4]秋山知之、光伝送システム、日本、2006年3月31日
- [5]秋山知之、OPTICAL TRANSMISSION SYSTEM、米国、2006年10月4日
- [6]秋山知之、OPTICAL TRANSMISSION SYSTEM、英・独・仏(EPC)、2006年10月5日
- [7]大坪孝二、光波形整形素子、日本、2007年2月20日
- [8]大坪孝二、光波形整形素子、日本、2007年8月23日
- [9]鍬塚治彦、光波形整形装置及び光波形整形素子、日本、2007年12月25日
- [10]大坪孝二、OPTICAL WAVEFORM RESHAPING DEVICE、米国、2008年2月19日

課題イ

- [1]河口研一、鍬塚治彦、量子ドット半導体レーザ、日本、2007年8月1日

課題ウ

- [1]徳島正敏、「光制御素子」、日本(米国)、2007年1月10日
- [2]徳島正敏、「フォトニック結晶体」、日本(米国)、2008年1月11日
- [3]徳島正敏、「1×2光スイッチ」、日本(米国)、2008年2月7日
- [4]徳島正敏、「光スイッチ」、日本(米国)、2008年3月7日
- [5]徳島正敏、「光スイッチ」、日本(米国)、2008年8月14日
- [6]徳島正敏、「光スイッチ」、日本(米国)、2008年8月14日
- [7]徳島正敏、「光スイッチ」、日本(米国)、2008年12月26日

課題エ

- [1]片岡伸元、北山研一、和田伸元、「光符号付き光パケット生成方式、及び装置」、日本、2005年4月
- [2]徳島正敏、「導波路の結合構造」、日本(米国)、2005年12月27日
- [3]徳島正敏、「偏光回転器及びその製造方法」、日本(米国)、2006年12月1日
- [4]徳島正敏、「光変換器およびその製造方法」、日本(米国)、2006年12月1日
- [5]徳島正敏、「フォトニック結晶体(導波路の曲がり構造)」、日本(米国)、2007年10月1日
- [6]徳島正敏、「フォトニック結晶体(導波路のT分岐構造)」、日本(米国)、2007年10月1日
- [7]徳島正敏、「フォトニック結晶体(導波路の交差構造)」、日本(米国)、2007年10月1日
- [8]徳島正敏、「光結合器および光集積回路」、日本(米国)、2008年1月31日
- [9]徳島正敏、「光導波路」、日本(米国)、2008年2月28日
- [10]徳島正敏、「光結合器および光集積回路」、日本(米国)、2008年3月31日
- [11]徳島正敏、「フォトニック結晶体」、日本(米国)、2008年6月12日
- [12]牛田淳、徳島正敏、「導波路接続構造」、日本(米国)、2008年7月25日
- [13]徳島正敏、「波長フィルター」、日本(米国)、2008年12月26日

課題オ

- [1]藤方潤一、岡本大典、牧田紀久夫、西研一、大橋啓之、「フォトダイオード、光通信デバイス、光インターコネクションモジュール」、日本、2006年12月20日
- [2]岡本大典、藤方潤一、西研一、大橋啓之、「フォトダイオード」、日本、2006年12月14日
- [3]岡本大典、藤方潤一、西研一、「半導体受光素子及び光通信デバイス」、日本、2008年1月10日
- [4]藤方潤一、辰巳徹、田邊顕人、牛田淳、岡本大典、西研一、「SiGeフォトダイオード」、日本、2008年3月7日
- [5]岡本大典、藤方潤一、「半導体受光素子、光通信デバイス、光インターコネクトモジュール」、日本、2008年8月18日



## 9 取得特許リスト

[1]秋山知之、OPTICAL TRANSMISSION SYSTEM、米国、2006年10月4日、2008年10月28日、7443574

## 10 国際標準提案リスト

(無し)

## 11 参加国際標準会議リスト

(無し)

## 12 受賞リスト

課題オ

[1]岡本大典、日本光学会分科会ナノオプティクス研究会 ナノオプティクス賞、“プラズモンアンテナを用いた高効率な光通信波長帯ナノフォトダイオード”、2008年6月27日

## 13 報道発表リスト

課題ア

[1] “毎秒 40 ギガビットで波形整形”、日刊工業新聞、2005年2月9日(水)

[2] “毎秒 40G ビットの高速信号を波形整形できる半導体光増幅器を開発”、電波新聞、2005年3月24日(木)

課題ウ

[1] “光スイッチ、大きさ 1/1000 に 「結晶」で屈折率制御 消費電力も 9 割削減”、日経産業新聞、2008年9月24日

[2] “New Technology 小型で低電力の光スイッチ素子 「フォトニック結晶」の活用で実現”、EE Times Japan no. 41、2008年11月号

## 14 ホームページによる情報提供

課題ウ

[1]・URL : <http://www.nec.co.jp/press/ja/0809/2402.html>

・掲載情報の概要：「スローライト」を作り出すフォトニック結晶を用いた光通信の光スイッチ技術を開発 ～従来比サイズ 1/1,000・消費電力 1/10 を実現する先進ナノテクノロジー～

・ヒット数（終了報告書作成時点）： 3,627 件

課題ウ、エ、オ

[1]・URL : <http://www.nec.co.jp/rd/event/nanotech2008/nanotech2008pamphlet.pdf>

・掲載情報の概要：シリコンフォトニクスに加えて、フォトニック結晶やプラズモンアンテナ等のナノフォトニクスを活用し、光集積回路の一層の小型・省電力化を目指す。

・ヒット数（終了報告書作成時点）： 1,614 件

## 研究開発による成果数

	平成 16 年度	平成 17 年度	平成 18 年度	平成 19 年
査読付き誌上発表数	2 件 (2 件)	4 件 (4 件)	6 件 (6 件)	1 件 (1 件)
その他の誌上発表数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	1 件 (0 件)
口 頭 発 表 数	23 件 (15 件)	21 件 (12 件)	23 件 (9 件)	27 件 (17 件)
特 許 出 願 数	1 件 (0 件)	5 件 (1 件)	8 件 (2 件)	15 件 (1 件)
特 許 取 得 数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
国 際 標 準 提 案 数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
国 際 標 準 獲 得 数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
受 賞 数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
報 道 発 表 数	2 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)

	平成 20 年度	合計	(参考) 提案時目標数
査読付き誌上発表数	9 件 (8 件)	22 件 (21 件)	18 件 (18 件)
その他の誌上発表数	0 件 (0 件)	1 件 (0 件)	0 件 (0 件)
口 頭 発 表 数	27 件 (14 件)	121 件 (67 件)	37 件 (18 件)
特 許 出 願 数	7 件 (0 件)	36 件 (4 件)	20 件 (2 件)
特 許 取 得 数	1 件 (0 件)	1 件 (0 件)	12 件 (0 件)
国 際 標 準 提 案 数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
国 際 標 準 獲 得 数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
受 賞 数	1 件 (0 件)	1 件 (0 件)	0 件 (0 件)
報 道 発 表 数	2 件 (0 件)	4 件 (0 件)	4 件 (0 件)

注 1 : (括弧)内は、海外分を再掲。

注 2 : 「査読付き誌上発表数」には、論文誌や学会誌等、査読のある出版物に掲載された論文等を計上する。学会の大会や研究会、国際会議等の講演資料集、アブストラクト集、ダイジェスト集等、口頭発表のための資料集に掲載された論文等は、下記「口頭発表数」に分類する。

注 3 : 「その他の誌上発表数」には、専門誌、業界誌、機関誌等、査読のない出版物に掲載された記事等を計上する。