

집적광학 기술의 발전동향

김 창 민

(서울시립대학교 전자공학과)

■ 차 례 ■

I. 서 론

II. 집적광학의 기술 개요

III. 수동소자

IV. 기능소자

V. 유용한 광IC의 예

VI. 맺음말

I. 서 론

광통신을 레이저光이 100THz 이상의 높은 주파수를 갖고 있어서 원리적으로 광대역의 정보량이 전송 가능하다는 것 때문에 오랫동안 관심을 끌어 왔다. 1960년대에는 통신용으로 사용할 수 있는 LD, 광섬유들에 대한 기초적 연구가 행하여 졌다[1].

1960년 휴즈 연구소의 Maiman 박사가 합성루비 결정을 이용하여 높은 간섭성을 지닌(coherent) 光을 최초로 얻었으며, 1962년 MIT 링컨 연구소를 비롯한 IBM 및 GE의 연구진들은 각기 GaAs를 이용한 반도체 레이저를 연구 발표하였다. 이후 통신용의 필수조건인 광 source의 연속 발전, 실온동작을 목표로 많은 연구가 수행되어 졌으며, 1970년에 이르러 GaAs 2중 해테로구조와 strip 전극구조를 통하여 실온 연속 발전을 얻게 되었다.

1960년대 후반 광섬유는 고순도 유리의 경우 200 dB/km의 손실이 확인 되었고, 1970년에 이르러 Corning회사가 석영 유리를 이용 20dB/km의 손실을 얻음으로써 광통신이 유망하다는 확신이 생기게 되었다. 뿐만 아니라 GaAs 레이저의 파장과 당시 광섬유의 최저 손실이 되는 파장의 우연한 일치로 광통신의 미래를 환골 밝게 하였다. 현재는 0.2dB/km의 극저 손실치가 실현되고 있어 100~200km의 장거리 무중

계 광전송이 가능하다.

1960년대 초에 실험적으로 밝혀진, 유전체 층을 따라서 광의 전반사를 통하여 도파된다는 사실은 기관상에 증착된 얇은 유전체 박막을 이용한 수동, 능동 광소자의 연구개발을 촉진시켰다. 집적광학(Integrated Optics)의 역사는 1969년 벨 연구소의 Miller가 광IC의 개념을 제창함으로써 그 시작을 갖는다. 1970년대 초에 여러가지 물성의 기관이 집적광학의 재료로서 검토되었으며 SiO₂, KDP, LiNbO₃, GaAs 등의 전기광학적 속성들이 밝혀지게 되었다. 이후 수 μ m 단위를 갖는 광소자들, 이를테면, 광도파로, 광변조기, 모드변환기, RF 스펙트럼 분석기 등이 연구되었으며 나아가서는 이들의 기능소자들을 하나의 칩상에 집적화하고자 하는 "집적 광학"이 학문의 한 분야로 자리잡게 되었다[2].

광통신에 있어서 필수적인 요소를 꼽는다면, LD(광원), 광섬유(전송매체), PD(광검출기) 세가지들을 수 있다. 그러나 시스템을 구축하기 위해서는 이들 기본요소 외에도 광을 제어하는 기능소자, 즉, 광도파로, 광결합기, 광분파/합파, 광변조기, 렌즈, 프리즘 등이 필요하다. 이러한 수동 및 능동소자들이 모여 특정한 기능을 갖기 위해서는 정밀한 배열이 필요하다. 이러한 필요성을 수용하는 방안이 바로 단일 칩상에 광소자들을 박막형태로 집적화하는 것이다. 광원 또

는 광검출기를 포함한 광기능소자의 집적화는 좀더 효율적인 광통신을 운영하는데 필수 요소가 되어 갔다.

집적광학에서 구현하고자 하는 광회로를 광IC, 혹은 광전IC라 부른다. 특정기능을 수행하는데 필요한 소자들이 단일 기판상에 있으면 monolithic 광IC라 부르며 가능한 기판재료는 GaAs, InP 등이 있다. 필요한 소자들이 서로다른 기판에 hybrid 형태로 구성되어 있을 경우는 hybrid 광IC라 부르며, 광원을 GaAs 기판위에, 기능소자는 LiNbO₃ 기판위에 올리는 것이 그 한 예이다. monolithic 광IC가 이상적이기는 하지만 제작상의 어려움으로 인하여, 아직 monolithic 형태로 기능을 수행하는 경우는 드물다. hybrid 광IC는 제작이 쉬운 반면 이들을 배열, 조립하는 문제는 쉽지 않다. 그럼에도 불구하고 아직까지는 hybrid 광IC가 많은 연구에 대상이 되어왔으며, 상용화 되어있는 경우도 대부분 이에 속한다[3].

IC에서는 전하나 호물이 에너지 반송자 역할을 하며, 광IC에서는 단일 파장의 광이 에너지 반송자 역할을 하게 된다. 광IC내에서 광펄스의 전파속도의 빠르기는 IC내 전기펄스 속도의 2~3배에 불과하므로 신호처리속도의 측면에서 보면 별반 이득이 없다. 광IC의 필요성은 오히려 반송자 역할을 하는 光波動性에 제어에 있다고 보아야 한다. 광변조기의 설계가 그 대표적인 예이며 설계원리는 모두 波動性에 기초를 두고 있다.

1990년대 초까지 연구개발 되어진 집적광학기술은 광통신의 분야 말고도 혜택을 주게 되었다. 스펙트럼 분석기, 사이로스코프, 디지털 상관기, A/D 변환기, 광신호 처리기 등에서 효율적인 핵심 부품의 역할을 담당하고 있으며, 소형 경량이면서도 원가절감에 기여하고 있다.

II. 집적광학의 기술개요

1. 집적광학의 필요성

집적광학의 역사는 3세대로 분류되어 설명되는 것이 일목요연하다. 제 1세대는 기존의 광학세대이다. 광시스템은 bulk 형태의 광부품을 배열시켜 조합된다. 시스템 크기는 1m 정도, 광범의 지름은 1cm 정도이다. 제 2세대는 마이크로 광학세대이다. 광시스템은 여전히 bulk 형태이나 미세구조를 갖는 광소자, 즉, LED, LD, 광검출, 박막렌즈 등으로 구성되며, 광통신 시스템의 실현에 관련된다. 각 소자의 성능은 반

수스리온지라도 광소자들의 크기가 1mm 단위 정도이기 때문에 배열 및 고정에 있어서 만족감을 주기가 곤란하다. 제 3세대가 광IC 세대이다. 광IC를 구축함으로써 얻는 바는 다음과 같다.

가) μm 단위 정도의 소자들이며, 단일모드 반을 취급할 수 있다. 이전 세대의 광소자는 기하광학에 근거를 두는 한편, 광IC 소자 설계는 파동광학에 기초를 둔다.

나) 모든 광소자가 단일 기판상에 집적설계 되므로 배열, 고정의 문제가 해결된다. 미세한 진동이나 온도 변화에도 불구하고 안정된 시스템을 보장한다.

다) 광도파 구조가 모두 단일모드이므로 전기광학효과, 음향광학효과, 온도광학효과들을 이용한 광제어가 용이하다.

라) 단일모드이므로 제어전극의 간격이 작고 따라서 저전압제어, 고속변조가 가능하다.

마) 소형, 경량으로도 특정된 기능을 수행할 수 있으며, 대량생산이 가능하여 저렴한 값으로 제품을 공급할 수 있다.

2. 집적광학의 영역 분류

집적광학에 관한 연구는 지난 10년간 미국, 유럽, 그리고 일본을 중심으로 많은 발전을 거듭하였으며 특히 박막성장기술, 미세구조 제조기술 등에 있어서 괄목할만한 성장을 이룩하였다. 첨단기술에 힘입어 광도파에 관한 기술은 여러제질의 기판에 대하여 거의 확립되었으나, 아직도 능동 및 수동소자의 집적화에 관한 기술은 많은 개발의 여지가 있는 상태이다. 다음의 분류를 통하여 집적광학의 영역을 분류해 보기로 한다.

가) 박막 도파로 제작기술: 박막성장, 광도파로 제작, 소자특성 모델링

나) 수동소자: 렌즈, 기울, 분파/합파기, 편광기, 격자, 굽음

다) 기능소자: 광변조기/스위치, 모드변환기, 쌍안성 소자, 고속제어소자, 비선형 소자, 음향 광학소자

라) 집적기술: 광연패턴 기술, 각 소자간의 고효율 광결합

마) 응용소자 개발: 신호처리 영역(RF 스펙트럼 분석기, A/D 변환기), 광통신 영역(광

스위치 망), 측정영역(광섬유 자이로스코프), 감지 영역(온도센서, 압력센서, 고압센서)

이상의 다섯가지 대분류 중 가), 나), 다)영역의 기술개발은 많이 진척되어 있는 상태이다. 라)영역은 아직도 꾸준한 연구가 진행되고 있으며 마)의 응용소자 영역은 부분적으로 개발되어 일부는 이미 상용화되고 있다.

3. 집적광학의 난제

현재 연구개발 과정에 있는 몇가지의 기초 난제를 소개하면 다음과 같다.

가) 산란 및 흡수 손실

GaAs 기판상의 소자의 경우 1970년대 중반 3dB/cm 이상의 흡수손실을 보였으나, 그후 MBE나 MOCVD와 같은 새로운 박막성장기술로 말미암아 지금은 0.2dB/cm 정도이다. 한편 LiNbO₃의 흡수손실 역시 0.2dB/cm 정도이다. 그러나 광통신 등과 같은 분야에서 더욱분제가 되는 것은 흡수손실보다도 산란손실이다. GaAs 광도파로 경우 도파로 벽의 기침음은 산란손실을 일으키며, 이는 신호전력에 대한 잡음으로 작용하여 낮은 S/N 비를 갖게된다.

나) 광변조/스위칭의 소멸

현재까지 개발된 광변조 혹은 스위칭 소자에서 25dB 이상의 소멸비를 얻은경우는 별로 없다. 통신에 있어서 많은 경우 50dB 이상의 소멸비가 요구되고 있다. 큰소멸비를 얻기 위해서는 방향성 결합기형 변조기의 경우, 두 결합선로의 간격을 넓혀야만 가능하다. 그러나 동시에 높은 제어전압과 광역패턴의 어려움을 감수해야만 하는 어려움이 뒤따른다.

다) 광역 패턴 기술

여러 광소자로 이루어진 특정 기능의 광IC의 일반적인 길이는 5cm 정도가 된다. 이를 제작하기위한 마스크는 7cm×2cm 정도이다. 광도파로의 폭은 0.1μm 정도의 오차를 감안, 약 5μm 정도이다. 이는 VLSI소자 제작에 비하여 준비과정이 까다로운뿐 아니라 마스크 접착시 광역에 걸쳐 균일한 contact가 힘든 문제가 있다.

라) 입사광 결합 효율

대표적인 단일모드 광도파로의 크기는 2μm×5μm이다. 한편 단일모드 광섬유의 코어 직경은 8μm이고, LD 역시 단일모드로 설계된다. hybrid 광IC의 경우 광도파로는 LD를 입력단으로 광섬유를 출력단으로 하여 효율 높은 결합을 하여야 한다. 현재로는 굴절률 정합재료를 사용하여 직접 입사시키는 경우가 80% 정도의 가장 높은 결합효율을 갖는다. 그러나 이를 위해서는 광IC 및 광섬유 결합부위의 정교한 연마가 요구되며, 정밀한 상대위치 고정 이 필요하다. V형 홈을 준비하는 기법도 제안된 바 있으며 영구 접속시키는 방안도 연구 개발중이다.

마) 광IC 기판 재질

초기에는 전기광학효과를 가진 재질로 유리, KDP, LiNbO₃ 등이 지목되었다. 그후 GaAs, InP 등의 화합물 반도체 재질이 MBE, MOCVD와 같은 최신 박막성장기술에 힘입어 극저손실을 얻게되면서부터 검토되었다. 1) 유리는 값싼 반면 전기광학효과가 거의없어 전극제어가 필요한 능동소자로는 쓰이지 않고 분파/합파기 같은 수동소자에 이용되고 있다. 2) 광통신의 고속 변조소자로는 역시 큰 전기 광학계수를 갖고있는 LiNbO₃(n³r₃₃ = 3.06×10⁻¹¹ μm/V)가 꼽힌다. 0.633 μm대의 광통신에서는 광전력이 큰경우 광손상을 입는 경우가 있으나 1.3μm, 1.55μm 대에서는 별문제가 없으며, 대단히 낮은 삽입손실을 보장하고 있다. 3) GaAs나 InP는 비교적 좋은 전기광학계수(n³r₃₁ = 0.48×10⁻¹¹ μm/V)를 가지고 있을 뿐 아니라, LD, PD 등이 가능한 재질로서 monolithic 광IC를 구현할 수 있는 후보로 꼽힌다. 현재개로서는 식각기술, 광소자 각각의 layer 배열, 소자간의 연결 등으로 아직은 monolithic 광IC를 구현하는데 어려움이 있다.

III. 수동소자

광IC는 회로구성을 위해 여러가지 도파소자와 부품들로 구성되어 있다. 회로소자는 일반적으로 수동소자와 기능소자로 분류되며, 이는 외부신호에 의한 광파제어가 있는가 없는가 분류 기준이 된다. 능동소자는 발진 또는 증폭기능을 가진 LD, LED 등이 이에 속한다. 이후에서는 광회로의 기본을 이루는 수동소자에 대하여 기술하기로 한다.

1. 광 경로 굽힘

1.1 반사형 격자소자

그림 1에 반사형 격자소자의 그림이 있다. 여기서 반사형 격자소자가 Bragg 격자를 이용하여 광경로를 전환시키는 원리만을 언급한다.

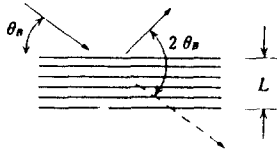


그림 1. 반사형 격자소자(Bragg 격자간격: L)

입사와 波벡터를 K_1 , 반사와 波벡터를 K_2 라고 하고 격자벡터를 $K (= 2\pi/L)$ 로 한다. Bragg 조건은 다음과 같이 표시된다.

$$K_2 - K_1 = nK \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (1)$$

(1)식은 다음과 같이 좀더 간결한 형태로도 표기된다.

$$2L \sin \theta = n\lambda \quad (2)$$

반사율은 격자의 끝이 깊을수록, L 이 클수록 커진다. 이상에 기술한 반사형 격자소자는 그 각도를 임의의 조정할 수 있는 반면, 반사율을 높이기 위해서는 반사광의 빔폭이 넓어질수 밖에 없는 단점을 안고있다 [4].

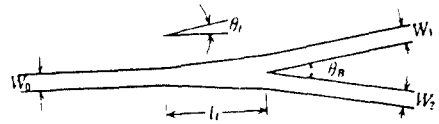
1.2 광도파로 굽힘

또다른 광경로를 굽히는에는 굽은 광도파로를 사용하는 경우가 많다. 광섬유의 입력단 혹은 출력단이 방향성 결합기 스위칭 소자와 연결되는 경우, 두 결합도파로의 간격이 $4 \sim 5\mu\text{m}$ 인데 반해 광섬유 클래드 크기는 $125\mu\text{m}$ 이므로 두 도파로의 종단은 결국 $150\mu\text{m}$ 간격 정도로 벌어져야만 한다. 이때의 굽은 광도파로는 필연적이며 도파는 코너를 0.5° 이내로 2번 이상에 걸쳐 꺾는 경우와 S형 커브를 그리며 꺾는 두 경우가 대표적이다. LiNbO₃ 기판 사용의 경우 1dB 이내의 손실로 제작이 가능하다[5].

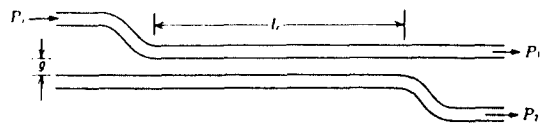
2. 광분파기/광결합기

광결합기는 광분파기의 역과정이 그대로 재현되는

원리이므로, 여기서는 광분파기에 관해서만 언급한다. 그림 2에는 Y분기와 방향성 결합기를 보였다.



(a) Y-분기



(b) 방향성 결합기

그림 2. 단일모드 분파기

2.1 Y분기 분파기

Ti:LiNbO₃의 경우 확산적 Ti strip 넓이가 $4 \sim 5\mu\text{m}$ 이면 대표적인 단일모드 도파로를 형성한다. Y-분기의 각도가 0.25° 정도이면 약 0.1dB의 산란손실을 가지나 이런 경우 분기의 길이가 필요이상으로 길어진다. 보통 1° 정도의 분기각도를 갖게 설계하며 산란손실을 약 1dB 정도가 된다[6].

2.2 방향성 결합기(Directional Coupler)

두 평행하고 대칭인 단일모드 도파로가 $4 \sim 5\mu\text{m}$ 정도 떨어져 있는 광결합기(DC)이다. 어느 한 입력단에 입사된 광이 100% 다른 도파로의 출력단으로 나오는 경우 이때 결합선로의 길이를 광결합길이 l 이라 한다. 정상모드 이론(Normal Mode Theory)에서는 두 개 이상의 도파로가 있는 경우도 모두 한개의 도파로로 취급하여 전파정수 β 를 구한다. 단일 도파로가 단일모드를 전송하는 경우는, 평행 대칭의 결합선로를 이루면 두개의 전파정수 β_0 (even mode), β_1 (odd mode)만을 허용한다. 이때

$$l = \frac{\pi}{(\beta_0 - \beta_1)} \quad (3)$$

l 은 (3)식과 같이 결정된다. 결합선로의 길이를 $l/2$ 로 하면 입사광은 반반으로 갈라진다. 이상적인 경우는 손실이 없다고 보지만, 방향성 결합기의 설계시 광도파로의 굴절을 분포의 모델링이 정확치 않은 이유로 50%, 50%의 분기를 기대하기는 쉽지 않다.

3. 편광기, 모드 분리기

대부분의 LD 제품들이 TE혹은 TM모드의 직선편광 형태로 광을 반사하며, 광섬유를 통과한 광은 광소자에 입사된다. 광섬유를 통과하는 동안 광은 대체로 타원편광으로 변화된다. 한편 대부분의 광소자들은 TE나 TM모드 중 한모드에 대해서만 설계되므로 다른 한 모드는 제거시킬 필요가 있다. 경우에 따라서는 모드분리가 요구되기도 하고 모드변환의 필요가 있을 수도 있다.

3.1 편광기

여러가지의 편광기가 연구되고있으나 바 있지만, 여기서는 가장 간단한 형태를 소개하기로 한다. 그림 3에 는 metal-loaded 광도파로가 있다.

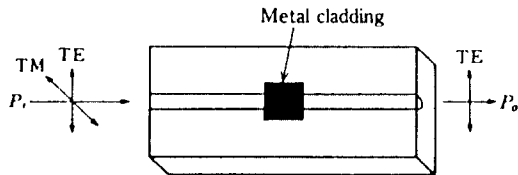


그림 3. metal-loaded 광도파로

도파로는 $Ti:LiNbO_3$ 로 형성되어 있으며 그위에 5 mm 길이를 갖는 A1을 증착시킨다. 광이 도파로를 통과하는 중 TE모드는 3dB 정도 전파손실을 갖는데 비하여 TM모드는 전계가 A1에 수직인 관계로 30dB 정도의 감쇄를 갖는다. 진공증착 metal 박막 중 A1이 가장 선호되고 있으며 그 이유는 A1이 가장 큰 유전율의 허수치를 갖고 있기 때문이다[7].

3.2 모드 분리기

z-cut $LiNbO_3$ 는 대표적인 비등방성 물질 중의 하나이다. 적층구조를 갖는 방향성 결합기와 재질의 비등방성을 이용하여 모드 분리기를 구성할 수 있다. 그림 4의 모드 분리기의 도파로 1, 2가 있고 중간층의 굴절율과 두께를 조정하여 TE모드의 β_1 과 β_2 가 같게 한

다. 한편 TM모드는 비등방성을 이용하여 $\Delta\beta \gg k$ 가 되도록 설계하면 그림 4와 같은 모드 분리를 받을 수 있다.

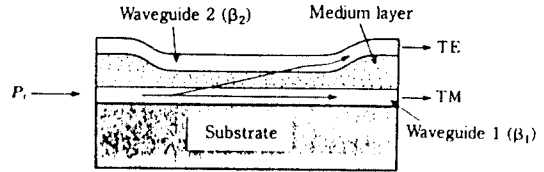


그림 4. 모드 분리기

4. 파장분할 변조/복조기

파장분할기는 여러파장이 혼합된 신호를 파장별로 공간적으로 분리해 내는 소자를 말한다. 이를 역으로 사용하면 여러 파장의 신호를 합하는 기능도 수행할 수 있으므로 파장분할 복조기만을 검토하기로 한다. 이소자는 WDM 광통신에서 송신기와 수신기의 필수 소자이다. 1:1의 반사형 격자소자가 그림 5와 같이 배열됨으로써 파장분할기능을 수행하게 된다[8].

그림 5의 배열된 세 격자는 각각 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 에 대하여 Bragg 반사를 일으키는 작용을 한다.

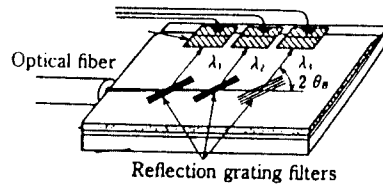


그림 5. 반사형 격자소자를 이용한 파장분할 변조/복조기

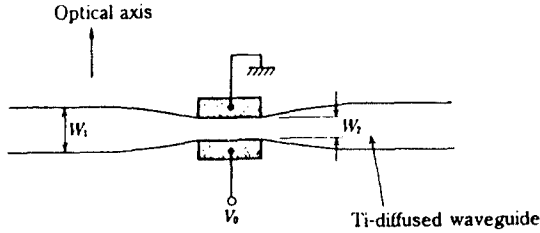
IV. 기능 소자

수동소자들에서는 외부 전기신호에 의한 광제어 기능이 없었다. 여기서 다루는 기능소자들은 외부신호에 의한 광제어 기능이 있으며 여러종류의 광스위치/변조기, 진행파 고속 변조기, TIR 스위치, TE-TM 모드 변환기, 음향 변조기 등이 있다.

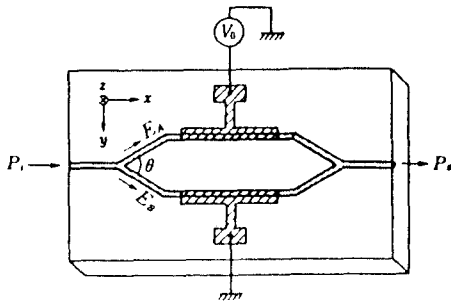
1. 광 스위치/변조기

광스위치/변조기는 IM(Intensity Modulation)에서 많이 쓰일 뿐아니라 光波의 위상이 갖는 특성을 고려

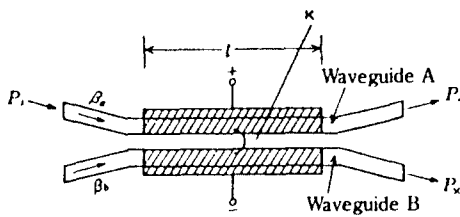
하여 여러가지 정밀 계측용으로 이용된다. 그림 6에는 여러가지 종류의 광스위치/변조기가 소개되고 있다.



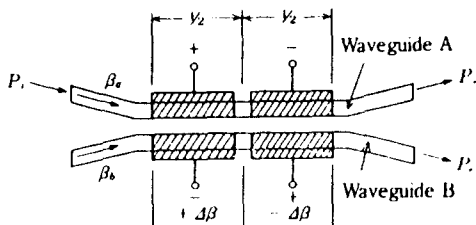
(a) 차단형



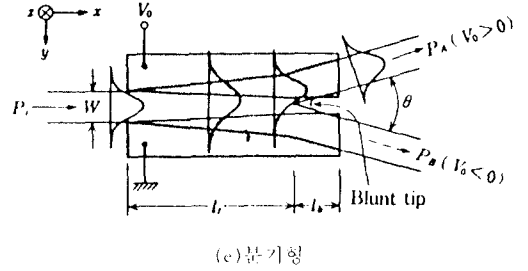
(b) Mach-Zehnder형



(c) DC형



(d) 교변 $\Delta\beta$ DC형



(e) 분기형

그림 6. 광스위치/변조기

그림 6은 LiNbO₃ 기판 위에 제작된 광스위치 또는 변조기 역할을 하는 소자들이다. 이들 모두에 공통점은 전극에 인가된 전기신호로 말미암아 전극 밑으로 전계가 형성되어, 전기광학효과를 통하여 광도파로의 굴절율을 변화시킴으로써 광제어를 하는 것이다.

1.1 차단형

신호가 있는 도파로의 허리부분은 cut-off 상태이다. 전계를 걸면 광도파로 영역 굴절율이 증가하여 도파 상태가 된다. 이러한 원리는 전기신호가 광신호의 on-off로 변화되어 스위칭을 일으킨다.

1.2 Mach-Zehnder형

아무런 전기신호가 없는 상태에서는 대칭이므로 Y-분기 입력단에서 나뉘어진 광은 Y-분기 출력단에서 원래의 파형을 복구한다. 전기 신호가 걸리면 위도파로의 굴절율은 증가, 아랫쪽은 감소하여 각 도파로의 $\beta_1 \neq \beta_2$ 가 된다. 적당한 전기신호에 대하여 Y-분기 출력단의 두 波의 위상차가 π 가 되면 광출력은 0이 된다.

1.3 방향성 결합기(DC)형

방향성 결합기의 광결합 길이가 l 이라면, 전기신호가 없을때는 다른 도파로로 광이 출력된다. 결합모드 이론에 의하면

$$|\beta_1 - \beta_2| = \frac{\sqrt{3}\pi}{l} \tag{4}$$

가 성립되도록 유도전계에 의한 두 도파로 β 값의 차이를 유도하면 광은 입사된 도파로의 출력단으로 나오게 된다. 단, 실제 소자의 광결합 길이가 l 이 l 과 오차가 클수록 소멸비, $10\log(P_{max}/P_{min})$, 가 좋지 않다.

1.4 교번 $\Delta\beta$ DC 형

방향성 결합기의 경우 도파로의 특성(예를 들면 편광에 따른 굴절률분포 등)을 정확히 모름으로 말미암아, 소자 제작후 기대 이하의 소멸비를 얻은 경우가 많다. 교번 $\Delta\beta$ DC형은 전극이 2개로 나뉘며 두전극의 극성을 반대로 한다. 때문에 광스위칭을 일으키는 조건에 있어서 유연성이 많게 되며, 어떠한 소자 길이에도 대응되는 전압이 존재하므로 제작이 용이하다.

1.5 Y분기형

분기형 도파로의 입력단에 전계를 인가하여, 광이 굴절율이 높은곳으로 회절하는 현상을 이용한다. 40V 이상의 인가전압이 요구되며 소멸비도 별반 좋지 않으나, 비대칭 Y분기를 쓰면 25dB까지의 소멸비를 얻을 수 있다.

이상 열거한 광스위치/변조기 외에도 Y분기DC형, TIR(내부 전반사)형 등이 있으나 생략하기로 한다.

2. 진행파 변조기

진행파 전극을 사용하여 40GHz 이상의 광대역 변조를 얻을수 있다. 고속변조, 또는 광대역 변조를 LiNbO₃ 기판을 사용하는 경우 이론적으로는 $\Delta f \cdot l = 6.5\text{GHz}\cdot\text{cm}$ 까지도 가능하다[9].

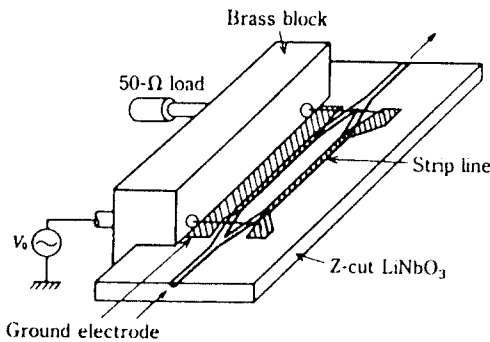


그림 7. 진행파 변조기

Δf 는 변조 대역폭, l 은 광결합 길이이므로 l 을 줄일수록 큰 Δf 를 얻을 수 있다. 그러나 l 을 줄이려면 두 도파로의 간격이 좁아야 하며, 이 경우 소멸비는 점점 나빠진다. 전극구조가 분포정수 회로이므로 RC시정수의 제약을 받지 않는다. 변조폭 Δf 에 영향을 미치는 요인이므로 1) 변조 RF신호(마이크로파)와

도파광과의 전파속도 차이, 2)마이크로파 임피던스 정합, 3)마이크로파 전극의 손실 등이 기인한다. 1)의 요인을 줄이기 위하여 LiNbO₃ 기판위에 마이크로파 굴절율이 낮은 기판을 놓는 방법, 1)과 2)의 요인을 해결하기위해 SiO₂ 완충층을 1 μm 이상 성장시키는 방법, 1)과 3)의 요인을 해결하기 위해 전극의 두께를 5 μm 이상 키우는 방법 등이 제안되고 있다.

3. TE-TM 모드 변환기, 파장 필터

3.1 TE-TM 모드 변환기

LiNbO₃의 y축을 따라 전계를 가하면 전기광학효과로 말미암아 불완전 타원체의 주축이 회전된다. 결과적으로 편광이 서로 직각을 이루는 TE모드와 TM모드 사이에 에너지 교환이 일어나며, 이를 이용하여 TE-TM 모드 변환기를 만든다[10].

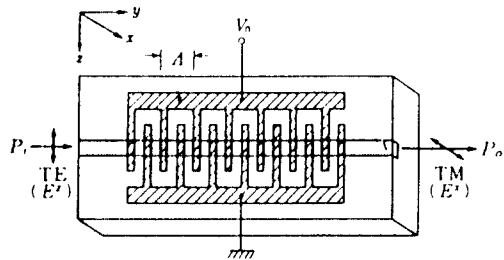


그림 8. TE-TM 모드 변환기

그림 8에서는 전극이 interdigital 형식으로 놓여 있으며 y축을 따라 교번적으로 전계가 걸린다. 전기광학효과에 의한 모드 변환 여건 외에도, TE-TM 모드 변환이 일어나기 위해서는 두 모드의 위상속도 정합이 필요하므로 전극의 주기를 조정할 필요가 있다. 주기는

$$\beta_{TE} - \beta_{TM} \approx \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o) = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (5)$$

으로 표현된다. $\lambda = 1.3\mu\text{m}$ 에서 LiNbO₃의 경우, $n_e = 2.15$, $n_o = 2.23$ 이므로 $\Lambda = 16\mu\text{m}$ 정도이다. 전극의 길이 $L(=N\Lambda, N$ 은 한쪽 전극의 손가락 갯수)은

$$L = \frac{\pi}{2k}, \quad k = \Gamma \left(\frac{\pi}{\lambda} \right) n^3 r_{51} E_y \quad (6)$$

이어야 가장 효율적인 모드 변환을 얻을 수 있다. k 는 결합계수, Γ 는 광과 전계의 중첩도이다. L 은 E_y 에 따

라 조정이 가능하다.

3.2 파장 필터

그림 8의 모드변환기가 (5), (6)식을 모두 만족시킬 경우, 이 소자는 그림 9에 보여지듯이 파장 선택성을 갖는다.

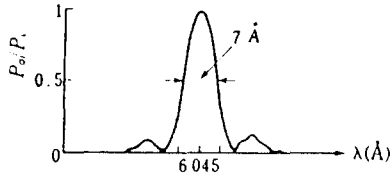


그림 9. 파장 선택도

파장 필터 $\Delta\lambda$ 는 다음식과 같이

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{\Lambda}{L} \approx \frac{1}{N} \tag{7}$$

근사화 된다. $\lambda = 1.3\mu\text{m}$, $\Lambda = 16\mu\text{m}$, $L = 30\text{mm}$ 이면 $N \approx 2000$ 이고 $\Delta\lambda = 7\text{\AA}$ 정도가 된다. (5)식을 보면 광IC의 재질과 입사각장이 결정되면 Λ 는 고정된다. (6)식에 의하면 인가전압을 낮추면 L 이 늘어나야 하며, (7)식에 의해 $\Delta\lambda$ 는 그 폭이 줄어든다. 이러한 특도로 좁은 대역폭을 가진 파장 필터는, 광통신에서 전압 조정 가능한 파장 복조기로 써도 이용가능하게 된다.

4. 음향광학 변조기

어떠한 매질에 유파가 지나갈때 음압으로 말미암아, 광매질의 굴절율의 변화가 일어나며 이를 음향광학 효과라 부른다. 그림 10에 음향광학 효과와 Bragg 격자 원리를 이용한 음향광학 변조기/반사기

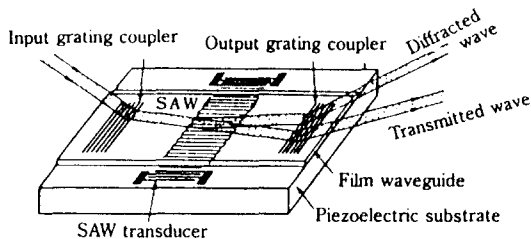


그림 10. 음향광학 변조기/반사기

표면음파(SAW : Surface Acoustic Wave)는, LiNbO_3 와 같은 Piezoelectric, 그리고 Acoustooptic 효과를 갖는 기판위에 제작된 interdigital 전극에 RF 전기신호를 인가함으로써 발생한다. RF 전기신호는 Piezoelectric 효과에 의하여 SAW로 바뀌어 앞으로 나아간다. 매질표면에서 진행 SAW의 강도는 Acoustooptic 효과로 말미암아 광매질의 굴절율을 변화시키며, 동방향 매질을 비동방향으로 바꾸어 놓을 수 있다.

음향광학효과는 전기광학효과를 이용한 광소자와 같이 빠른 응답속도를 갖지는 못하나, 고유의 커다란 상침을 가지고 있다. 즉 시간축상의 전기신호가 공간축상의 SAW로 재현되며, 임의의 전기신호에 대하여 SAW 파장이 광대역에 걸쳐 자유자재로 변환 가능하다.

따라서 Bragg 각사주기를 임의로 변환시켜 반사각을 임의 조정하거나, 광파장 필터의 파장을 임의로 바꾸는 것이 가능하다. 뿐만아니라 광신호 처리나 광통신을 위한 광변조기도 가능하다.

V. 유용한 광IC의 예

여지껏 각종 수동소자들과 능동소자들이 소개된 바 있지만 이들은 1개의 칩 위에 집적화 시키는 것은 쉽지 않다. 집적화 인공이 지난 20 여년간 계속되어 왔지만 아직도 광원과 감파기를 포함한 광IC는 별만 없다. 여기서 몇 개의 기능소자를 하나로 묶은 광IC의 몇 예를 소개하기로 한다.

1. LiNbO_3 광교환 스위치

DC형 광스위치로 비교적 낮은 인가전압으로 높은 소멸비를 얻을 수 있다. 그림 11에는 교번 $\Delta\beta$ DC 광스위치를 이용한 4×4 광교환 스위치가 있다.

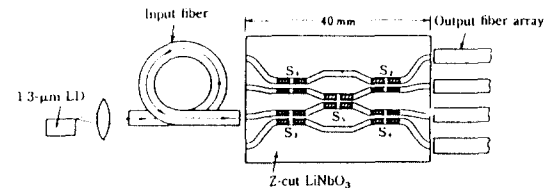


그림 11. 4×4 광교환 스위치

임의의 단자로 들어온 광은 전극을 통한 전기신호의 세어에 따라 원하는 단자로 나갈수 있다. $\lambda = 1.3\mu\text{m}$

에 대하여 각 광스위치의 스위칭 전압은 12V와 28V, 소멸비는 18dB, 광IC의 삽입손실은 6.25dB가 발표된 바 있다. 그러나 아직도 입출력 광섬유와 LiNbO₃와의 Pigtail(연결 고정) 문제는 불안정한 상태이다.

2. RF 스펙트럼 분석기

집적광학 스펙트럼 분석기(IOSA : Integrated Optic Spectrum Analyzer)의 가장 핵심부분은 어떻게 강한 분해능을 갖는 렌즈를 만드는가에 있다. 그림 12에 Fresnel 렌즈를 이용한 IOSA가 있다[12].

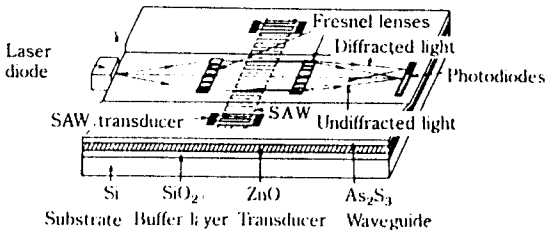


그림 12. Fresnel 렌즈를 이용한 스펙트럼 분석기

여러가지 렌즈형태가 제안된 바 있지만 여기서는 언덕형 굴절율 분포를 갖는 Fresnel 렌즈를 이용한 IOSA를 소개한다. SAW 변환기를 통하여 분석하고자 하는 전기신호가 인가된다. 전기신호는 Fourier 성분으로 나뉘고, 각 성분은 해당되는 회절각을 형성하여 고유한 회절각으로 입사광을 회절시킨다. 각 전기신호 Fourier 각 성분의 세기는 해당되는 회절각의 위치에 놓여진 PD에 검파된다. 위 그림에 소개된 IOSA 말고도 Ti : LiNbO₃를 이용한 더욱 효율적인 기능을 갖는 구조도 제안된 바 있으나 이 정도로 원리만 소개하기로 한다.

3. RF 합성기/상관기

RF신호의 합성(convolution)이나 상관(correlation) 기능을 위한 신호처리소자는 Fourier 처리기라고도 불린다. RF 합성기/상관기는 장거리 통신의 S/N비를 개선하기 위한, 실시간 처리기능을 갖는 중요한 소자이며 대부분이 Ti : LiNbO₃를 이용하여 연구개발되었다. 그림 13에는 공간적분을 통하여 합성/상관 기능을 갖는 소자가 소개되어 있다.

공간적분 합성기는 Bragg 격자를 갖는 SAW 변환기로 구성되어 있다. 전기신호 $s_1(t)$ 와 $s_2(t)$ 에 의해서

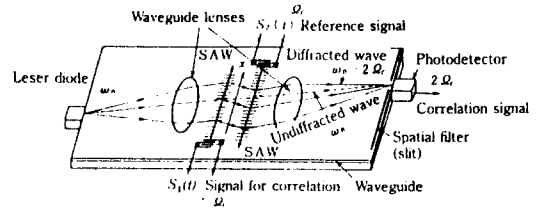


그림 13. 공간적분 합성기/상관기

변조된 반송주파수 R_c 를 갖는 RF 각 신호는 SAW 변환기에 입력된다. $s_1(t - x/v)$ 와 $s_2(t + x/v)$ 에 의해서 변조된 격자들에 의해서 회절된 파는 PD에 모여서 파의 세기는

$$s(t) = \int_{-D/2}^{D/2} s_1(t - \frac{x}{v}) s_2(t + \frac{x}{v}) dx$$

$$= \int_{t - T/2}^{t + T/2} s_1(\tau) s_2(2t - \tau) d\tau \quad (8)$$

에 비례하게 된다. D 는 광과 SAW가 관계하는 x 축상의 거리, v 는 SAW의 진행속도이고, T 는 SAW가 D 를 진행하는 시간이다.

VI. 맺음말

집적광학을 소개하면서 GaAs나 InP와 같은 화합물 반도체 기관위의 monolithic 광IC를 별로 다루지 못했다. 주로 Ti : LiNbO₃에 의한 광소자를 다루기는 했지만 소자의 동작원리라는 측면에서 보면 기관의 종류는 크게 문제되지 않는다. 화합물 반도체는 LD, PD 등 능동소자의 제조가 가능하므로, 광IC의 궁극적 재료로 많은 기대를 모았다. 그러나 광소자와 전자소자를 한개의 칩위에 올려 놓으려면 다양한 재료조성비, 서로 다른 적층구조 등의 문제가 고분해능 석판기술의 커다란 문제거리로 등장한다. 따라서 monolithic 광IC보다는 오히려 hybrid 광IC가 성능, 수율, 비용 등에서 선호되고 있다.

“광IC”에 전자소자를 혼합시키면 “광전IC”라는 폭넓은 개념이 된다. 선진국들에서 광전IC에 대하여 많은 연구가 진행중이며, 그 중의 특기할만한 연구대상 중의 하나가 FET 광소자로서, 입력 광신호를 전기신호로 변환시키고 이 전기신호를 같은 칩상의 LD전극에 걸어 변조기능을 갖는 것이다. 한 칩위에 이러한 기능을 갖는 소자를 여러개 놓으면 미래의 광정보처

리나 광컴퓨터에 유용하게 될 것이다.

집적광학이 현재, 그리고 미래에 있어서 해결해 나가야 할 방향은 1) 광통신 소자, 2) 광신호리, 3) 광센서 응용 등으로 크게 분류된다. 염두에 두어야 할 것은 광IC의 기능은 전기신호에 의한 광제어이며, 이는 光에 고유한 각도로 높은 주파수를 갖는 coherent한 위상을 갖는 波의 성질을 이용한다는 것이다.

집적광학이 가야 할 길은 험하고 멀다. 많은 것이 이룩되어 졌는가 싶으면서도, 아직도 기초적인 문제들을 벗어나지 못하기도 하다. 아직은 완벽한 광IC는 실용화되지 못하고, hybrid 형태의 광IC만이 상용화 되고 있다. 광IC 기술이 $N \times N$ 광교환 스위치, 광컴퓨팅을 위한 신호처리 등에 실용화되기 위해서는 앞으로 10년 이상이 필요할 수도 있다. 아직도 가야 할 먼길을 바라보고 있는 집적광학은 그래서 오히려 미래의 기술일 수도 있는 것이다.

참 고 문 헌

1. J. M. Corroll, The Story of the Laser, E. P. Dutton & Co., Inc., New York, 1970.
2. T. Tamir, Guided-Wave Optoelectronics, 2nd Ed., Springer-Verlag, 1990.
3. H. Nishihara et al, Optical Integrated Circuit, McGraw-Hill, 1985.
4. Y. Handa et al, "Microgratings for high-efficiency guided-beam deflection fabricated by E-beam direct-writing techniques," Appl.Opt., Vol.19, No.16, p. 2842, Aug, 1980.
5. L. M. Johnson et al, "Low-loss LiNbO₃ waveguide bends with coherent coupling," Opt.Lett., Vol.8, No. 2, p.111, Feb. 1983.
6. M. Haruna et al, "Electrooptic branching waveguide switches and the application to 1×4 optical switching network," IEEE J.L.T, Vol.1, No.1, p.233, Mar. 1983.
7. Y. Suematsu et al, "Fundamental TE mode selection for thin-film asymmetric light guides," Appl.Phys. Lett., Vol.21, No.6, p.291, Sep. 1972.
8. R. V. Schmidt et al, "Narrow-band grating filters for thin-film optical waveguide," Appl.Phys.Lett., Vol.25, No.11, p.651, Dec. 1974.
9. K. Kubota et al, "Traveling-wave optical modulator using a directional coupler LiNbO₃ waveguide," IEEE J.QE, Vol.16, No.7, p.754, July 1980.
10. R. C. Alfiness et al, "Electro-optic waveguide TE ↔ TM mode converter with low drive voltage," Opt. Lett., Vol.15, No.11, p.473, Nov. 1980.
11. R. V. Schmidt et al, "Acoustooptic Bragg deflection in LiNbO₃ Ti diffused waveguides," IEEE J.QE, Vol.11, No.1, p.57, Jan. 1975.
12. T. Sahara et al, "An integrated optic Fourier processor using an acoustooptic deflector and Fresnel lenses in an As₂S₃ waveguide," IEEE J.L.T, Vol.1, No.4, p.624, Dec. 1983.



김 창 민

- 1950년 4월 10일 생
- 1975년 2월 : 서울대학교 전자공학과 공학사
- 1982년 2월 : 서울대학교 전자공학과 공학석사
- 1989년 8월 : Univ. of Florida 전자공학과 공학박사
- 1983년 ~ 현재 : 서울시립대학교 전자공학과 부교수
- 주전공분야 : 집적광학
- 연구관심분야 : 전자파, 광파 및 양자전자