次世代光ネットワークノード構築のための
空間光変調器を用いた高機能光スイッチの研究

平成 25 年度

反 本 啓 介

（様式甲 3）

主　論　文　要　旨

報告番号	甲　第　号	氏　名	反本 啓介

主 論 文 題 目：

次世代光ネットワークノード構築のための空間光変調器を用いた
高機能光スイッチの研究

（内容の要旨）

光ネットワークの大容量化への需要に応えるため、波長多重された各信号に対し最適な伝送経路を選択し動的に経路を切り替える ROADM(Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer)がネットワークノードに導入されている。上記ネットワークを柔軟に再構成するため、ROADM を構成する光ファイバおよび光送受信器は多数の光スイッチを用いて配線される。ROADM の設置スペースや光増幅器の電力削減、および信号品質維持のために、個々の光スイッチ素子の小型化・低損失化・偏光無依存化が求められている。また、周波数利用効率向上のため、異なる変調方式による信号を多重伝送する可変グリッド ROADM が必要であり、その実現のために、光スイッチにはグリッド可変動作が求められる。

第 1 章の序論では、光ネットワークの動向について述べ、ROADM とグリッド可変 ROADM の必要性を述べる。また、その運用のためには、空間スイッチと WSS(Wavelength Selective Switch)を用いたノード構成が不可欠であることを述べる。本研究では、LCOS(Liquid Crystal on Silicon)または MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)を用いた空間スイッチ・WSS を提案し、本研究の目的が、これらの光スイッチ素子に対し、低損失性・小型性・偏光無依存性・グリッド可変動作などの機能を付与するための設計手法の確立であることを述べる。

第 2 章では、LCOS を用いた空間スイッチを提案し、挿入損失低減のため、LCOS を用いて光学系の収差を高速に補償する方法を提案する。収差を補償するための最適な位相パタンを試行錯誤型アルゴリズムによって算出する。解探索の過程において Zernike 関数のモード間の相関性を応用することにより、従来の手法と比べ約 2 倍高速に補償が可能となる。

第 3 章では、AWG(Arrayed Waveguide Grating)と LCOS を用いた WSS を提案し、その設計手法を明らかにする。本 WSS では AWG により波長多重信号をスペクトル展開し、各波長信号に対し LCOS を用いて個別にスイッチングを行い、別の層の AWG に出力する。複数の AWG を高い精度で互いに平行に多層化することで、低損失な WSS が得られる。多層 AWG を作製する手段として、別々の基板上に形成された AWG を貼合わせる手法および、単一基板上に複数の AWG をモノリシックに形成する手法を提案する。両手法を用いて多層 AWG を試作し、層間の平行度がそれぞれ±0.9 μm 以下、±0.7 μm 以下という良好な性能が得られている。

第 4 章では、多層 AWG と 2 台の LCOS を用いた偏光無依存型 WSS を提案する。一方の LCOS がスイッチ動作を行い、他方の LCOS が多層 AWG の位相誤差を直交する偏光成分別に補償する。また、偏波ダイバーシティ光学系を導入し、LCOS の偏光依存性が補償される。試作の結果、PDL(Polarization Dependent Loss)が 1 dB 以下という良好な性能が得られている。

第 5 章では、多層 AWG と 1 台の LCOS を用いた小型かつ偏光無依存な WSS を提案する。偏波ダイバーシティ光学系に反射器を導入し折り返し型構成とすることにより、小型となる。また 1 台の LCOS を用いて、スイッチング動作および多層 AWG の位相誤差補償動作の両方が可能となる。試作の結果、光学系サイズが $100×80×60 mm^3$ 以下、PDL が 2 dB 以下という良好な性能が得られている。

第 6 章では、MEMS を用いた WSS を提案する。MEMS ミラー表面に複数のスロット構造を設けることにより、ミラー間ギャップに由来するスペクトルリップルが補償され、グリッド可変動作が可能となる。ミラーピッチが 50 μm の MEMS ミラーに対し、単位ミラーあたりのスロット数を 2 とし、スロット幅を 2 μm と最適化することで、リップル幅が 0.004 dB 以下という良好な性能が得られることを明らかにする。

第 7 章では本論文を総括し、結論および今後の展望を述べる。

(様式甲 4)

SUMMARY OF Ph.D. DISSERTATION

School	Student Identification Number	SURNAME, First name
Integrated Design Engineering		SORIMOTO, Keisuke

Title

A Study on Functional Optical Switches Using Spatial Light Modulators for Next-generation Optical Network Nodes

Abstract

In order to meet the increasing demand for the capacity of optical networks, a ROADM (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer) is introduced for each node, because a ROADM can efficiently route WDM (Wavelength Division Multiplexing) signals by dynamically selecting the optimal path for each signal. A ROADM consists of optical fibers, transmitters and receivers, and these components are connected through many optical switches to reconfigure networks. An optical switch should be compact, low-loss, and insensitive to the polarization states of the signal; in order to reduce the installation space, to save energy of optical amplifiers, and to maintain the quality of signals. In addition, each switch should have the flexible-grid operation function, which enables the efficient use of spectral resource by multiplexing many signals modulated with various kinds of formats.

In Chapter 1, I describe a trend of an optical network and the necessities of the ROADM and flexible-grid ROADM using space switches and WSSs (Wavelength Selective Switches). In this study, I propose space switches and WSSs employing LCOS (Liquid Crystal on Silicon) or MEMS (Micro Electro Mechanical Systems). The purpose of this study is to establish the design method for these switches with low loss, compactness, polarization insensitivity, and flexible-grid operation function.

In Chapter 2, an LCOS-based space switch and a method for aberration compensation with the LCOS are proposed. The optimal phase modulation pattern for the LCOS that reduces the insertion loss is calculated with the trial-and-error-based algorithm. By utilizing the correlations between the Zernike modes, the time required for optimization with this scheme is approximately a half compared to that with the conventional algorithm.

In Chapter 3, I propose an LCOS-based WSS with a multilayered AWG (Arrayed Waveguide Grating). The WDM signal is spectrally decomposed by the input AWG, and the LCOS switches the selected wavelength components to the output AWG, which locates in another waveguide layer. It is necessary for reducing the loss of the WSS to precisely align the AWGs to be parallel between the layers. I propose two methods to fabricate the multilayered AWG: the first one is to fabricate the separate AWGs on the individual substrate and stack them together; and the second one is to fabricate several AWGs monolithically on the single substrate. Both methods show good fabrication results, where parallelisms between the waveguide layers are ±0.9 μm and ±0.7 μm, respectively.

In Chapter 4, a WSS composed of the AWG and a pair of LCOSs is proposed. One LCOS is employed for switching, and the other is for compensating for the phase errors of the AWG. A polarization diversity optics is introduced to compensate for the PDL (Polarization Dependent Loss) of the LCOS. The fabricated WSS shows small PDL of less than 1 dB.

In Chapter 5, a WSS with the AWG and a single LCOS is proposed. This WSS is compact because of the folded configuration enabled by the reflector in the optics. Also, both switching and phase error compensation is operated by the single LCOS. The size of the WSS is reduced to $100 \times 80 \times 60$ mm^3 and the PDL is less than 2 dB.

In Chapter 6, I propose a MEMS-based WSS, where slot structures are employed in each MEMS mirror to eliminate the spectral ripples induced by the inter-mirror gaps in the flexible-grid operation. The MEMS structure is optimized, and the ripples are only 0.004 dB when two slots with 2-μm widths are in each mirror with 50-μm pitch.

Chapter 7 summarizes this thesis and describes the future prospects of this study.