



超高速波長ルーティング集積回路 (071503009)

Ultrafast Wavelength Routing Photonic Integrated Circuit

研究代表者 國分泰雄
研究分担者 荒川太郎, カトフ・レドワン
横浜国立大学 大学院工学研究院

発表内容

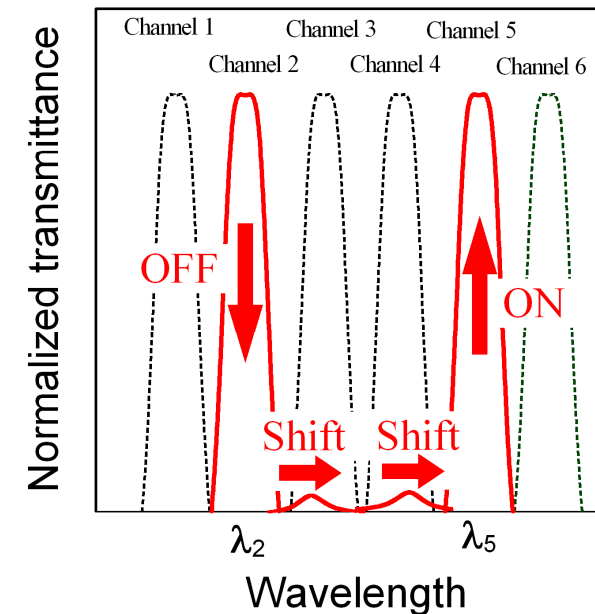
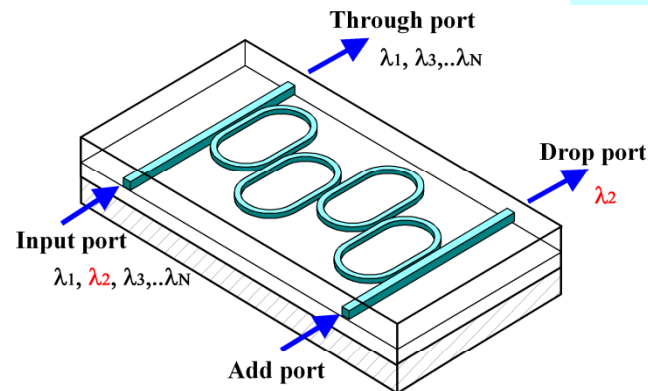
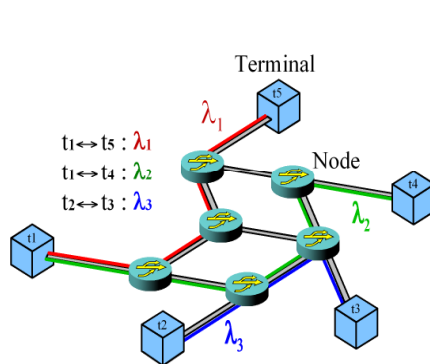
1. 研究目的
2. 誘電体マイクロリング波長選択スイッチ回路
3. 半導体マイクロリング波長選択スイッチ回路

本研究の背景と目的

メッシュ型次世代
フォトニックネットワーク

ROADMが必須

マイクロリング型
ヒットレス波長選択スイッチ



開始前: 誘電体マイクロリング型波長選択スイッチ

課題:

- ① 多波長, 多ポート集積化が未達成
- ② 熱光学効果 → 消費電力 ~ 数10 mW
スイッチング時間 ~ 0.1 ms

本研究の目的

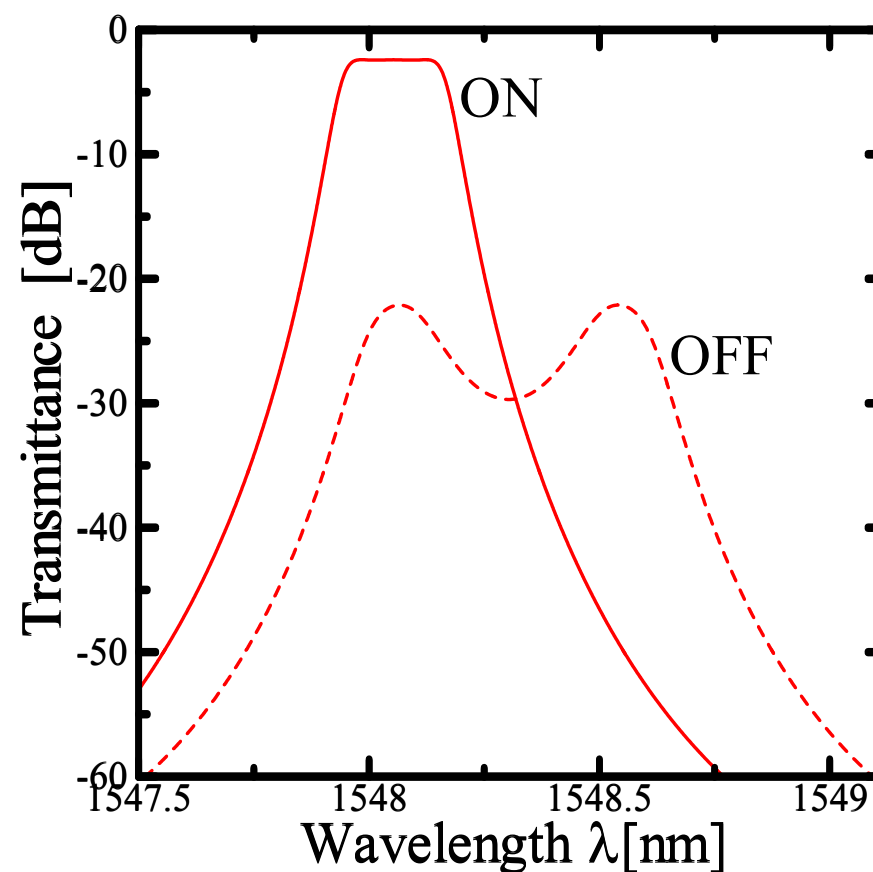
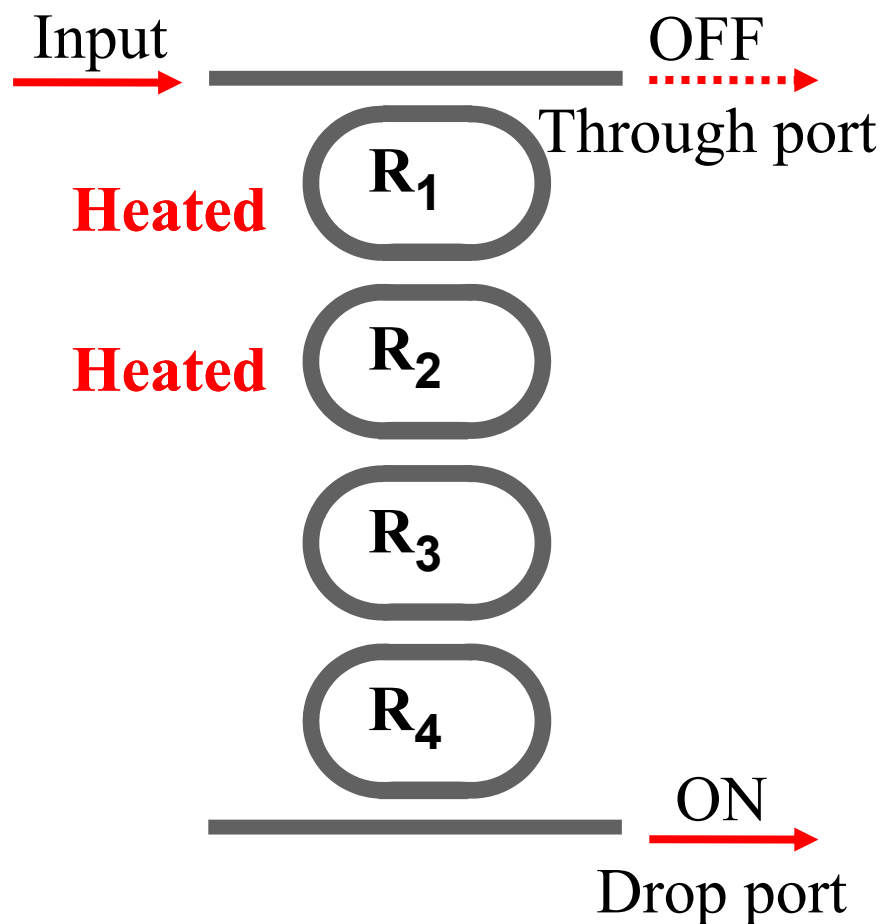
- 多波長, 多ポート化実証
- 5層非対称結合量子井戸 (FACQW) による電圧制御形スイッチの実証

マイクロリング型ヒットレス波長選択スイッチの動作原理

Thermo-Optic effect

⇒ **Control of resonant wavelength**

▶ **Hitless wavelength selective switch**



Drop port response

本プロジェクトの当初設定目標

◆研究期間：2007年度～2009年度

◆研究目標：多波長を用いた低クロストーク・低消費電力・超高速スイッチによる大規模集積化波長ルーティング
[前半]:

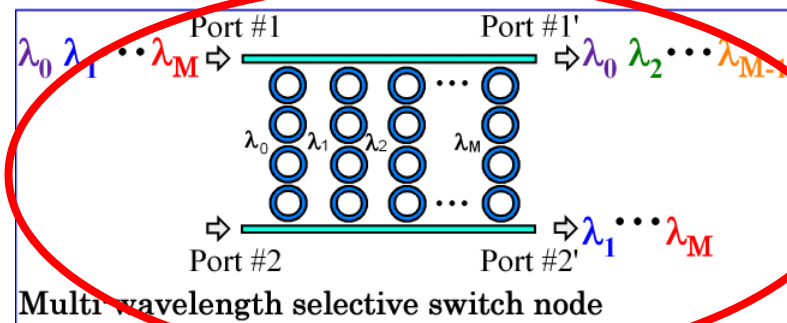
①誘電体光導波路の熱光学効果を用いたヒットレス波長選択スイッチのフルマトリックス化に必要な高密度集積化技術の開発

② Giant ER効果を発現する非対称結合量子井戸(FACQW)構造の探索・理論解析、および光導波路加工技術の開発

[後半]:

③量子井戸半導体光導波路による波長選択スイッチの設計・製作技術の確立

N input × N output × M wavelength channels full matrix switch



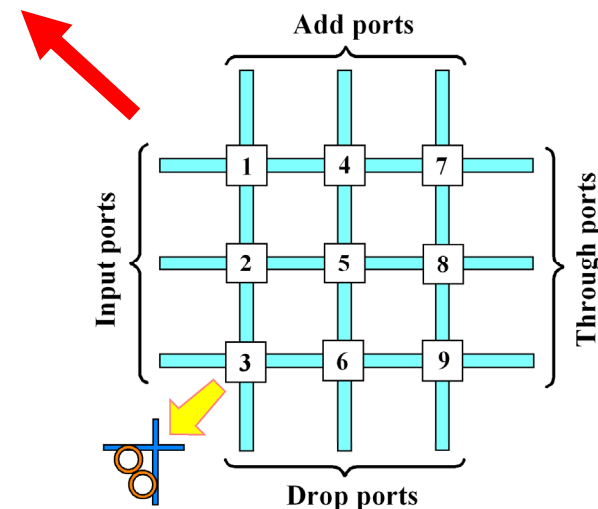
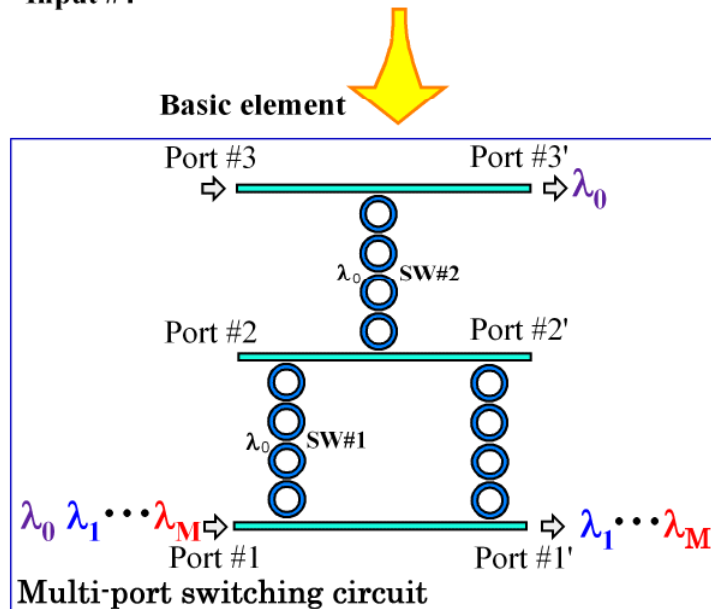
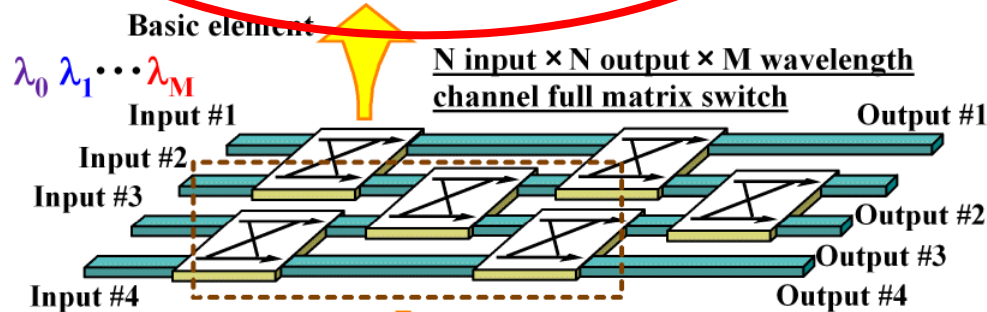
Key component

◆ Multi wavelength selective switch
= Full mesh optical switching circuit

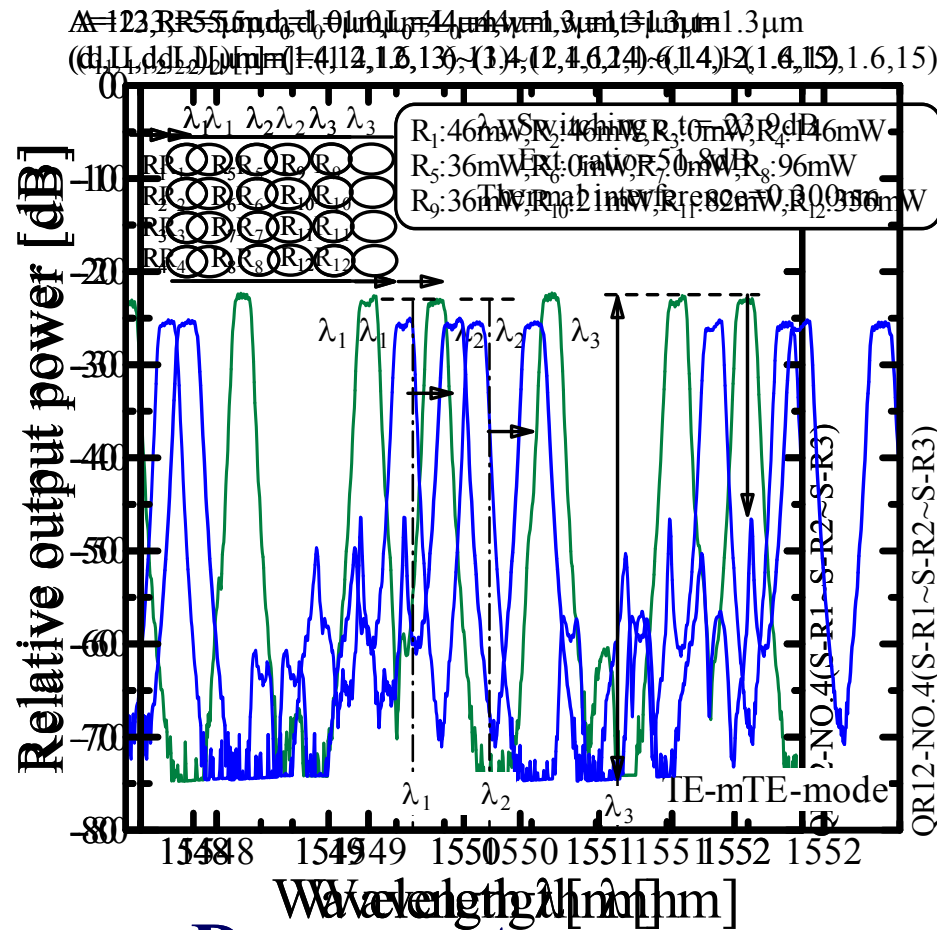
Purpose of this study



**Demonstration of
basic elements**

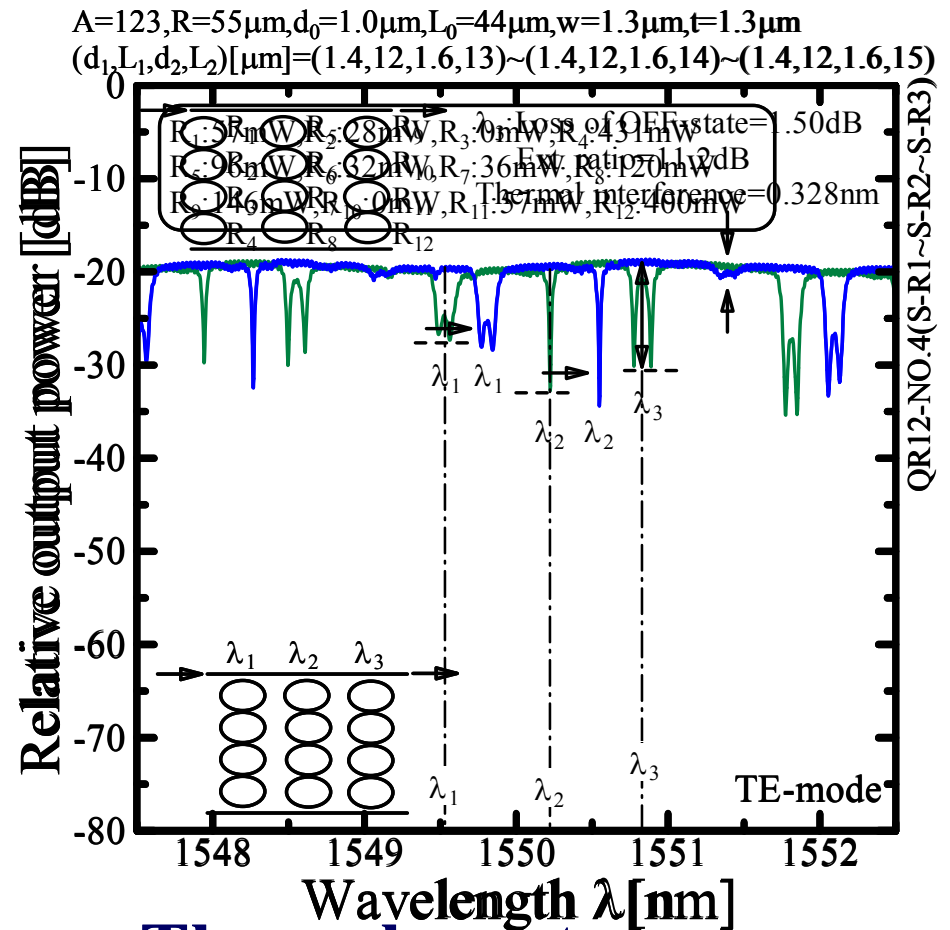


Three stage cascaded: Measured result



Drop port response

- Extinction ratio = 51.8dB
- Switching crosstalk = -23.9dB
- Thermal interference = 0.30nm

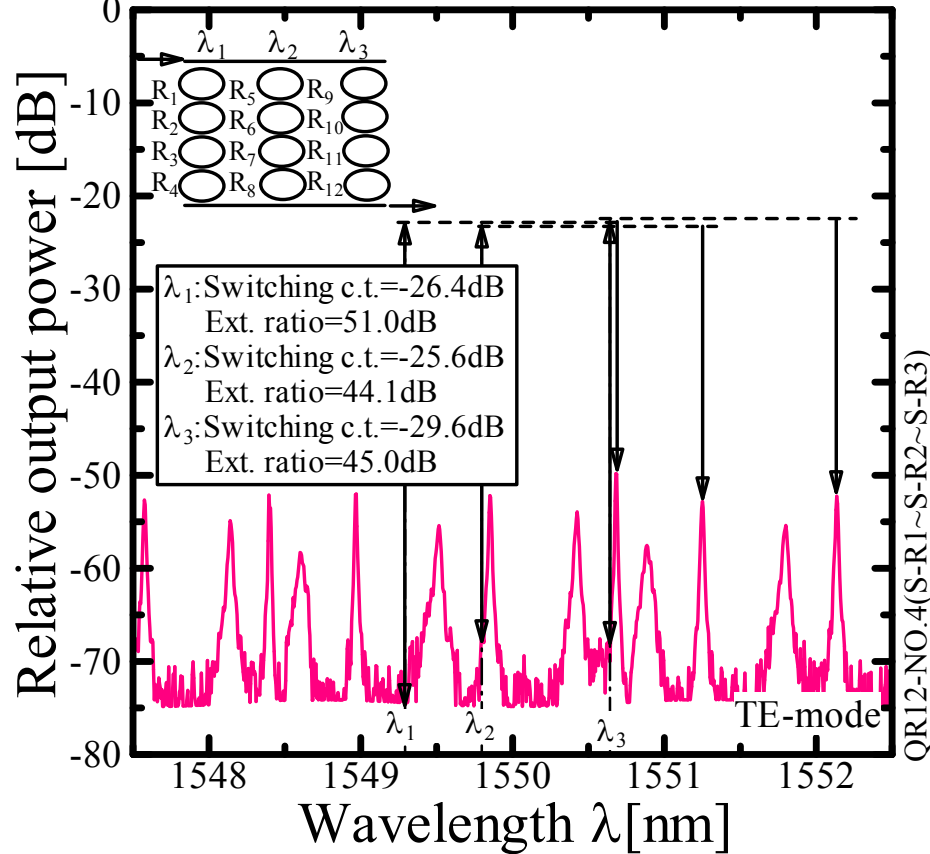


Through port response

- Extinction ratio = 11.2dB
- Loss of OFF-state = 1.50dB
- Thermal interference = 0.33nm

Three stage cascaded: Measured result (0λ selection)

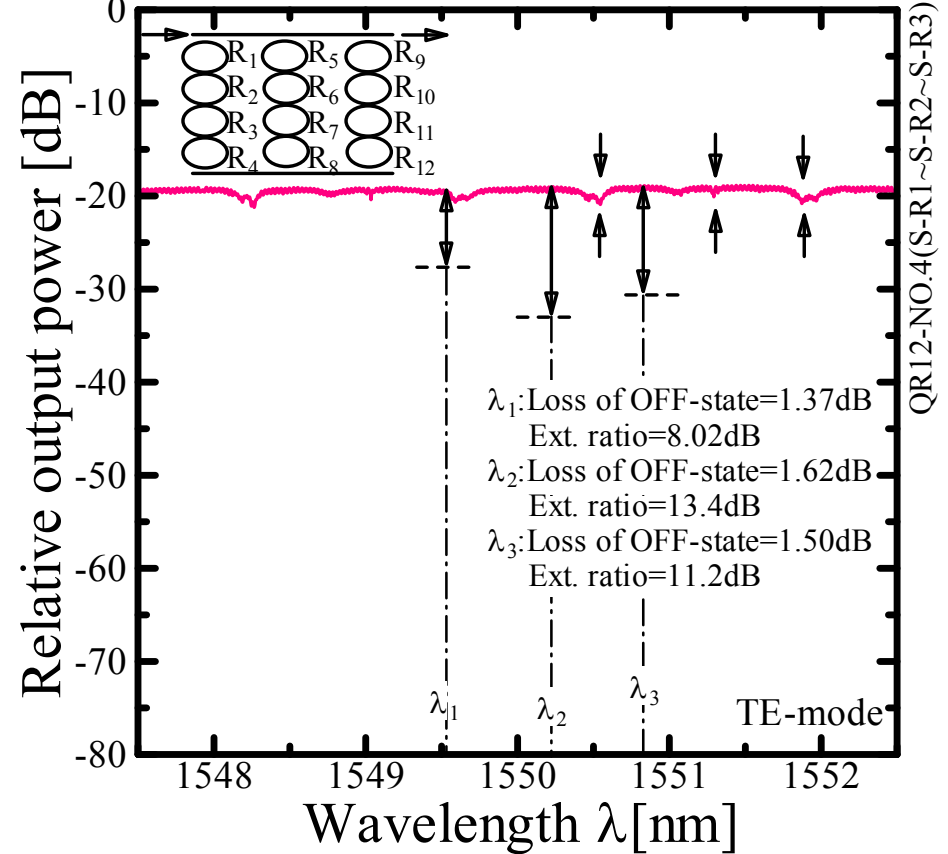
$A=123, R=55\mu\text{m}, d_0=1.0\mu\text{m}, L_0=44\mu\text{m}, w=1.3\mu\text{m}, t=1.3\mu\text{m}$
 $(d_1, L_1, d_2, L_2)[\mu\text{m}]=(1.4, 12, 1.6, 13) \sim (1.4, 12, 1.6, 14) \sim (1.4, 12, 1.6, 15)$



Drop port response

- Extinction ratio = 51.0dB
- Switching crosstalk = -26.4dB

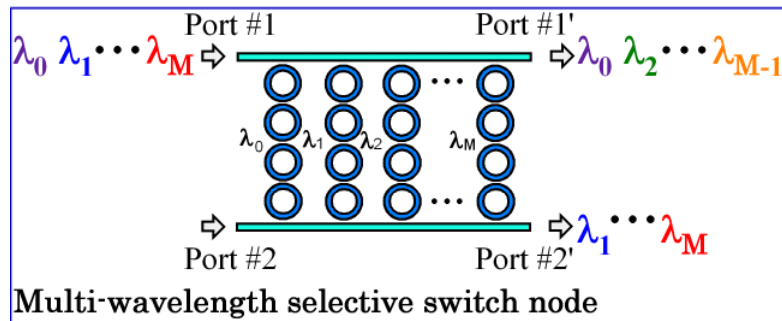
$A=123, R=55\mu\text{m}, d_0=1.0\mu\text{m}, L_0=44\mu\text{m}, w=1.3\mu\text{m}, t=1.3\mu\text{m}$
 $(d_1, L_1, d_2, L_2)[\mu\text{m}]=(1.4, 12, 1.6, 13) \sim (1.4, 12, 1.6, 14) \sim (1.4, 12, 1.6, 15)$



Through port response

- Extinction ratio = 8.02dB
- Loss of OFF-state = 1.37dB

N input × N output × M wavelength channels full matrix switch



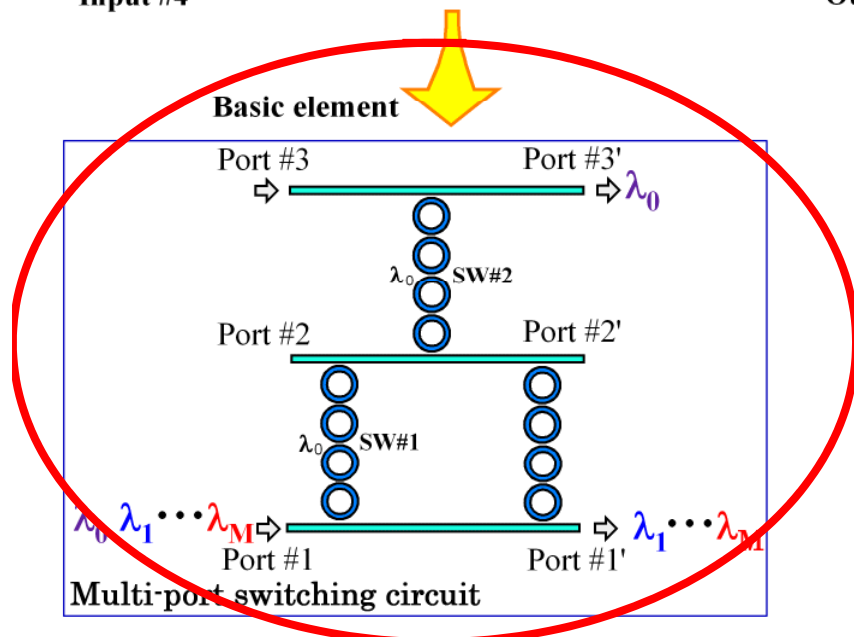
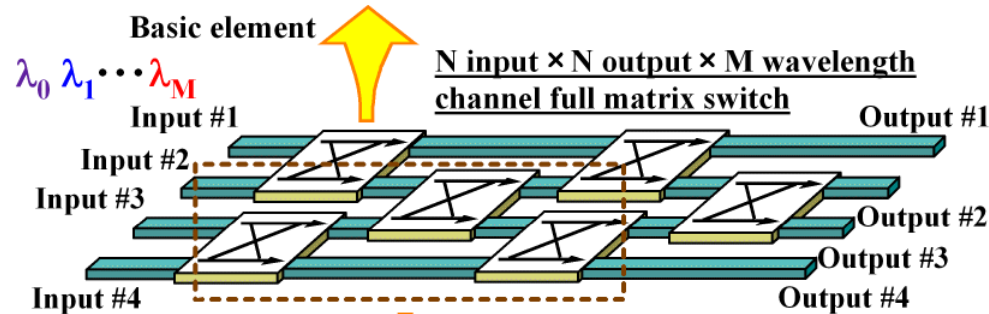
Key component

= **Full mesh optical switching circuit**

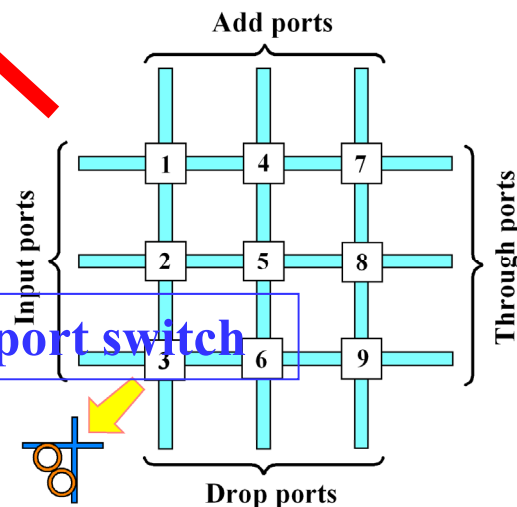
Purpose of this study



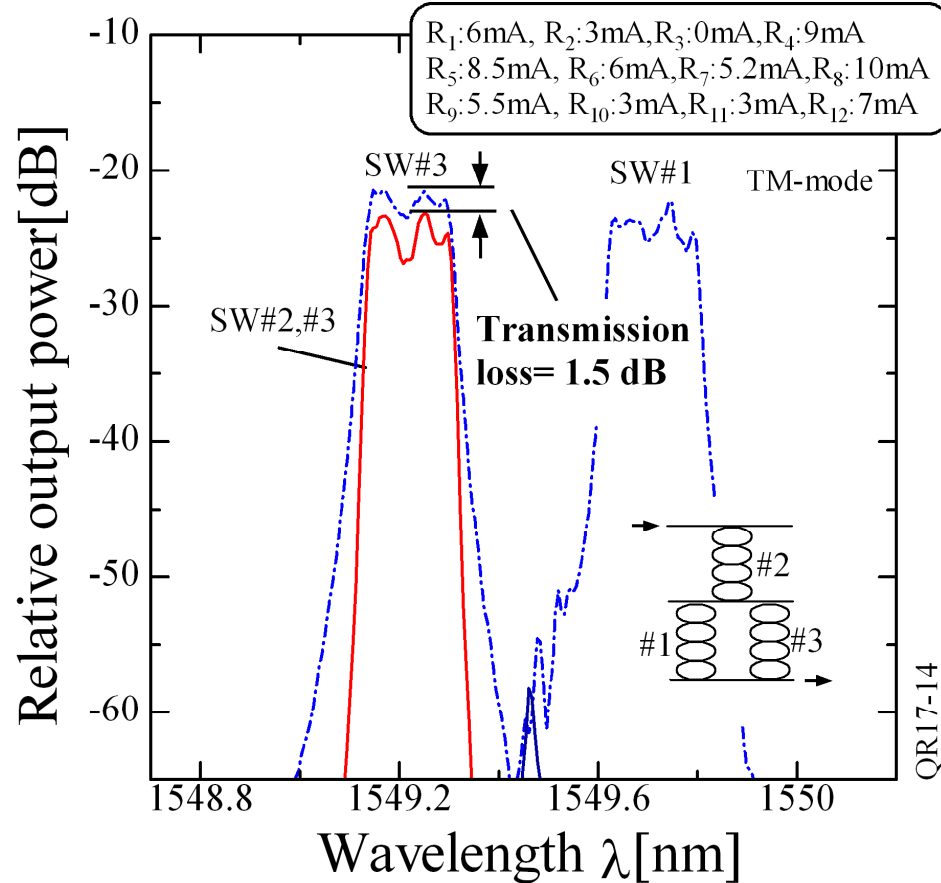
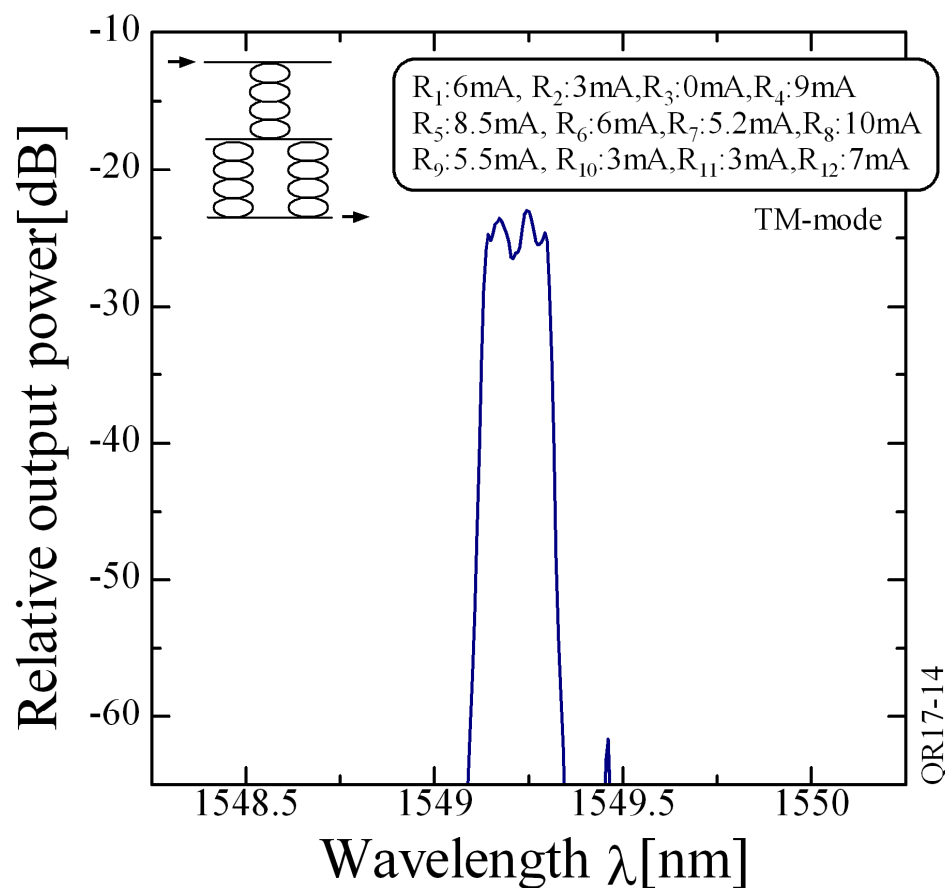
**Demonstration of
basic elements**



◆ Multi-port switch



3 × 3ポート波長選択スイッチの測定結果



- FWHM bandwidth = 0.16 nm
- Ripple depth = -3.58 dB

- Transmission loss = 1.5 dB



超高速波長ルーティング集積回路 *Ultrafast Wavelength Routing Photonic Integrated Circuit*

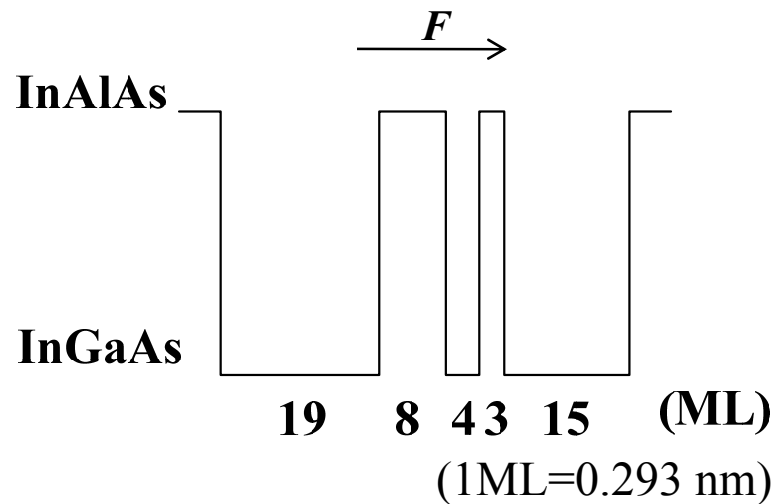
國分泰雄, 川太郎, カトフ・レドワン
横浜国立大学 大学院工学研究院

発表内容

1. 研究目的
2. 誘電体マイクロリング波長選択スイッチ回路
3. 半導体マイクロリング波長選択スイッチ回路

Five-Layer Asymmetric Coupled Quantum Well (FACQW)

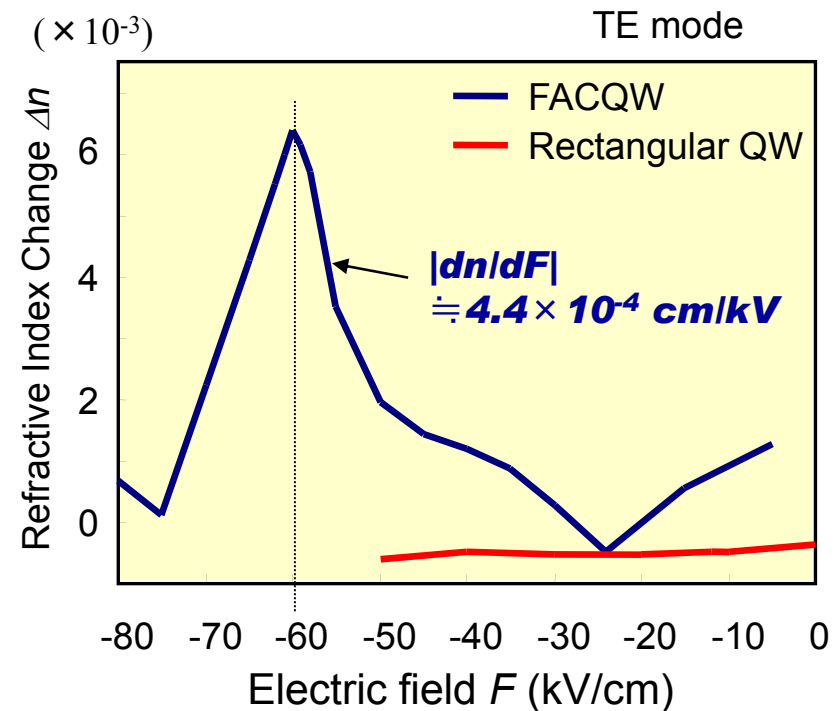
Layer structure



InGaAs/InAlAs FACQW for 1.55 μm

T. Arakawa, *et al.*, IPRM '07, PB13

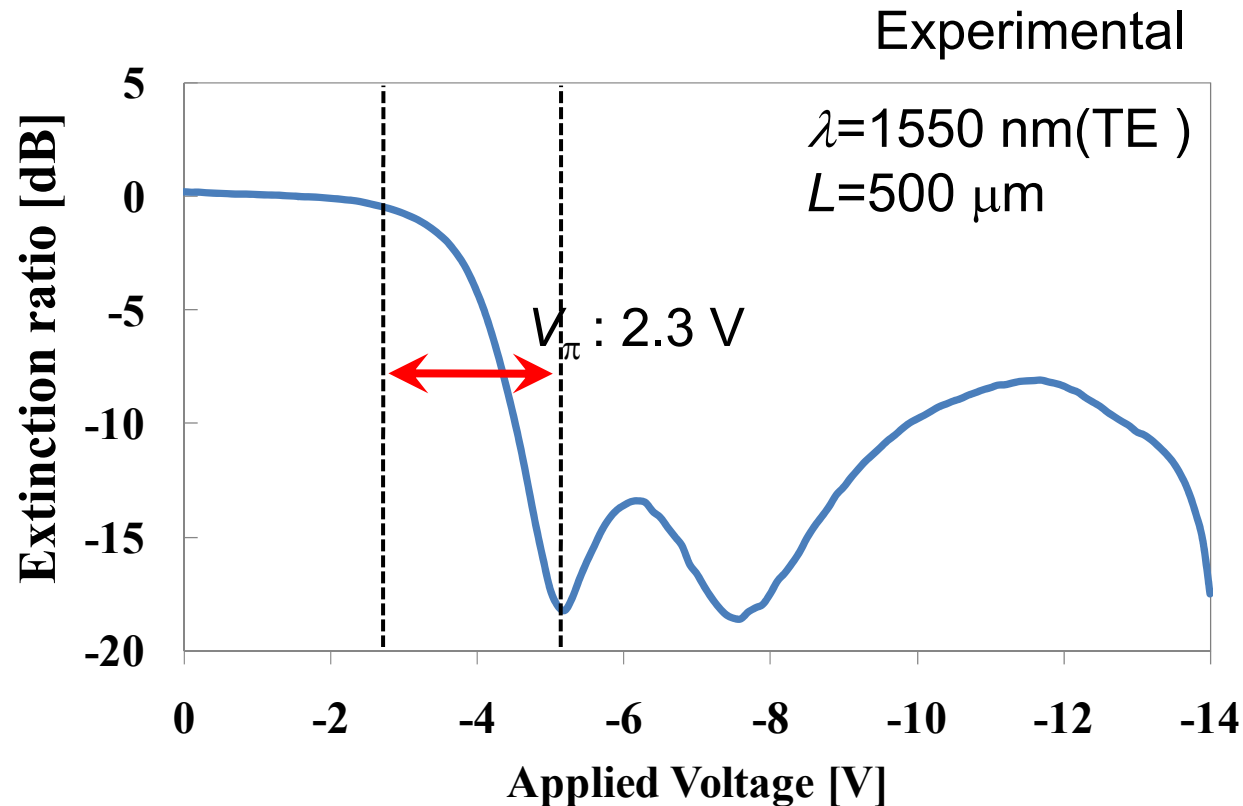
*H. Feng, *et al.*, JQE. 34, 1197(1998) .



Theoretical electrorefractive index change in InGaAs/InAlAs FACQW

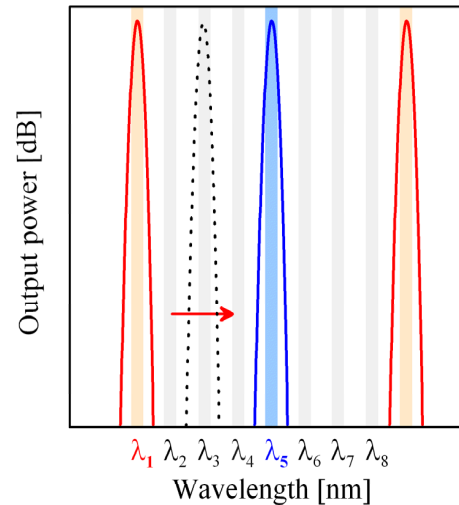
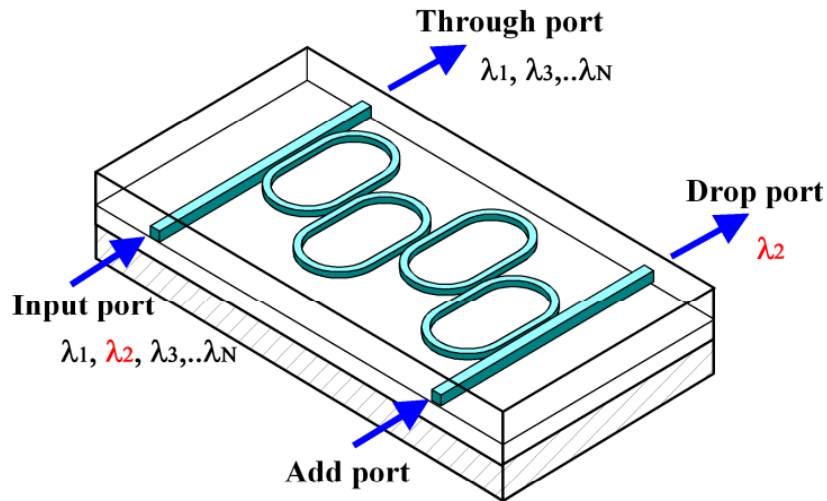
- Potential-tailored quantum well
- Large electro-refractive index change in a wide transparency wavelength range

InGaAs/InAlAs FACQW Mach-Zehnder modulator

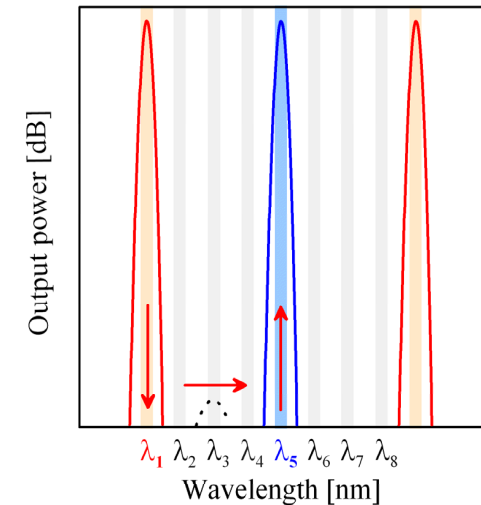


- ◆ Phase modulation efficiency = $157 \text{ }^{\circ}/\text{mm}/\text{V}$
- ◆ $V_{\pi}L = 1.2 \text{ Vmm}$
- ◆ $\Delta n = 4.58 \times 10^{-3} \text{ } (V = 0 \rightarrow 2.3 \text{ V})$

目標とした半導体量子井戸波長選択スイッチ



**Conventional
tunable filter**



**Hitless wavelength
selective switch**

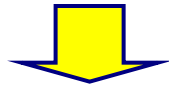
5層非対称結合量子井戸 (FACQW)

電圧制御による屈折変化

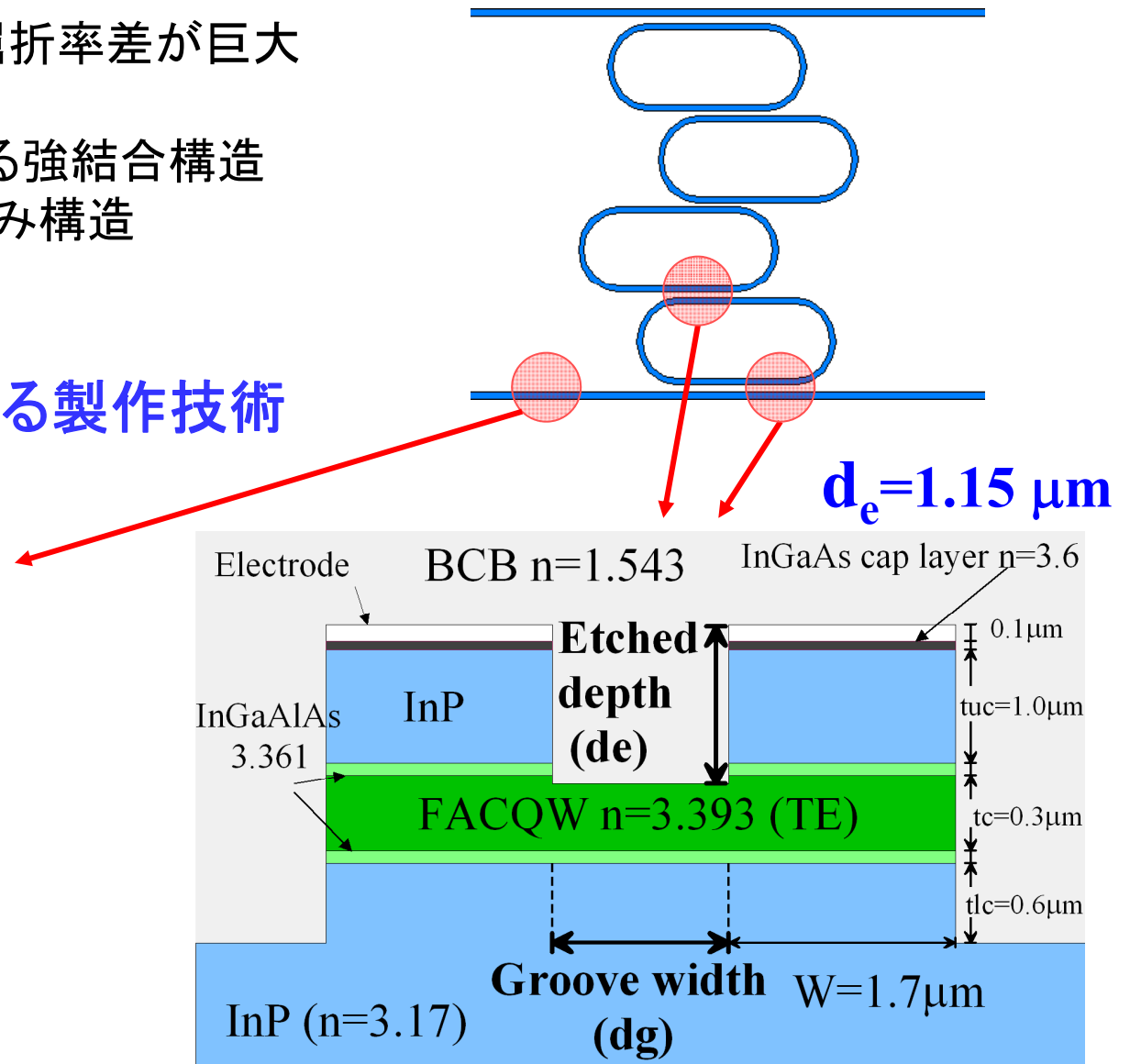
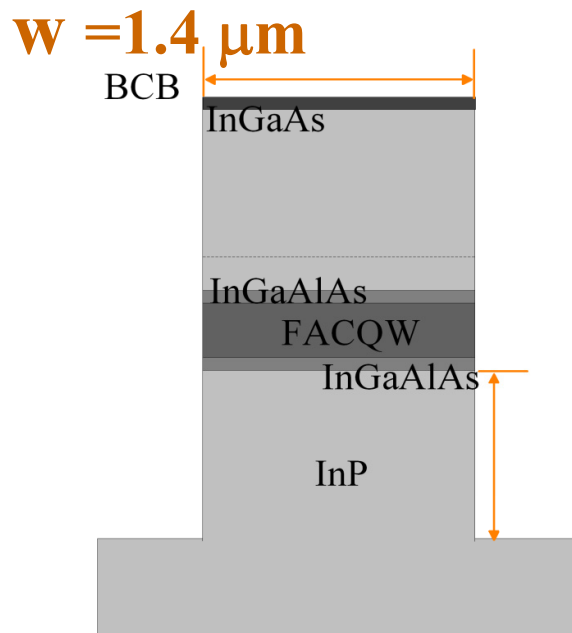
- 消費電力 $\sim \text{mW}$
- スイッチング時間 $\sim \text{ns}$

設計上の課題と解決策

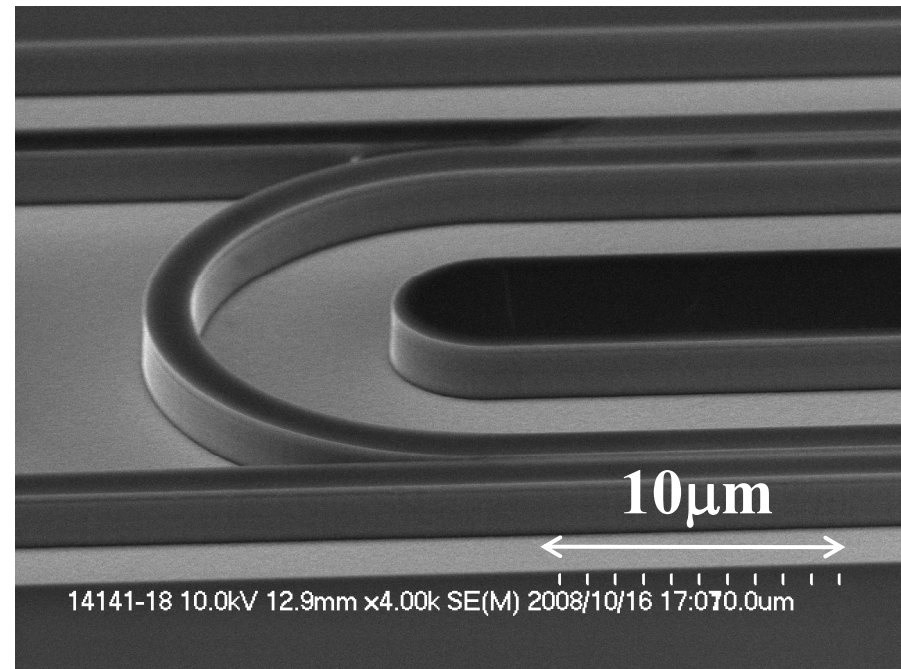
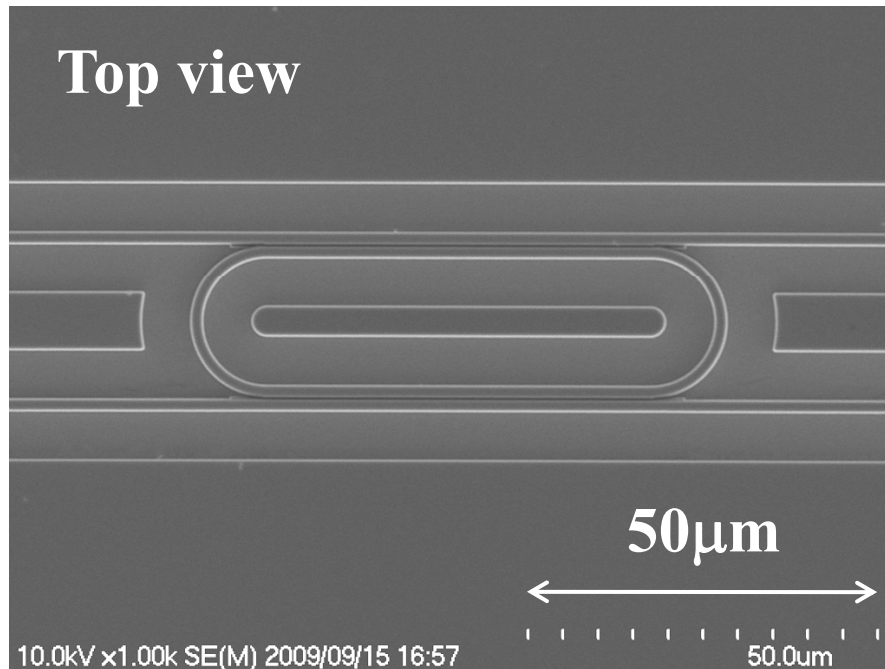
- ◆半導体とBCBクラッド間屈折率差が巨大
 - 結合率が小さくなる
 - 結合部は浅い溝による強結合構造
- ◆曲げ損失低減 → 埋め込み構造



2段階エッチングによる製作技術



走査電子顕微鏡による観察像

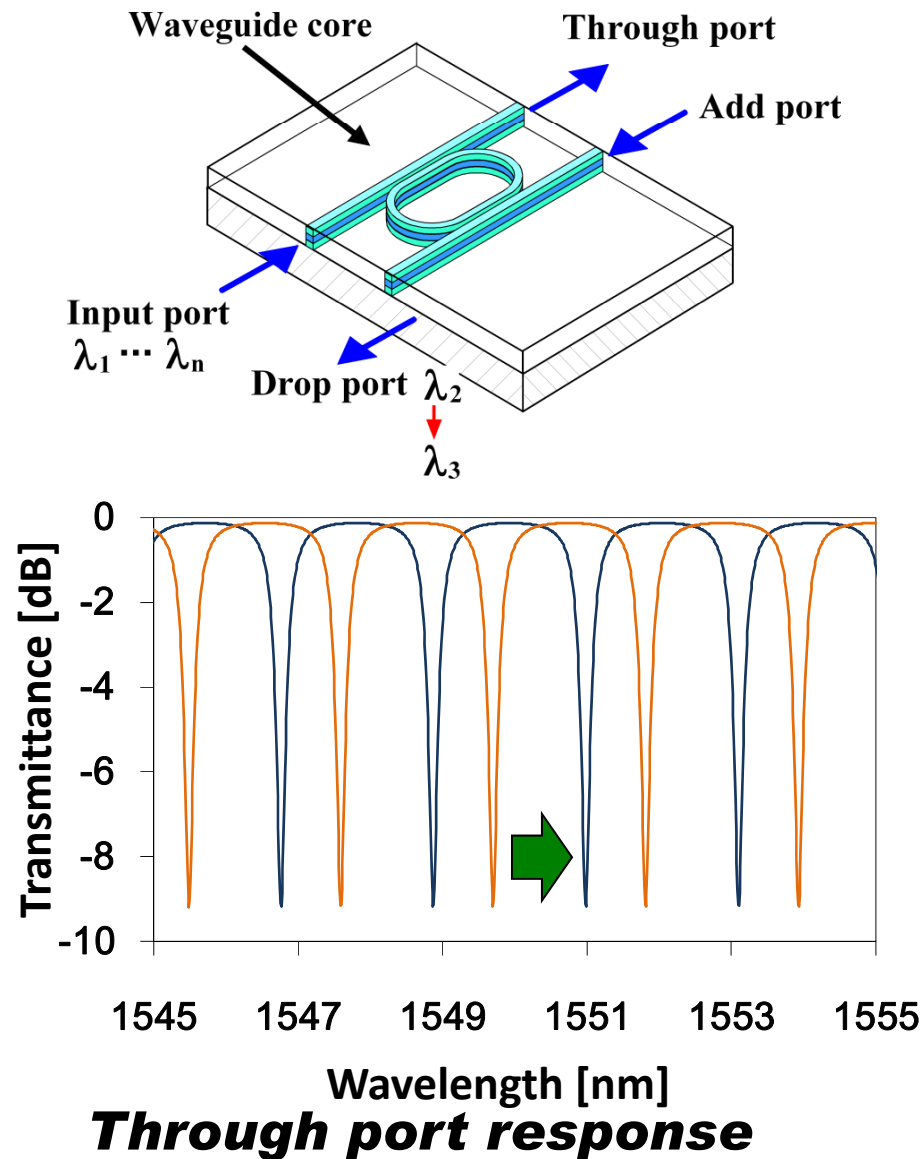


Growth : Solid-source MBE

Etching : Two-step ICP-RIE

- ◆ The gaps of the directional coupler: EB lithography
- ◆ The other waveguides: Photolithography

実際に製作した単ーリングチューナブルフィルタ



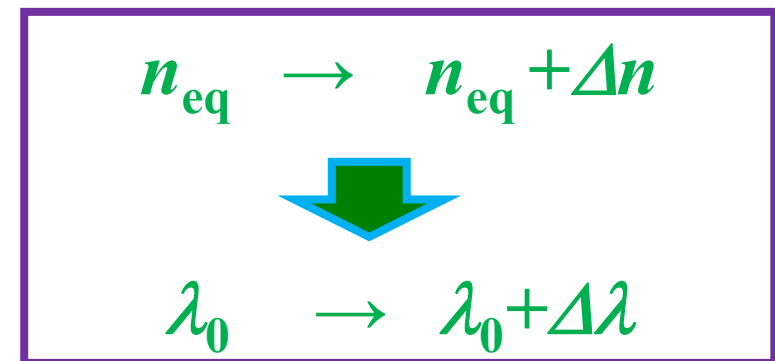
$$\lambda_0 = \frac{n_{eq} L}{N}$$

λ_0 : Resonant wavelength

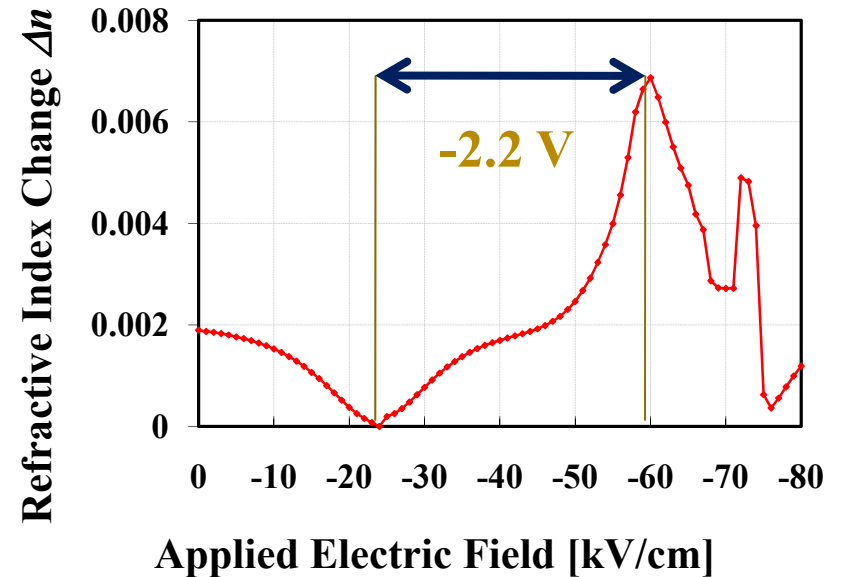
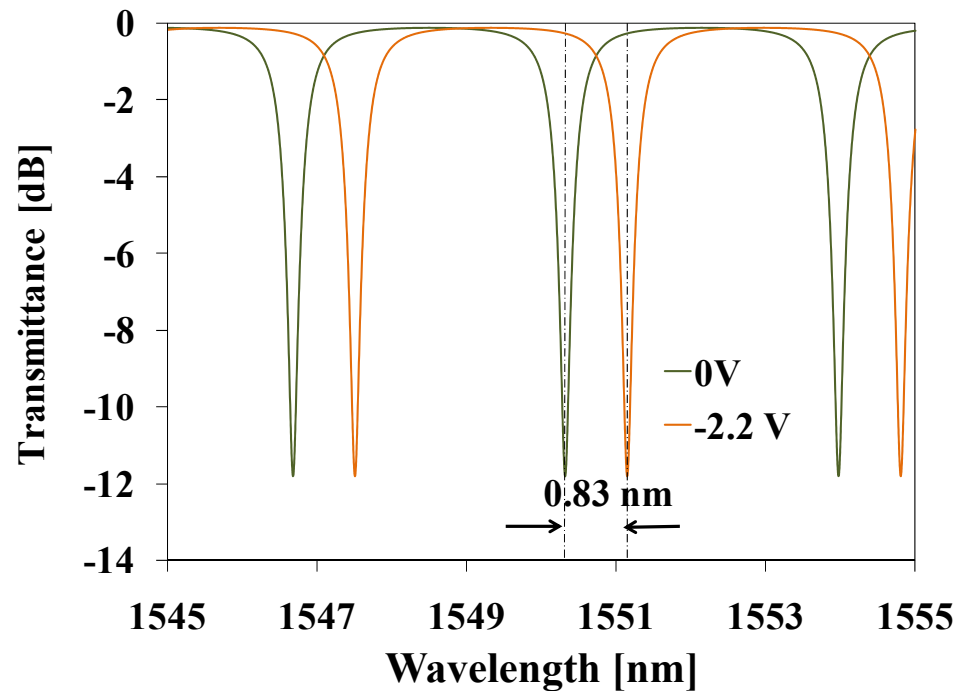
n_{eq} : Equivalent refractive index

L : Resonator length

N : Resonance order



スペクトル特性変化の理論値

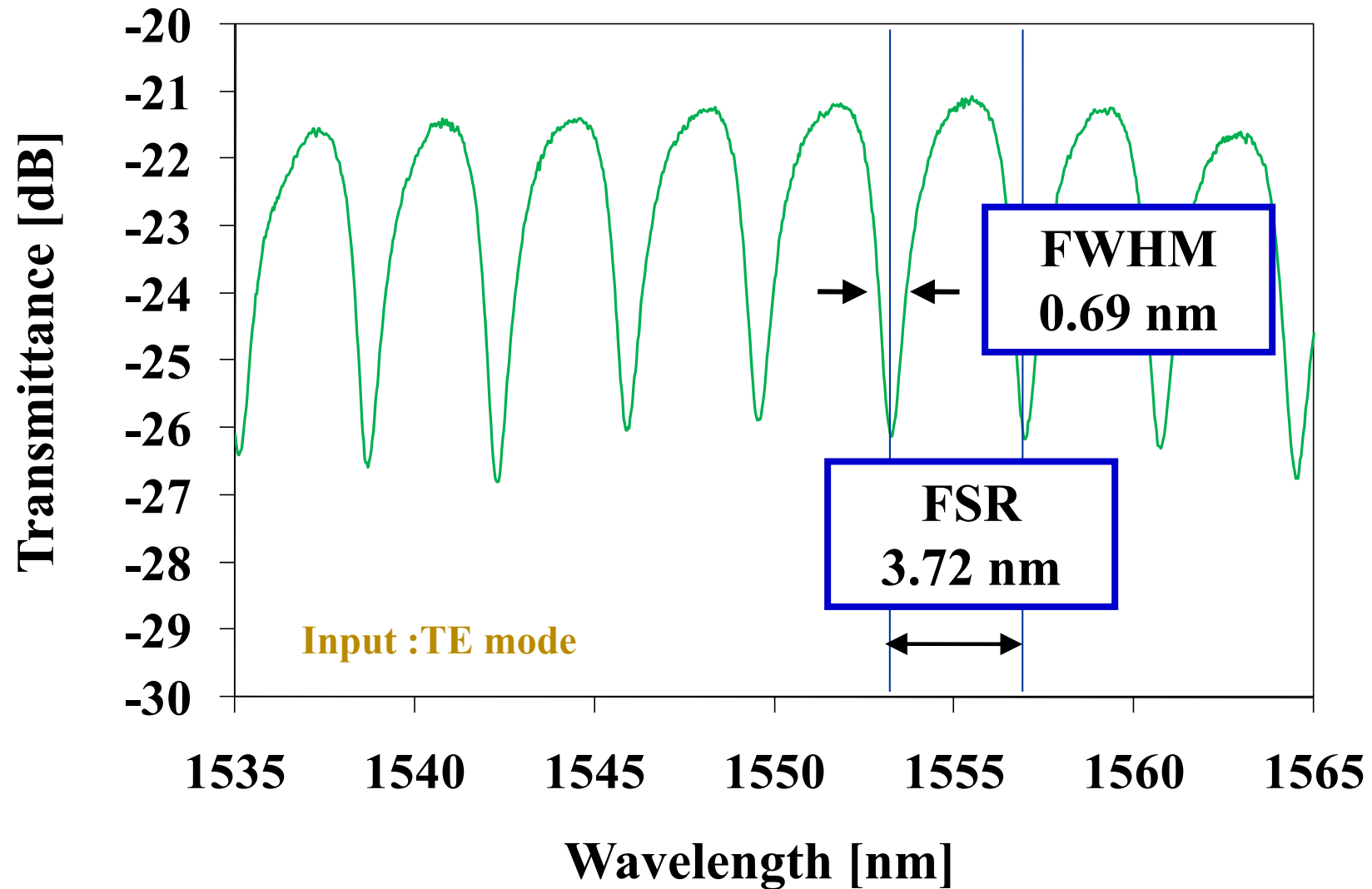


Device parameters

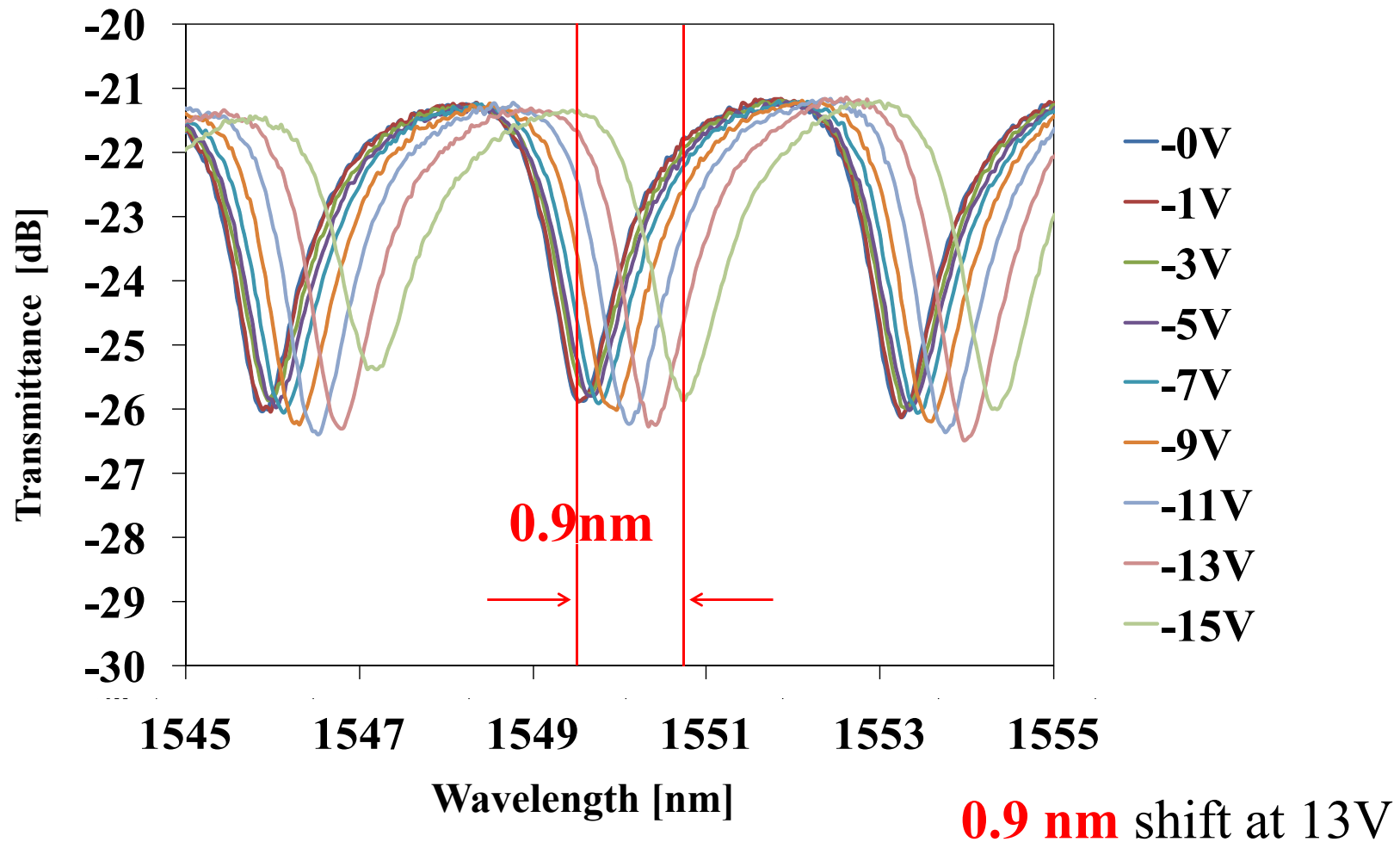
- ◆ Ring radius $R=10\ \mu\text{m}$
- ◆ Round trip length $L=172\ \mu\text{m}$
- ◆ Coupling region length $l=54.6\ \mu\text{m}$

➤ Resonant wavelength shift 0.83 nm with 2 V

電圧印加前のスペクトル特性

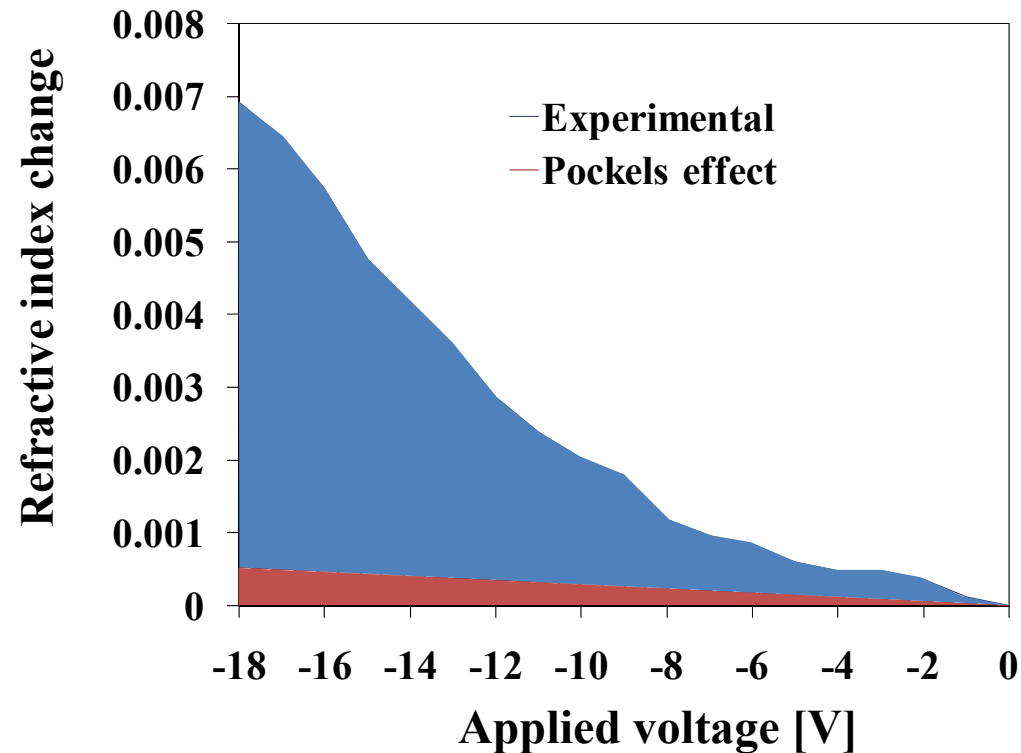


電圧印加によるスペクトル特性の変化



Absorption edge of the FACQW is 1430 nm

FACQWの屈折率変化



Pockels effect

$$\Delta n_{TE} = -\frac{1}{2} n_0^3 r_{41} F$$

$$r_{41} = -1.69 \times 10^{-12} \text{ m/V}^* \quad (1.55 \mu\text{m}, \text{InGaAs})$$

*S. Nishimura *et al*, PTL **4**, 1123 (1992).

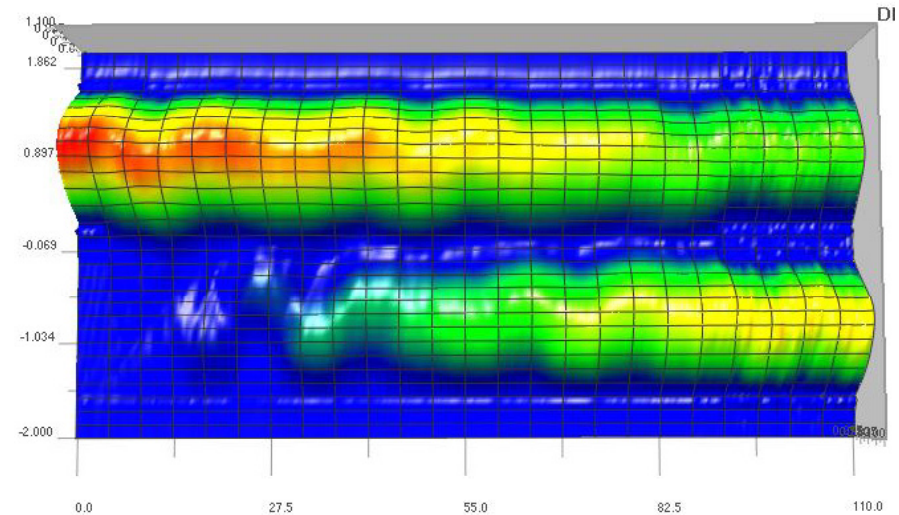
コヒーレント結合を利用した低損失結合器設計法の発見 (原理)

導波モードと放射モードの干渉

→ 結合効率, 損失が結合長に依存?

$$\begin{bmatrix} E_{o1} \\ E_{o2} \\ E_{or} \end{bmatrix} = {}^t \mathbf{CPC} \begin{bmatrix} E_{i1} \\ E_{i2} \\ E_{ir} \end{bmatrix}$$

C : モード展開行列
P : 伝搬行列



$$\text{スルーポート電力} : |E_{o1}|^2 = |c_{1e}^2 \exp(-j\beta_e l) + c_{1o}^2 \exp(-j\beta_o l) + c_{1r}^2 \exp(-j\beta_r l)|^2$$

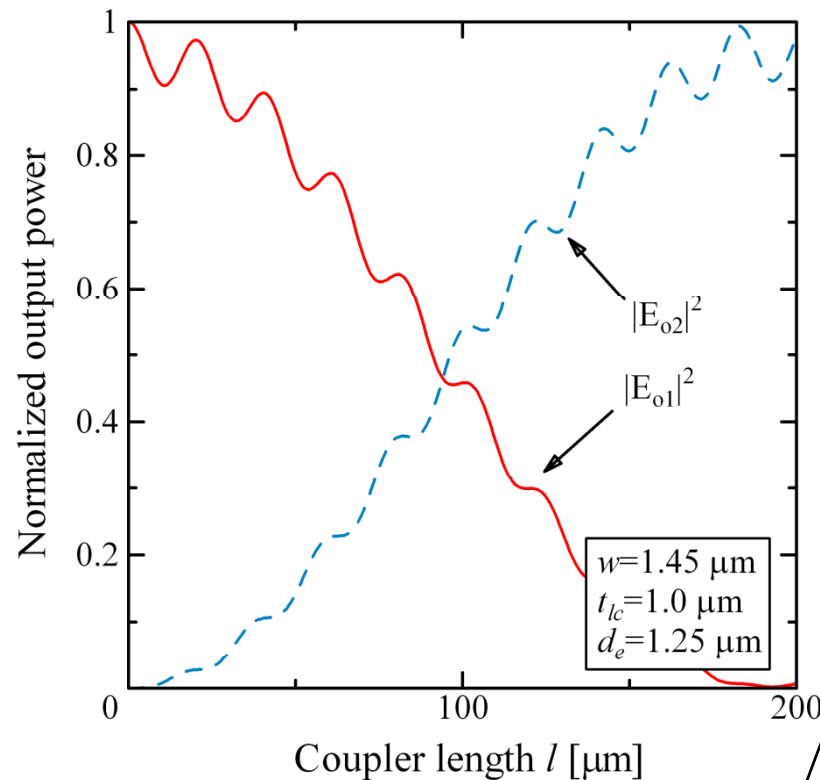
$$\text{結合電力} : |E_{o2}|^2 = |c_{1e}^2 \exp(-j\beta_e l) - c_{1o}^2 \exp(-j\beta_o l) + c_{1r}^2 \exp(-j\beta_r l)|^2$$

$$\text{損失} : |E_{or}|^2 = 1 - (|E_{o1}|^2 + |E_{o2}|^2)$$

仮定: 放射モード群
→ 1つの伝搬定数 β_r で代表

放射モードとの干渉

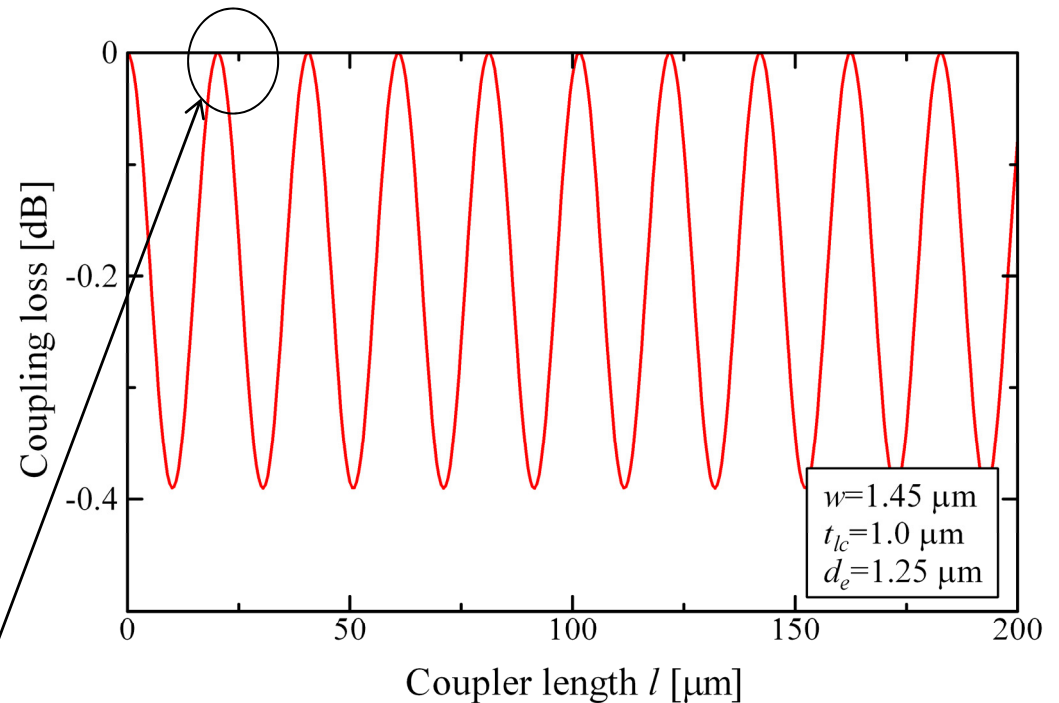
コヒーレント結合を利用した低損失結合器設計法の発見 (計算結果)



分岐特性

単一周期 → 単一周期 + 周期的なリップル

低損失な結合長が存在



損失特性

一定 → 周期的変化

結合部の設計に導入

まとめ

◆ 誘電体マイクロリング型ヒットレス波長選択スイッチのフルマトリックス化

4 次直列結合マイクロリングによる, 3 波長, 3 ポート化の実証 → フルマトリックススイッチの基本要素実証

◆ 量子井戸半導体光導波路によるマイクロリング波長選択スイッチの設計・製作技術の確立

- InGaAs/InAlAs FACQW マイクロリングフィルタの設計・製作
- 強結合と低曲げ損失を両立する構造 → 2段階エッチング



➤ FSR=3.72 nm, FWHM=0.69 nm, Extinction ratio=5 dB

➤ **Wavelength shift of 0.9 nm at 13 V.**

Thank you !