

광통신용 LiNbO₃ 광집적소자의 기술발전 동향

鄭 洪 植

弘益大學校 電子電算工學科

I. 서론

앞으로 전개될 사회는 정보화 시대로서, 고화질 TV, 영상회의, 동영상등과 같은 고속, 고화질 신호 전송 서비스 수요가 급격히 증가되리라 생각된다. 이러한 수요에 효과적으로 대처하기 위해서는 고속, 대용량 전송시스템이 필요하며, 이에 하나로서 광통신 시스템에 대한 활발한 연구가 국내외적으로 진행되고 있다. 현재까지의 광대역, 저손실 광섬유 기술과 고신뢰성 반도체 레이저의 출현은, 광전송 기술이 기존의 타기술에 비하여 확고한 우위를 차지하게 하였으며, 이 기술은 차세대 정보, 통신시스템인 광대역 종합 통신망(B-ISDN) 구성을 위한 중추기술로서 사용될 것이다.¹

광통신 시스템에 사용되는 변조방법에 따라서 반도체 레이저를 원하는 전송속도의 전기신호로 직접 변조하는 방식과, 변조신호를 외부형 변조기를 통해서 인가되는 간접변조 방식으로 구분한다. 전자의 변조 방식을 이용할 경우에는, 고속변조시 chirping, timing jitter, pattern effect와 같은 현상으로 전송용량 및 시스템 성능이 제한 받고 있으며², 후자의 경우에는 전자와 같은 제한은 없지만, 삽입손실, 시스템 구성시의 복잡함, 비용상승과 아울러 신뢰성 문제등으로 전자에 비하여 비교적 덜 관심을 가져왔다. 그러나 대표적 전기광학 재료인 LiNbO₃를 중심으로 20여년간 발전해온 Ti:LiNbO₃ 광집적소자는 기술적인 측면, 소자의 성능 그리고 광섬유와의 접속등을 고려해 볼때, 고속 전송시스템에 이용될 수 있다는 긍정적인 연구 결과가 최근에 많이 보고 되고 있으며, 현실적으로 이러한 소자들을 이용한 전송시

스템들이 R&D 수준에서 많이 발표되고 있는 실정이다.³ 따라서 외부변조형 전송시스템에 이용되는 광변조기와 스위치를 포함해서 광집적소자들을 검토해 보는 것이 매우 의미 있는 일이라 생각되어, LiNbO₃를 중심으로 정리하였다.

제 2장에서는 LiNbO₃를 중심으로 전기광학 재료의 종류 및 특성을 비교, 검토한 다음, 단일모드 광도파로 제작방법과 광섬유 접속기술을 소개하였다. 3장에서는 기존에 보고된 문헌등을 중심으로, 통신용 광집적소자들을 고속 광변조기 및 광스위치, 스위치 배열(array), 파장분할기 및 코히런트 통신용 소자등으로 구분하여 설명하였다. 4장에서는 외부형 광변조기를 이용한 전송시스템을 소개하고, 마지막으로 5장에서 결론을 실었다.

II. 광집적소자의 제작기술 및 광섬유 결합

1. LiNbO₃ 재료의 특성

전기광학 집적소자들은 전기장에 의하여 물질의 굴절률을 변화시키는 전기광학효과(electrooptic effect)를 이용하는 소자들이다. 따라서 효율적인 광집적소자들을 제작하기 위해서는 큰 전기광학효과를 가지고 있는 재료들을 이용하는 것이 바람직하다. 현재 이 분야에 이용되는 재료로는 ferroelectric 계열의 물질, 화합물 반도체 그리고 비선형 유기물 중합체가 있으며, 후자의 두 재료를 이용하는 광집적소자는 본 내용의 범위를 벗어나므로 언급하지 않았다. Ferroelectric 계열의 재료는 표 1에서 나타나는 바와 같이 대부분 큰 전기광학계수를 갖고있으므로 전기광학 효과를 이용하는 광집적소자에 활용하기 위하여 많은 연

구가 진행되어져 왔다. 이중 LiNbO_3 는 ferroelectric 계열의 다른 물질에 비해 상대적으로 작은 전기광학 계수들을 가지고 있음에도 불구하고, 매우 활발하게 연구되어져 왔고, 현재에도 가장 널리 이용되고 있다. 그 이유는 strain이 없으며, 결정결합의 농도도 낮은 좋은 품질의 큰 단결정을 Czochraski 방법에 의해 쉽게 얻을 수 있으며, $1\mu\text{m}$ 이상의 장파장 영역에서도 전하이동이나 광전도도가 매우 작기 때문이다. 또한 여기에 Ti 확산방법을 이용할 경우에는, 저손실, 단일모드 광도파로를 쉽게 제작할 수 있다. 한편 LiTaO_3 는 LiNbO_3 와 매우 유사한 광학적 성질을 보유하고 있고, 광손상(optical damage) 측면에서도 LiNbO_3 보다 우수한 특성을 가지고 있지만, Curie 온도가 LiNbO_3 보다 훨씬 낮아서 광도파로 제작공정시 많은 제약을 받는다. Curie 온도보다 높은 온도에서 공정이 이루어진 경우, poling 공정을 통해서 전기광학효과를 복원시켜야만 기능소자로 활용할 수 있다. BaTiO_3 는 LiNbO_3 보다 20배 이상 큰 전기광학 계수를 가지고 있으나, 단결정 성장이 매우 어렵고, Curie 온도 이하에서 가능한 광도파로 제작 기술이 아직 발표되지 않고 있는 이유 때문에 현재 거의 활용되지 못하고 있다.

표 1. 대표적인 전기광학 결정과 특성

결정	no	ne	no-ne	전기광학계수	Curie 온도
LiNbO_3	2.2866	2.2028	0.083	$r_{33}=30.8$	1140
LiTaO_3	2.176	2.181	0.005	$r_{33}=30.3$	630
KDP	1.51	1.47	0.04	$r_{33}=10.6$	
SBN	2.1377	2.2820	0.035	$r_{33}=420$	75
BaTiO_3	2.437	2.365	0.072	$r_{42}=820$	395

2. 광도파로 제작공정

일반적으로 LiNbO_3 를 이용한 전기광학 집적소자의 제작공정은 비교적 간단하고, 재생성(reproducible)이 가능하며, 전 제작공정은 광도파로 제작, 전극제작, 광섬유와의 접속으로 분류된다. LiNbO_3 에 대한 광도파로 제작기술로서 Ti 확산법과 이온교환법이 널리 이용되고 있다. Ti 확산법은 광원의 종류에 따라서 적당한 두께 및 폭을 갖는 Ti 패턴을 사진식각(photolithography) 공정을 이용하여 형성한 다음, $980\sim 1050^\circ\text{C}$ 사이의 적당한 온도에서 수시간 확산시킬 경우, Ti이 확산된 곳의 굴절률이 약 $0.005\sim 0.01$ 정도로 증가되어 광도파로가 형성되어진다. Ti 두

께 및 폭, 확산온도 및 시간 그리고 확산분위기등과 같은 자세한 공정조건들은 단일모드, 저손실 광도파로를 제작할 수 있도록 결정되며, 관련된 이론과 증명된 실험결과들은 여러 문헌을 통해서 쉽게 얻을 수 있다. 광도파로에 광원을 입사시키기 위해서는 광도파로의 단면을 $1\mu\text{m}$ 이하의 수준으로 연마(polishing)하는 것이 필요하다. 일반적으로 Ti을 고온으로 확산시킬 경우, LiNbO_3 로부터 $\text{O}_2/\text{Li}_2\text{O}$ 가 빠져 나오게 되며, 이는 비정상과 굴절률(extraordinary index), n_o 를 증가시켜 바람직하지 않는 기생 평면광도파로(parasite planar waveguide)가 형성하게 되어, 소자의 성능을 떨어뜨리는 원인이 된다. 이러한 도파로를 줄일 수 있는 여러가지 방법들이 고안되었는데, 확산시 수증기(water-vapor) 분위기를 유지할 경우, 효과적으로 이러한 도파로를 억제시킬 수 있으며, 현재 이 방법을 가장 많이 이용하고 있다.^[5] 한편 재생성이 가능하고, 매우 균일한 저손실 광도파로를 제작하기 위해서는 확산시 기판 표면 분위기를 균일하게 유지하는 것이 중요하다. 그림 1과 같이 LiNbO_3 기판을 백금 상자속에서 확산시키면, 재생성이 가능한 광도파로를 제작할 수 있다. 백금상자는 확산시 기판주위의 온도분포와 확산분위기를 매우 균일하게 그리고, 청결하게 기판주위를 유지시킨다.^[6] 또한 균일한 광도파로를 제작하기 위해서는 사진식각공정시, 마스크(mask)와 기판 사이를 $0.25\mu\text{m}$ 이내

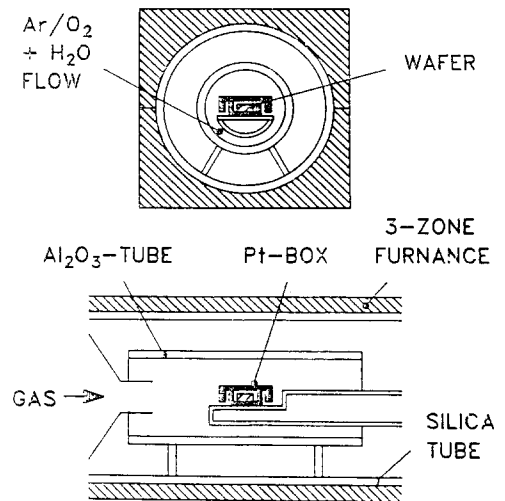


그림 1. 백금상자를 이용하는 Ti 확산로의 내부 개요도

로 밀착시켜야 하며, 마스크 정렬시 허용편차를 0.5 μ m 이하로 유지해야 한다. Ti 증착공정시에는 10⁻⁶ Torr 이하의 진공수준을 유지해야만 재생성이 가능한 Ti 질량밀도를 얻을 수 있다. Ti 패턴 폭과 두께 그리고 LiNbO₃의 Li/Nb 조성비 변화는 광집적소자 성능에 큰 영향을 미치며, 특히 방향성 결합기(directional coupler)에서는 결합길이(directional coupler)에 많은 영향을 미친다.^[7]

MaO 확산 또는 양성자(proton) 교환으로서, Ti 확산으로 제작된 광도파로를 재조율할 수 있다. 전자의 방법을 이용하면 확산된 부분의 굴절률이 감소되어, Ti:LiNbO₃ 도파로가 표면 아래로 묻히게 되며, 표면산란으로 부터 야기되는 산란손실이 줄어들게 된다.^[8] 이는 모드간의 정합을 개선시켜 결합률을 증가시키되며, 전극으로부터 도파로가 분리되어 비정상모드의 흡수를 막을 수 있게 된다. 후자의 방법은 비정상 굴절률(extraordinary index), n_e를 크게 증가시키며 ($\Delta n_e/n_e=6$), 정상굴절률(ordinary index), n_o를 감소시킨다 (즉, $\Delta n_o/n_o=-2$) 따라서 Ti 확산후 연속해서 양성자 교환을 할 경우, 도파로의 복굴절률(birefringence) 또는 소자의 분산(dispersion)을 조율할 수 있다.^[9]

3. 전극 제작공정

전기광학계수를 효율적으로 이용하기 위해서는 적절한 전극배열이 필요하며, 전극구조는 소자의 성능 및 안정도에 큰 영향을 미치기 때문에 전극 제작공정은 매우 중요하다. 그림 2는 z-cut, x-cut LiNbO₃에 널리 이용되는 평판형 전극구조를 나타낸 것이다. LiNbO₃의 전기광학 계수는 6x3 텐서(Tensor)형이며, 이 중에서 결정축(Z-axis) 방향의 전기장에 의해서 기동되는 r₃₃가 가장 큰 값을 보유하고 있기 때문에, 전극은 결정축 방향으로 전기장이 생성될 수 있도록 배열하는 것이 바람직하다. 물론 편파 변환기, 편파와 무관하게 동작하는 결합기 같이 특별한 기능을 수행하는 소자 경우에는 r₁₂, r₂₂, r₅₁와 같은 전기광학계수들을 이용할 수 있다. Z- LiNbO₃를 이용해서 제작되는 소자 경우에는 TM 모드와 수직방향의 전기장만이 r₃₃ 전기광학계수를 이용할 수 있으며, 동작전압을 줄이기 위해 push-pull형 전극이 광도파로 위에 놓이게 한다. TM 모드는 쉽게 금속에 흡수되므로, 전극과 도파로 사이에 SiO₂ 또는 Si₃N₄와 같은 유전체를 완충박막(buffer layer)으로 삽입해야 된다. 투명하면서, 양호한 전기전도도를 가지고 있는 ITO(indium-tin-oxide)를 이용할 경우에는, 완충박막을 사용할 필요는 없지만 널리 이용되지는 않고 있는 실정이다. X-LiNbO₃를 이용한 소자인 경우에 r₃₃를 이용하기 위해서는 TE 모드와 Z 방향의 전기장이

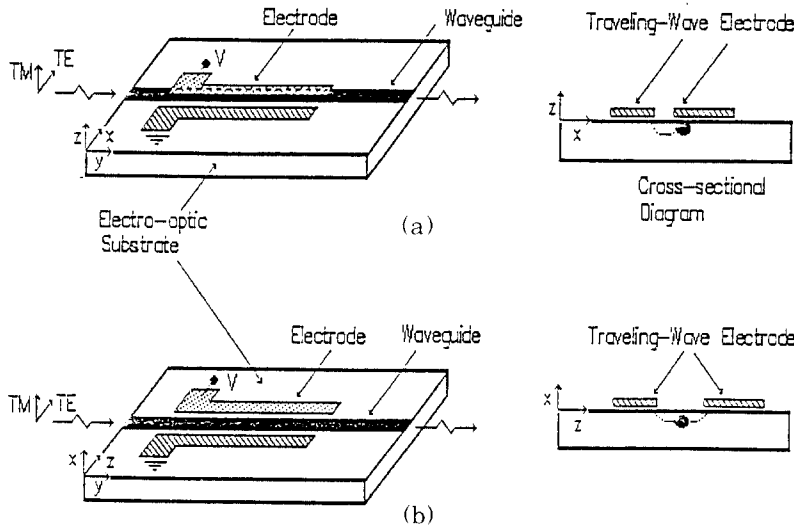


그림 2. 진행파형 위상 광변조기와 ACPS 전극구조의 단면도 (a) Z-LiNbO₃ (b) X-LiNbO₃

필요하며, 전극이 광도파로 양쪽에 배열되기 때문에 특별한 경우를 제외하고는 완충박막을 사용하지 않는다.

4. 광섬유 접속

광집적소자들이 통신시스템에 효율적으로 활용되기 위해서는 단일모드 광섬유와 광도파로사이에 접속이 필요하며, 이에 따른 삽입손실은 가능한 최소화 되어야 한다. 광섬유 접속손실을 포함하여, 광집적소자의 총 손실은 다음과 같이 구분하여 설명할 수 있다.

- 1.3-1.6 μm 파장대역의 광도파로인 경우, 광손실(propagation loss)은 약 0.2dB/cm 이하로 측정된다.
- 휘어진 광도파로 구조 또는 Y-분파기 등을 이용하였거나, 전극을 형성하였을 경우 0.1-0.5dB/cm 정도의 추가 손실이 발생된다.
- 무반사 코팅을 하지 않았을 경우에는 약 0.15dB/cm 정도의 Fresnel 손실이 발생된다.
- 광섬유와의 접속시 모드 부정합 때문에 손실이 추가될 수 있다.

광섬유와의 접속시 매우 높은 결합 효율을 얻기 위해서는 광섬유와 도파로 모드간에 모드정합과 더불어 매우 정교한 수준의 정렬이 요구된다. 광통신에 사용되는 표준용 광섬유를 도파로 단면에 부착시키기 위하여 그림 3-a와 같이 실리콘에 V자형으로 식각된 기판이 널리 이용되고 있다. 특히 그림 3-b처럼 직각 홈 모양의 groove를 이용하면 편파유지형 광섬유(polarization maintaining fiber)를 거의 자동적으로 편파축에 대해서 정렬시킬 수 있다. 또 한편, X-, Z- LiNbO₃에 제작된 광도파로는 길이 대 폭의 비율을 1:1.1로부터 1:1.5까지, 타원형 near field 형태를 유지하기 때문에, 편파 유지용 광섬유의 타원형 모드와 잘 결합될 수 있다.¹⁰

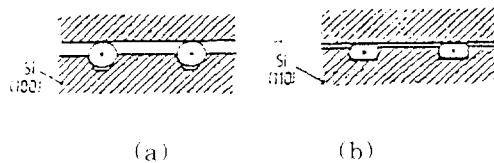


그림 3. 광섬유를 광도파로에 접속시키는데 사용되는 기판의 단면도
(a) 표준형 광섬유 (b) 편파 유지용 광섬유

III. 통신용 광집적 소자

1. 진행파형 고속 광변조기 및 스위치

직접검파(direct detection)를 포함한 광통신 시스템의 전송부에서 Ti:LiNbO₃ 강도 광변조기를 이용하면, 작은 변조전압에도 소멸비가 매우 좋은 수 GHz 이상의 변조대역과 순도가 좋은 위상변조와 같은 장점들을 얻을 수 있다. 기존의 전기적 변조방식과 레이저 다이오드의 직접변조 방식과 경쟁하기 위해서는 전송부에서 이용되는 광집적 소자들은 위에서 언급된 특징이외에도 삽입손실이 적어야하고, 광대역 변조특성을 가지고 있어야 된다. 코히런트 광통신 시스템에서는 phase-shift keying(PSK) 방식이 가장 높은 신호대 잡음비 특성을 갖기 때문에 그림 4와 같은 진행파형 위상 광변조기를 이용하는 것은 매우 효과적이다.¹¹ 이 변조기는 1.5 μm 파장대역에서 동작되도록 설계되었으며, 50 Ω 특성저항, 2-3 μm 두께의 비대칭 평면형(asymmetric coplanar: ACPS) 진행파형 전극구조를 이용하여 변조대역을 증가시켰다. 1.8dB 삽입손실, 8V 변조전압, 5GHz 변조대역이 관찰되었다.

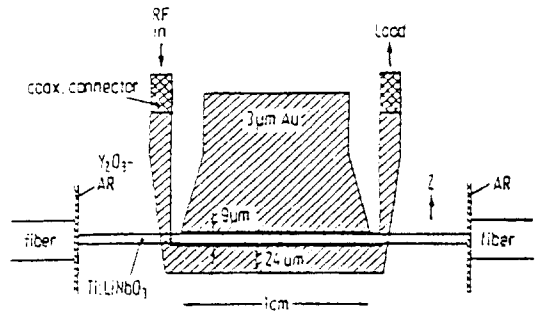
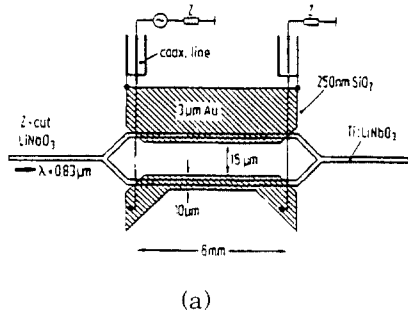
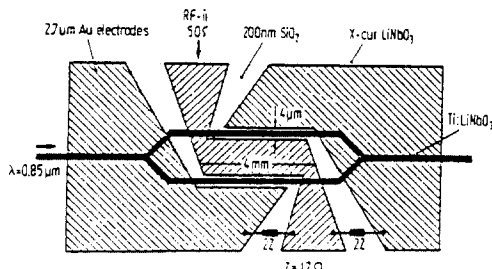


그림 4. ACPS 진행파형 전극을 이용한 위상형 광변조기¹¹

Mach-Zehnder 간섭기(interferometer), 방향성 결합기(directional coupler), X형 스위치를 이용하여 다양한 고속 강도변조기들이 Ti:LiNbO₃를 이용하여 고안되었다. 이 중에서도 그림 5와 같은 Mach-Zehnder 간섭형 변조기가 가장 큰 변조대역을 보였다.¹²⁻¹⁴ 그림 5는 Z-, X-LiNbO₃를 이용해서 0.8 μm 파장대역에서 동작하는 변조기의 전극 구조 및 배열을 보여주고 있으며, Z-cut은 ACPS형, X-cut은 CPW형 push-pull 전극구조를 이용하고



(a)



(b)

그림 5. 진행파형 전극구조를 이용한 Mach-Zehnder 간섭형 광변조기
(a) Z-LiNbO₃ (b) X-LiNbO₃

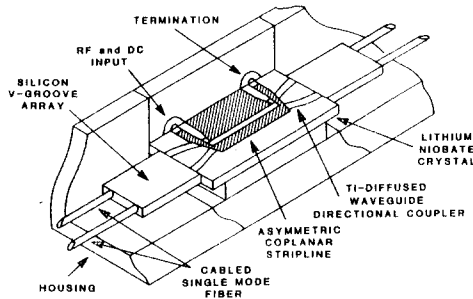


그림 6. 진행파형 ACPS 전극구조를 이용한 방향성 결합형 스위치

있다. 방향성 결합기(directional coupler)를 이용한 스위치는 4개의 입/출력 단자를 가지고 있어, 여분의 단자를 이용하여 입사되는 레이저 출력을 감지할 수 있도록 하여준다. 광섬유의 분산과 손실이 가장 적은 파장대역, 1.3 μm 또는 1.52 μm에서 동작하는 진행파형 고속 광스위치들이 다양하게 개발되었다. 그림

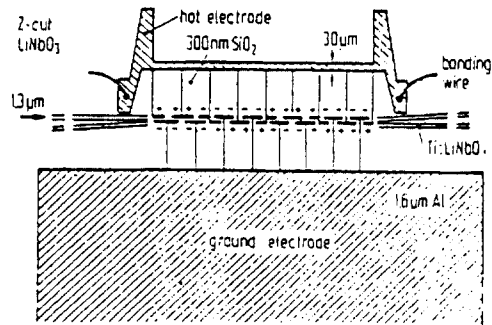


그림 7. 위상반전 전극구조를 이용한 방향성 결합형 스위치

6은 Z-LiNbO₃에 push-pull ACPS 전극구조와 광섬유 pig-tail이 부착되어 패키지화된 고속형 광스위치이다.^[14] 4GHz 변조대역, 약 8.1V 스위칭전압, 25dB 소멸비 그리고 2.9dB 삽입손실등이 측정되었다. 누화(crosstalk) 현상이 작은 방향성 결합형 스위칭 변조기는 그림 7과 같이 전극구간마다 위상반전 전압을 Δβ 인가하는 Δβ 위상반전 전극구조를 이용하여 제작될 수 있다.^[15]

지금까지 설명된 광변조기, 광스위치에서 변조대역을 제한시키는 요인으로는 위상부정합(phase mismatch), 분산, 전극손실등이 있으며, 특히 광도파로를 진행하는 광파의 위상속도 V_o와 변조파의 위상속도 V_m과의 차에서 기인되는 위상속도 부정합이 가장 큰 요인으로 나타나고 있다.^[20] 여기서 변조대역폭 BW는 위상속도차 |V_o-V_m|에 반비례하며, 다음과 같이 표현된다.

$$BW \propto \frac{1}{|V_o - V_m| \cdot l} = \frac{1.4c}{\pi |n_o - n_{eff}| \cdot l} \quad (1)$$

(l:전극의 길이, c:빛의 속도)

현재 위상속도 정합을 고려하지 않은 상태에서 LiNbO₃에 제작된 진행파형 광변조기의 최대 변조대역폭은 이론적으로 fm·l=6.5GHzCm 이며, 속도정합이 이루어진 경우에는 무한대의 변조대역을 가질수 있으나, 전극손실, 재료 및 구조분산을 고려할지라도 30GHz 이상의 변조대역이 가능하다. 따라서 효과적인 위상속도 정합을 실현하기 위해서는 변조파의 유효굴절률, n_m이 광도파로를 지나는 광파의 유효굴절률 n_o와 같아지도록 전극을 설계, 제작하는 것이 무

표 2. 상품화된 광변조기의 현황

COMPANY	OPTICAL MODULATOR	FEATURES
BT & D (British Telecom & Dupont)	Phase Modulator Mach-Zehnder Modulator Directional Coupler	$\lambda=1.3, 1.55[\mu\text{m}]$, $f=4[\text{GHz}]$, $V\pi=8[\text{V}]$ $\lambda=1.3, 1.55[\mu\text{m}]$, $f=4[\text{GHz}]$, $V\pi=5[\text{V}]$ $\lambda=1.3, 1.55[\mu\text{m}]$, $f=4[\text{GHz}]$, $V\pi=6[\text{V}]$
CRYSTAL TECHNOLOGY, U. S. A.	Optical Guided-Wave Phase Modulator Optical Guided-Wave Mach-Zehnder Modulator	$\lambda=1.55[\mu\text{m}]$, $f=3[\text{GHz}]$, $V\pi=10[\text{V}]$ $\lambda=1.55[\mu\text{m}]$, $f=3[\text{GHz}]$, $V\pi=8[\text{V}]$
AMPHENOL, U. S. A.	Linear-Guide Phase Modulator	$\lambda=1.3[\mu\text{m}]$, $f=1[\text{GHz}]$, $V\pi=6[\text{V}]$
FUJITSU, JAPAN	Traveling-Wave Mach-Zehnder Modulator	$\lambda=1.55[\mu\text{m}]$, $f=7[\text{GHz}]$, $V\pi=5[\text{V}]$
HOECHST, U. S. A.	18GHz Integrated Optic Modulators	$\lambda=1.3[\mu\text{m}]$, $f=18[\text{GHz}]$ $\lambda=1.55[\mu\text{m}]$, $f=18[\text{GHz}]$
UNITED TECHNOLOGIES PHOTONICS U.S. A.	ECL-Compatible Phase Modulator High Frequency Intensity Modulator APE Flat-Balanced Bridge Modulator	$\lambda=1.32[\mu\text{m}]$, $f=600\text{Mbit/s}$, $V\pi=5[\text{V}]$ $\lambda=1.3, 1.5[\mu\text{m}]$, $f=8, 12, 18[\text{GHz}]$ $V\pi=3.6, 4.4 [\text{V}]$ $\lambda=1.3, 1.55[\mu\text{m}]$, $f=0.6[\text{GHz}]$
E-TEK Dynamics, Inc	High Extinction Ratio E/O Switch Microwave Wideband E/O Phase Modula. Microwave Wideband E/O Mach-Zehnder.	$\lambda=1.3, 1.55[\mu\text{m}]$, 1ns , $V\pi=4/5[\text{V}]$ $\lambda=1.3, 1.55[\mu\text{m}]$, $f=3-20[\text{GHz}]$ $\lambda=1.3, 1.55[\mu\text{m}]$, $f=3-20[\text{GHz}]$
INTEGRATED OPTICAL COMPONENTS, LTD	3GHz 1x2 Amplitude Modulator 2.4Gbit Amplitude Modulator 1x2 Polarization Independent Optical Switch	$\lambda=1.3, 1.55[\mu\text{m}]$, $f=3[\text{GHz}]$, $V\pi=5[\text{V}]$ $\lambda=1.3, 1.55[\mu\text{m}]$, $f=2.4\text{Gbit}$, $5[\text{V}]$ $\lambda=1.3, 1.55[\mu\text{m}]$, $f=10\text{ns}$, $75[\text{V}]$

λ : 광의 파장 (wavelength of light), f : 3dB bandwidth, $V\pi$: 변조 전압

있보다 중요하다. 최근에 발표된 문헌에 의하면 미국 Bell Lab.에서는 LiNbO_3 에 Ti를 확산시켜 제작한 방향성 결합기에 ACPS 진행파형 전극을 이용하여 변조대역이 22GHz인 광변조기를 제작하였고¹⁶. 일본의 NTT에서는 위상형 광변조기에 차폐(shielded)형 위상형 전극구조를 이용하여 20GHz 변조대역을 얻었다.¹⁷ 현재 이 분야와 관련된 외국 기업들은 다양한 종류의 고속 광변조기와 스위치들을 제품화 하여 판매하고 있으며, 그 현황을 표 2에 요약하였다.

지금까지 검토된 전기광학 변조기는 TE 또는 TM 모드중 한 편파(polarization wave)에 대하여만 효과적으로 동작된다. 그러나 표준형 광섬유를 이용한 통신시스템에서는 편파에 관계없이 동작하는 소자나 또는 편파 조절 기능을 가진 소자들이 필요하기도하다. 서로 다른 편파에 대해서 전기광학 소자들의 동작 특성 및 성능이 달라지는 것은 전기광학 계수가 텐서형으로 분포되어 있기 때문이다. 그림 8은 Mach-Zehnder 간섭기에 두개의 전극을 구성하여, TE, TM 편파에 대해서 독립적으로 동작될 수 있도록 설계하였다.¹⁸ 각 전극에 적절한 두 인가전압을 선택하면 off 상태를 얻을 수 있지만, 완전한 on 상

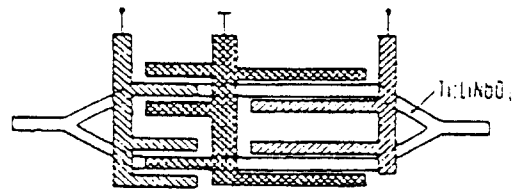


그림 8. 편파에 관계없이 동작하는 Mach-Zehnder 간섭형 광변조기

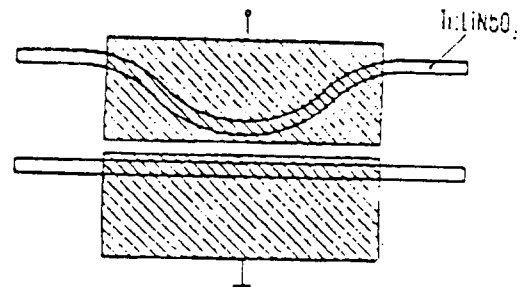


그림 9. Weighted coupling 원리를 이용한 방향성 결합형 스위치

태를 얻는 것은 불가능하기 때문에 추가적인 손실이 발생된다. 한 전극구조는 전기광학 계수 r_{33} 에 비해 작은 r_{13} 를 이용하고 있기 때문에 상대적인 인가 전압의 차를 전극길이로 조절하였다. 편파에 무관한 방향성 광스위치를 그림 9와 같이 weighted coupling 원리를 이용해서 제작하였다. 이 소자는 1.3 μ m 파장에서 동작되며, 까다로운 도파로 설계와 전극공정이 요구된다.¹⁹

2. 광스위치 ARRAY

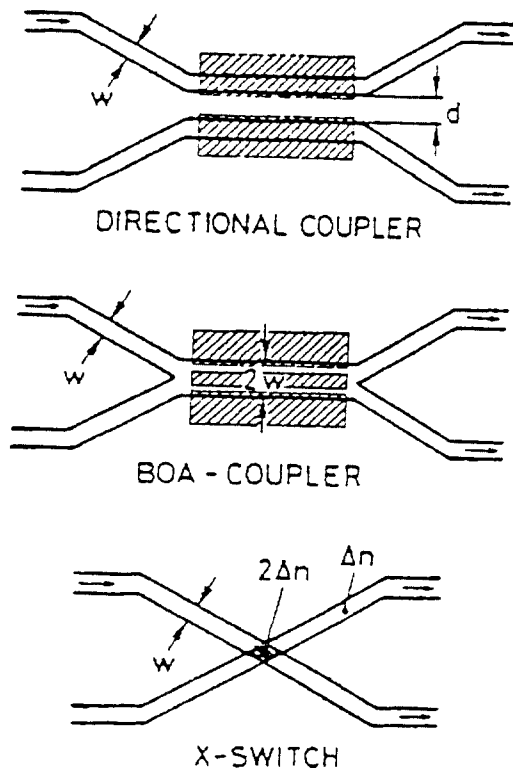
집적광학 공간형 스위치가 지니고 있는 가장 중요한 특징중의 하나는 기존의 전자형 스위치와는 대조적으로 정보대역과 부호형식에 관계없이 정보의 경로를 바꿀 수 있다는 것이다. 또한 집적형 광스위치는 여러개의 스위칭 소자를 한 기관위에 집적화 시켜서, 스위치 속도를 매우 빠르게 할수 있다. 물론 집적화를 증가시키면 스위치의 길이는 짧아져서 상대적으로

높은 스위칭 전압이 필요하게 되고, 스위칭 속도도 떨어지므로 trade-off가 필요하다.

스위치 배열구조에 이용되는 단위소자로는 그림 10과 같이 방향성 결합기, X형 스위치, BOA(Bifurcation Optical Active)가 주로 이용되고 있다.²⁰

이러한 스위치는 입, 출력 각각 두개의 단자를 가지고 있어 적당한 전기적 신호에 의해서 출력단자를 변경시킬 수 있다. 단일모드로 위상정합된 두개의 똑같은 도파로를 매우 가까이 배열시켜 제작되는 방향성 결합기 경우에는 입사 광파가 아래, 위 도파로로 반복, 결합(coupling)하면서 진행하기 때문에 결합길이를 정확하게 조절하면, 입사된 단자와 다른 단자쪽으로 입사광파를 출력시킬 수 있다. 따라서 전기광학 효과를 이용하면 두 도파로 사이의 위상정합을 파괴시켜 입사단자 같은 단자로 출력시킬 수 있게 된다. 즉 외부의 전기적 신호에 따라 광파의 경로를 스위칭할 수 있게 된다. 그러나 이 경우에 있어서 ⊗ 상태가 되도록 결합길이를 정확하게 조절하는 것은 공정상 매우 까다롭기 때문에 앞서 언급된 $\Delta\beta$ 형 전극구조를 이용하는 구조도 고안되었다.²¹

Two-mode waveguide coupler라 일컫는 BOA형 스위치는 대칭, 비대칭 두 모드를 도파시키는 도파로의 입, 출력 단자에 단일모드 Y형 도파로를 접속시켜 제작한 것이다. 따라서 가운데 도파로에서는 두 모드사이의 에너지가 그림 11과 같이 L_c 를 주기로 반복해서 교환되고 있으며, 전기광학 효과를 이용하여 아래의 식에 나타난 $\Delta\beta$ 를 변경시킬 경우 공간적으로 출력단자의 경로를 바꿀 수 있다.²²



$$BW = \frac{m\pi}{(\beta_1 - \beta_{2m})} = \frac{m\pi}{\Delta\beta} \quad (2)$$

$(m = 1, 3, 5, \dots)$

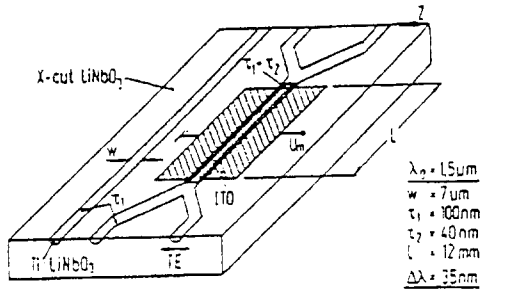
TIR(total internal reflection)의 원리를 이용하는 X형 스위치는 두 도파로의 교차점에 인가된 전압으로 굴절률 변화를 야기시켜, 입사된 광파를 전반사하여 ⊗-상태로 출력시키는 공간형 스위치이며, 입사 각도와 인가 전압과의 관계를 아래의 식 (3)으로 표현할 수 있다.²³

$$\theta_c \gg \theta = \sin^{-1}(1 - \Delta N_c / N) \quad (3)$$

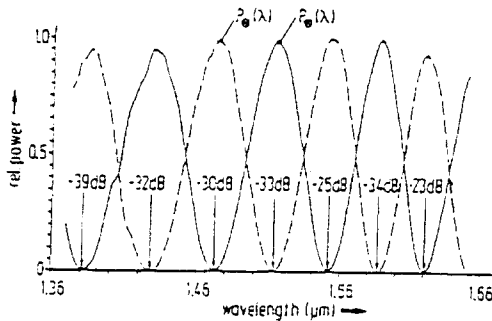
$$\Delta N_c = 1/2 \cdot \Gamma \cdot r_{33} \cdot n_o^3 \cdot V_c / d$$

여기서 θ_c 는 임계각이며, N는 도파로의 유효굴절

그림 10. 스위치 array에 이용되는 집적광학 소자
(a) 방향성 결합기 (b) BOA 결합기
(c) X형 스위치



(a)



(b)

그림 11. 도파로의 두 위상차를 이용하는 BOA형 결합기

물 그리고 ΔN 는 굴절률 변화량이다.
스위치 배열구조에는 신호의 개폐 성격에 따라 strictly nonblocking, rearrangeably nonblock-

ing, blocking으로 구분된다. Strictly nonblocking 경우에는 통과하는 신호를 방해하지 않으면서, 입/출력 단자를 연결시켜준다. Rearrangeably nonblocking에서는 nonblocking 경로를 구성하기 위하여 기존의 경로를 재배치 해야되며, 그동안 일시적으로 연결이 차단 되어 누화현상이 발생된다. 동기형 time-switch 시스템에서는 이러한 구조는 바람직하지 못하다. Block형 배열에서는 주어진 기판안에 적절한 수의 스위치를 가지고 많은 입/출력 단자를 구성할 수 있다.

그림 12는 스위치 배열구조중에서 널리 이용되는 크로스바(cross) 배열, 격자(lattice) 배열 그리고 나무(tree) 배열구조를 보여주고 있으며 각 배열 구조마다 차단 및 교환 횟수를 요약하였다. Strictly nonblocking을 이용하는 크로스바형 배열구조는 연속적으로 많은 스위치 접속이 필요하며, 경로의 재배치에 덜 민감한 시스템인 경우에는 격자형 배열구조가 바람직 하다. 또한 격자형 배열은 입/출력 단자사이의 간격이 크로스바형 보다 작아서 집적화하는데 유리하다.

집적광학 소자를 이용하여 스위치 배열을 구성하는 데는 나무형 배열구조가 가장 유리하다. 이 경우에 배열길이 및 스위칭 소자의 수가 배열 크기에 따라 logarithmically 증가한다.

비록 크로스바형 보다 더 많은 스위칭 소자가 필요하나, broadcast-ing 할 수 있다는 측면에서 매우 유리하다. 지금까지 제작된 가장 큰 스위치 배열은 그림 13과 같이 8x8 입, 출력 단자를 구성하고 있는 크로스바형 스위치 배열 구조이며, 64개의 스위치로 구성되었다.²¹

Structure:	Crossbar	Lattice	Tree
Number of Levels/switches	$2N-1/N^2$	$N/2N(N-1)$	$2 \log N/2N(N-1)$
Non blocking	Strictly	If rearranging is permitted	Strictly Convenient for broadcasting

그림 12. Ti:LiNbO₃를 이용한 스위치 배열의 종류 및 특성 비교

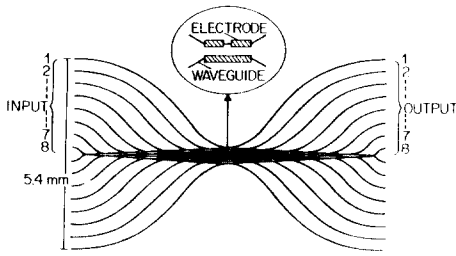


그림 13. Strictly nonblocking 8x8 크로스바 스위치 배열²⁴⁾

3. 파장필터 소자

LiNbO₃를 이용한 여러 종류의 파장필터 소자가 개발되었으며, 대표적인 소자들을 다음과 같이 요약하였다.

- 분산곡선이 서로 다른 두 도파로를 이용하여 제작된 방향성 결합기는 두 분산곡선이 겹쳐지는 파장에서 매우 효과적인 결합이 일어나서 대역필터(band-pass) 특성을 나타낸다.²⁵⁾
- Grating과 TE/TM 변환기를 이용해서 파장을 선택하는 필터.²⁶⁾
- 그림 14와 같은 BOA 소자에서, 가운데 도파로의 두 위상차를 이용하여 파장을 선택할 수 있는 필터.²⁷⁾

위의 세가지 경우에 대해서 다음과 같은 수식들을 이용하면, 통과되는 파장대역폭 $\Delta\lambda/\lambda_0$ 을 계산할 수 있다.

$$\Delta\lambda/\lambda_0 = (\sigma \cdot L)^{-1} \tag{4}$$

$$\Delta\lambda/\lambda_0 = \Lambda/L \tag{5}$$

$$\Delta\lambda/\lambda_0 = \lambda/(2 \cdot \Delta N \cdot L) \tag{6}$$

여기서 각 파라미터들은 다음과 같이 정의한다.

λ_0 : 중심파장 (center wavelength)

L : 소자길이

N1, N2 : 방향성 결합기의 도파로에 대한 유효굴절률

Λ : Grating 주기

ΔN : BOA 소자에서 두 모드간의 유효굴절률 차

$\sigma = (dn1/d - dn2/d\lambda)$ at λ_0 .

중심파장 $\lambda = 1.3\mu\text{m}$, 소자길이 10mm를 고려했을 경우, 위의 세가지 필터가 갖는 $\Delta\lambda/\lambda_0$ 는 0.04, 1.5×10^{-3} , 0.02로 계산된다. 이 중에서 grating을 이

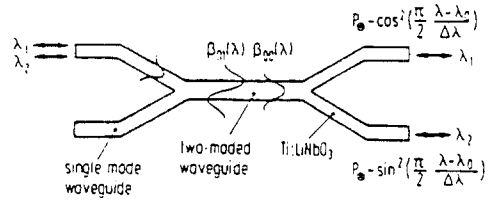


그림 14. 도파로의 두 위상차를 이용하는 BOA형 파장 필터

용한 필터가 가장 작은 파장대역 폭을 갖는다. 파장 필터 구성시 비교적 작은 굴절률차를 이용하면 파장대역을 크게할 수 있으며, 반사형 grating을 이용하면 선택도(selectivity)를 향상시킬 수 있다.

4. 코히런트(coherent) 소자

헤테로다인 또는 호머다인 코히런트 검파방식을 광통신 시스템에 이용하면, 직접검파 방식에 비해서 20dB 이상의 이득을 수신단에서 얻을 수 있으며, 좁은 간격으로 파장을 다중화시킬수 있어서 전송용량을 증가시킬 수 있다. 코히런트 시스템에 필요한 기능 즉 위상 또는 강도 변조, 변조신호와 국부신호간의 결합, 편파 안정, 주파수 천이등을 LiNbO₃ 광집적소자로 구현할 수 있다. 그림 15는 Mach-Zehnder 간섭기를 이용하여 주파수 천이를 구현하였다. 시스템 구성에 사용된 소자의 손실은 변조신호와 국부신호의 세기를 약화시키기 때문에 손실을 작게하는 것이 무엇보다 중요하다. 앞절에서 언급한 Mg 확산방법을 이용하면, 광섬유와의 접속, 광파의 모드 정합을 개선시켜 삽입 손실을 2dB 아래로 유지할 수 있게 한다.²⁸⁾

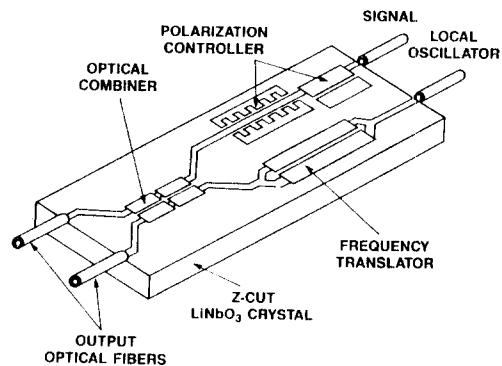


그림 15. Mach-Zehnder 간섭기, 편파 변환기, 신호 결합기등을 이용하여 구성된 코히런트 통신용 광집적소자

IV. 시스템 응용에 대한 현황

80년도 말부터 상품화되기 시작한 LiNbO_3 소자는 현재 세계적으로 10여개 이상의 회사들이 소자를 상품화하고 있다. 상품화 추세의 증가는 LiNbO_3 소자의 응용 분야가 점점 넓어지고 있음을 암시하며, 특히 CATV, 안테나 원격장치, 광통신시스템, 광섬유를 이용한 센서분야에서는 상품화된 시스템까지도 선보이고 있다. CATV 분야의 몇 회사는 중계기없이 LiNbO_3 외부변조기를 이용하여, 장거리 비디오 전송을 시도하였다. 외부변조기는 광원과 분리되어 시스템에 설치되므로, 저잡음으로 광파의 출력을 크게할 수 있으며, 동시에 매우 좋은 선형신호를 전송할 수 있다.

CATV 분야의 Harmonics Lightwave, Philips Broadband Network 사는 선형 광변조기와 YAG 레이저를 이용하여 1300nm에서 동작하는 시스템을 구성하였으며, Synchronous Communication 사는 광변조기와 증폭기를 이용하여, 1550nm에서 동작하는 시스템을 제작하였다. 특히 1550nm 파장대역에서 동작하는 시스템은 EDFA(erbium-doped fiber amplifier) 소자를 이용할 수 있으며, 직접변조시에는 성능이 가장 좋은 DFB 레이저를 이용하더라도 고속전송시 chirp 현상은 EDFA 성능을 약화시키게 된다.

장거리 전송 광통신 시스템에서 고속 디지털망 구성, WDM 그리고 시스템 용량을 확장시키는데 필요한 splitter 등에 LiNbO_3 소자들을 많이 이용하고 있다. Chirp 현상이 거의 없는 고속 광변조기, 1550nm DFB 레이저와 EDFA를 이용하면, 5-10Gb/s 정도의 고속 시스템을 구성할 수 있다. NTT는 LiNbO_3 광변조기, DFB 레이저, 분산천이 광섬유(dispersion shifted fiber)와 광증폭기 4개를 이용하여, 10" BER를 유지하면서 10Gb/s 전송속도로 327Km를 전송할 수 있는 시스템을 개발하였다. 한편 AT&T는 LiNbO_3 광변조기와 더불어 1.3 μm 분산천이 광섬유, 12개 광섬유 증폭기를 이용하여 2.5Gb/s 신호로 770 Km를 전송할 수 있는 시스템을 구성하였다.

파장다중 분야에서는 RACE 프로그램 일환으로 GEC사가 LiNbO_3 동조형 광필터를 이용하여 다중회 시스템을 시범적으로 제작하였다. 광섬유 가입자망

구성시 필요한 LiNbO_3 광송수신기를 BT와 NTT에서 개발하였다.


V. 결론

광통신용 $\text{Ti}:\text{LiNbO}_3$ 광집적소자의 종류, 동작원리, 응용범위, 발전추세등을 검토하였다. 이러한 소자들을 이용하는 광통신 시스템의 신뢰성을 높이기 위해서는, DC 전압과 온도에 따른 드리프트(drift) 현상, 편파의 영향, 광손상의 영향에 관한 문제들에 대해서 더 많은 노력을 경주해야 된다. 특히 드리프트와 온도에 따라 동작 특성들이 변하는 현상과 LiNbO_3 완충박막, 전극재료의 전기적, 온도에 따른 영향들이 소자의 특성에 큰 영향을 미친다. 광이 가지고 있는 고유한 특징중의 하나인 높은 주파수를 효율적으로 이용하기 위해서는 소자의 동작속도를 제한시키는 전자분야의 역할을 최소화 시키는 노력이 병행되어야 한다.

參考文獻

- [1] C. Rolland, L. E. Tarof, and A. Somani, "Multigigabit networks: The challenge," IEEE Lightwave Telecommunication Systems, pp. 16-26, May 1992.
- [2] G. P. Agrawal, T.M. Shen, "power penalty due to decision-time jitter in optical communication systems," *Electronic Lett.*, 22, pp. 450-451, 1986.
- [3] N. Henmi, T. Saito, M. Yamaguchi, and S. Fujita, "10 Gb/s, 100km normal fiber transmission experiment employing a modified prechirp technique," *Digest of Optical Fiber Comm. Conf.*, pp. 54, paper TuO2, Feb. 18-22, San Diego, CA, USA, 1991.
- [4] M. Minakata, S. Saito, M. Shibata, and S. Miyazawa, "Precise determina-

- tion of refractive-index changes in Ti-diffused LiNbO₃ waveguides," *J. Appl Phys.*, vol. 49, pp. 4677-4682, 1978.
- [5] J. L. Jackel, "Suppression of outdiffusion in titanium diffused LiNbO₃: a review," *J. Opt. Commun.* vol. 3, pp. 82-85, 1982.
- [6] R. J. Esdaile, "Closed-tube control of out-diffusion during fabrication of optical waveguides in LiNbO₃," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 33, pp. 733-739, 1977.
- [7] L. McCauhan and K. D. Choguette, "Origin and solution of finite extinction ratios in Ti:LiNbO₃ directional coupler switches," presented Topical Meet. Integrated and Guided Wave Optics, Atlanta, GA, 1986, pap. THBB6.
- [8] J. Noda, M. Fukuma, and S. Saito, "Effect of Mg diffusion on Ti-diffused LiNbO₃ waveguides," *J. Appl. phys.*, vol. 49, pp. 3150-3154, 1978.
- [9] M. De Micheli, J. Botineau, P. Sibillot, D. B. Ostrowsky, and M. Papuchon, "Fabrication and characterization of titanium indiffused proton exchanged (TIPE) waveguides in lithium niobate," *Opt. Commun.*, vol. 42, pp. 101-103, 1982.
- [10] G. A. Bogert, E. J. Murphy, and R. T. Ku, "Low crosstalk 4 × 4 Ti:LiNbO₃ optical switch with permanently attached polarization maintaining fiber array," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-4, pp. 1542-1545, 1986.
- [11] F. Auracher and D. Imhof, "Design tradeoffs for high-speed guided-wave phase modulators in LiNbO₃," *Siemens Forsch.-u. Entwickl. Ber.*, vol. 15, pp. 19-22, 1986.
- [12] R. A. Becker, "Traveling-wave electrooptic modulator with maximum bandwidth-length product," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 45, pp. 1168-1170, 1984.
- [13] H. Haga, M. Izutsu, and T. Sueta, "LiNbO₃ Traveling-wave light modulator switch with an etched groove," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-22, pp. 902-906, 1986.
- [14] S. K. Korotky, G. Eisenstein, A. H. Gnauck, B. L. Kasper, J. J. Veselka, R. C. Alferness, L. L. Buhl, C. A. Burreis, T. C. D. Huo, L. W. Stulz, K. C. Nelson, L. G. Cohen, R. W. Dawson, and J. C. Campbell, "4-Gbit/s transmission experiment over 117km of optical fiber using a Ti:LiNbO₃ external modulator," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-3, pp. 1027-1030, 1985.
- [15] F. Auracher, D. Schicketanz, and K. H. Zeitler, "High-speed $\Delta\beta$ -reversal directional coupler modulator with low insertion loss for 1.3 μ m in LiNbO₃," *J. Op. Commun.*, vol. 5, pp. 7-9, 1984.
- [16] S. K. Korotky, et al, "Optical intensity modulation to 40 GHz using a waveguide electrooptic switch," *APPL. Phys. Lett.* 50(23), pp. 1631-1633, Jun. 1987
- [17] K. Kawano, T. Kitoh, O. Mitomi, T. Nozawa, H. Jumonji, "a wide-band and low-driving, power phase modulator employing a Ti:LiNbO₃ optical waveguide at 1.5 μ m wavelength," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 1, no. 2, pp. 33-34, Feb. 1989.
- [18] W. K. Burns, T. G. Giallorenzi, R. P. Moeller, and E. J. West, "Interferometric waveguide modulator with polarization independent operation," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 33, pp. 944-947, 1978.
- [19] O. G. Ramer, C. Mohr, and J. Pikulski, "Polarization-independent optical switch with multiple sections of $\Delta\beta$ reversal and Gaussian taper functions," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-18, pp. 51-55, 1982.
- [20] C. S. Tsai, B. Kim, and F. R. El-

- Akkari, "Optical channel wave-guide switch and coupler using total internal reflection," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-14, pp. 513-517, 1978.
- [21] A. Neyer, "electrooptic x-switch using single mode Ti:LiNbO₃ channel waveguides," *Electron. Lett.*, vol. 19, p. 553, 1983.
- [22] M. Papuchon and A. Roy, "Electric active bifurcation:BOA," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 31, pp. 266-267, 1977.
- [23] R. V. Schmade and H. Kogelnik, "Electrooptically switched coupler with stepped $\Delta\beta$ reversal using Ti-diffused LiNbO₃ waveguides," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 28, pp. 503-506, 1975.
- [24] P. Granstrand, B. Stoltz, L. Thylén, K. Bergvall, W. Döldissen, H. Heidrich, and D. Hoffmann, "Strictly nonblocking 8 x 8 integrated optical switch matrix," *Electron. Lett.*, vol. 22, pp. 816-818, 1985.
- [25] R. C. Alferness and R. V. Schmidt, "Tunable optical waveguide directional-coupler filter," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 33, pp. 161-163, 1978.
- [26] R. C. Alferness and L. L. Buhl, "Polarization independent optical filter using interwaveguide TE-TM conversion," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 39, pp. 131-134, 1981.
- [27] F. Rottmann and E. Voges, "Integrated optical wavelength multiplexer/demultiplexer for single mode systems," in *Proc. 4th Euro. Conf. Integrated Optics*, 1987, pp. 40-43.
- [28] W. A. Stallard, A. R. Beaumont, and R. C. Booth, "Integrated optical devices for coherent transmission," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-4, pp. 852, 1986.
- [29] 정 홍 식, 외 2명, "진행과형 전기광학 집적소자에 대한 전극의 위상정합에관한 연구," 전자공학회논문지, 제 29권, A-8, pp. 41-48, 1992. 

筆者紹介



鄭 洪 植

1959年 6月 25日生

1982年 2月 서강대학교 전자공학과 학사

1984年 8月 서강대학교 대학원 전자공학과 석사

1989年 5月 Texas A&M 대학 전기공학과 박사

1989年 3月 ~ 1990年 2月 일본국신기술사업단 연구원

1990年 3月 ~ 현재 홍익대학교 전자전산공학과 조교수

주관심 분야 : 광통신시스템, 고속 광변조기 및 스위치, 광집적회로 소자