

공간 분할 매트릭스 반도체 광스위칭 소자



오광룡
한국전자통신연구원
광전자연구실 재직중



김홍만
한국전자통신연구원
광전자연구실 책임연구원, 실장

1. 서론

70년대에 본격적으로 개발되기 시작한 광통신 기술은 광섬유의 저손실, 광대역 특성에 의해 국간 중계망에서의 전송 거리, 용량 및 전송 품질을 향상시켜 전송 단가를 획기적으로 떨어뜨렸다. 전송 기술이 광 기술의 도입에 의해 비

약적인 발전의 계기를 만들었다면 통신의 양대 골격인 교환 기술은 그 동안 반도체 기술의 발전에 힘입어 크로스바 교환기에서 전자교환기로 전환되면서 교환 용량을 크게 확대시켰으며, 컴퓨터 기술 및 소프트웨어 기술의 발달로 다양한 통신 서비스를 교환기 자체에서 제공할 수 있게 되는 등 지속적인 발전을 이룩해 왔다. 그러나 최근에 이르러 두 지점간의 단순한 음성 신호 전달 뿐만 아니라 고속 데이터 및 영상 정보를 포함한 멀티미디어 통신을 가능케 하는 광대역통신(B-ISDN) 서비스의 필요성이 대두되고 있다. 이러한 B-ISDN은 기존의 64kbps에 불과한 음성 신호에서 수백 Mbps 전송 속도를 갖는 광대역 신호를 각 가입자에게 제공하여야 하므로 전송 및 교환 분야의 새로운 기술을 요구하고 있다. 즉, 이러한 광대역 통신망에서 교환 노드는 수 Tbps 이상의 교환 처리 용량을 필요로 하게 될 것으로 예상되어 광의 초고속성, 수십 THz 이상의 광대역성, 무간섭성 등을 이용하는 새로운 광교환 기술의 확보가 요구되는 것이다.

2. 광교환의 특징

광교환이란 광섬유를 통하여 교환기 입력단에 전달된 광신호를 원하는 출력단에 전자 신호로의 변환 과정이 없이 직접 스위칭하는 것이다. 이러한 광교환의 주요

특징으로는, i) 입력 광신호의 속도에 무관하게, 즉, 수 kbps에서 수십 GHz 까지의 광신호를 스위칭할 수 있으며, ii) 공간, 시간 및 파장 다중화를 혼합 사용함으로써 대규모 교환용량을 갖게 할 수 있고, iii) 광신호의 광전/전광 변환없이 직접 교환하는 시스템의 간편화의 성능을 최대화 할 수 있다는 것이다.

광교환은 광신호를 교환하는 방식에 따라 공간 분할(SD: Space Division), 시간 분할(TD: Time Division), 파장 분할(WD: Wavelength Division)로 구분되며 이와 더불어 이들의 혼합형이 있을 수 있다. 이러한 방식의 광교환 시스템의 실현을 위하여서는 각 방식에 따라서 다양한 기능의 소자들이 요구되고 있다. 공간 분할 방식에 있어서는 매트릭스 공간 광스위치가 주요 핵심 소자이고, 시간 분할 방식에는 매트릭스 공간 광스위치, 광메모리, 시간 다중화기 및 역다중화기 등을 필요로 하고 있다. 파장 분할 방식에는 다채널 광원, 가변 파장 필터, 파장 변환기 및 파장 다중/역다중화기 소자 등을 필요로 하고 있다. 이와 더불어 광증폭기, 레이저 다이오드 및 광검출기 등은 모든 방식에 필요로 하는 소자이다. 레이저 다이오드 및 광검출기는 이미 상용화가 되어 광전송 시스템에 활용되고 있으나, 이외의 대부분의 소자들은 아직도 연구 개발 단계에 머무르고 있다. 이들 중에서

제한되는 더욱 낮은 속도이다.

4. 광스위치의 종류에 따른 동작 원리

일반적인 광스위칭 소자에 대한 첫 번째 주요 사항은 광섬유간의 총삽입 손실이 작아야 한다. 광신호의 세기가 감쇄됨에 따라 시스템 특성 약화되기 때문이다. 두 번째는 입력 광신호의 편광 상태에 무관하게 스위칭 특성을 보여야 한다. 이는 광섬유를 통하여 들어오는 신호의 편광 상태가 임의적으로 변할 수 있기 때문이다. 세 번째는 다른 채널의 신호에 영향을 주는 광누화가 작아야 한다. 네 번째는 입력 광신호의 허용 파장 대역이 넓어야 하고 다중 파장 동작이 가능하여야 한다. 이는 공간 스위치가 파장 다중화 시스템에도 폭 넓게 활용되기 때문이다. 다섯 번째는 입력 광신호의 데이터 속도에 관계없이 스위칭이 투명하게 동작하여야 한다. 이외에 스위칭 규모의 확장성 및 시스템 적용시간 관련한 구동 조건 등의 요구사항이 있다.

위에서 언급된 굴절률의 변조 원리를 이용하는 여러 구조의 광스위칭 소자들이 있다. 현재까지 제안된 광스위칭 소자로는 방향성 결합기형¹⁾, 전반사형²⁾, 게이트형³⁾, 디지털 광스위치⁴⁾, 마호젠더 간섭계형⁵⁾ 등이 있다.

1) 방향성 결합기형 광스위치

(그림 1)에서 보는 바와 같이 방향성 결합기형의 광스위치는 광도파로를 지나는 빛의 evanescent field 가 겹쳐질 정도로 근접한 두 개의 광도파로로 이루어져 있으며 한 쪽의 도파로의 굴절률을 전기광학 효과, 반송자 주입 및 분리 등의 방법으로 변화시켜 광도파로 사이의 광결합 길이를 변화시킴으

Quantum Well)에서 전기장을 인가하면 QW속에서 전자와 정공이 반대쪽으로 쏠리게 되어 에너지 밴드에 변화를 줌에 따라 흡수 스펙트럼의 변화를 주어 굴절률이 변하는 현상이다. 그러나 QCSE의 가장 큰 단점인 파장의존성은 대규모의 스위칭 매트릭스를 구현하는데 단점이 되고 있으나 스트레인과 넓은 우물을 채용하여 없앨 수 있는 방법이 제시되고 있다.

Plasma효과는 주입된 반송자가 기저대 및 전도대 에너지 밴드 안에서 광자를 흡수하여 더 높은 에너지 상태로 움직이려 하는 현상에 의해 나타나는 굴절률 감소 현상이다. 이때의 굴절률은 반송자의 농도에 선형적으로 비례하여 감소한다.

Band-Filling 효과는 반송자 주입에 의하여 기저대 및 전도대가 낮은 에너지 상태부터 채워짐에 따라 흡수 스펙트럼이 변하게 되고 이에 따라 굴절률이 변하는 현상을 말한다. 에너지갭 근처의 파장에 대하여 굴절률이 증가하는 결과를 보인다.

Band-Shrinkage 효과는 반송자가 증가함에 따라 에너지 밴드의 가장 자리에 있는 반송자의 농도가 증가하고 이들이 밀집됨에 따라 Coulomb의 힘에 의해 서로 밀어내는 Screening 현상이 발생한다. 이로 말미암아 에너지 밴드의 바닥 상태를 더욱 낮추는 결과를 가져온다. 따라서 흡수 스펙트럼이 변하고 Kramers-Kronig 관계에 의해 굴절률이 증가하게 된다.

이들 위에 세 가지의 반송자 주입에 의한 굴절률 변화는 매우 강력하다. 즉, 전기광학 효과에 비하여 100배 이상으로 굴절률이 변하여 0.1 정도까지의 굴절률 변화를 얻을 수 있다. 전기장형의 소자에 비한 반송자 주입형 소자의 단점은 반송자 재결합 시간에 의하여

매트릭스 공간 광스위치는 모든 방식에 핵심 소자로 사용되어 활용도가 높고, 현재 가장 연구 개발이 활성화되어 있는 소자중의 하나이다.

3. 굴절률 변조를 일으키는 물리적 현상

반도체 광소자는 광에 대한 도파로의 굴절률, 흡수율 및 이득을 제어하여 동작하는 소자라 일컫을 수 있다. 따라서 이에 대한 물리적 현상을 살펴보는 것은 매우 중요하다.

반도체는 굴절률 또는 흡수율/이득을 변조 시키는 여러 가지의 물리적인 효과들을 갖고 있다. 전기장의 인가에 따라 나타나는 Pockels 효과, Franz-Keldish 효과, QCSE(Quantum Confined Stark Effect) 효과가 있고 반송자의 주입/분리에 의해 나타나는 Plasma 효과, Band-filling 효과 및 Band-Shrinkage 효과 등이 있다.

Pockels 전기 광학 효과는 유전체 또는 반도체에 전기장을 인가하면 전기장의 세기에 따라 굴절률이 선형적으로 감소하는 현상이다. 반도체의 경우에 전기 광학 상수가 LiNbO_3 와 같은 유전체 보다는 작지만 LiNbO_3 는 굴절률이 1.5정도인데 반하여 반도체는 이의 2배 이상인 3.2 정도이기 때문에 소자적인 입장에서는 LiNbO_3 와 같은 수준으로 볼 수 있다.

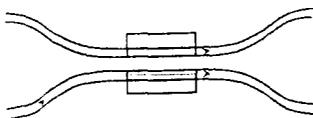
Franz-Keldysh 효과는 bulk 물질에서 전기장을 인가하게 되면 기저대와 전도대 사이에서 전자의 통과(tunneling) 현상이 발생하여 에너지 밴드갭보다 작은 에너지에서 흡수가 일어나기 때문에 이로 인한 흡수 스펙트럼의 변화로 굴절률이 변하는 전기 광학 효과이다.

QCSE 효과는 양자 우물(QW:

로써 빛의 출력 포트를 선택할 수 있게 하는 것이다. 도파로 사이의 광결합 길이는 빛의 모드에 따른 진행과 상수에 따라 달라지므로 광도파로는 단일 모드로 설계되어야 하며 빛의 교환이 일어나는 도파로 전체의 길이는 결합 길이의 홀수배 이상으로 길어야 한다.

현재까지 가장 많이 연구되어진 광스위치가 LiNbO_3 기판을 이용한 방향성 결합기 스위치이며 일부 상용화되어 시판되고 있다. 성능과 집적도에서 우수한 특성을 보이고 있으나 소자의 길이가 너무 길고 온도에 민감하며 편광성이 강하고 동작 전압이 10V 이상으로 높다는 문제를 갖고 있다. 이에 반하여 반도체 광결합기형 광스위치는 레이저다이오드, 광검출기 등과의 집적화의 가능성으로 인하여 관심도가 높다. 또한 위에서 언급된 전기장의 인가와 반송자의 주입에 의한 굴절률 변화를 이용할 수 있어 구조적인 면에서 다양하게 접근되고 있다.

방향성 결합기 스위치는 TE모드와 TM 모드에 대한 결합 길이가 다르고, 굴절률 변화를 위하여 사용되어지는 전광 효과가 편광 의존성을 갖을 수 있는 두 가지 이유로 편광 의존성을 갖게 된다. 모드 결합과 굴절률 변화가 같은 장소에서 이루어지기 때문에 이러한 제한을 극복하는 것이 불가능하지는 않지만 어렵다.

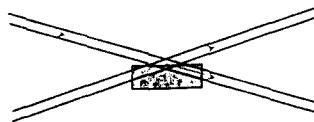


(그림 1) 방향성 결합기형 광스위치

2) 내부 전반사형 광스위치

내부 전반사형 광스위치는 (그림 2)에서 보는 바와 같이 두 개의 광도파로가 "X"형으로 교차되어 있는 형태이며, 전광효과, 반송자 주입 및 분리 등으로 교차점의 굴절률을 바꾸어 주면 Snell 법칙에 의해 임계각 이하의 각도에서 입사된 진행파는 전반사가 되도록 하는 것이다. 이러한 내부 전반사형 광스위치의 경우에는 단일 모드이어야만 하는 조건에 민감하지 않고 스위칭 영역의 길이가 짧으므로 광스위치 칩의 길이가 상대적으로 짧게 할 수 있다는 장점을 갖고 있어 매트릭스 규모를 확장시키는데 유리한 구조라 할 수 있다. 그러나 교차각에 따라 변하지만 수 %의 큰 굴절률 변화를 요구하는 제한이 있게 된다.

InP 및 GaAs에서 bulk의 경우에는 전광효과에 의한 굴절률 변화량이 전반사를 이르기에는 너무 작기 때문에 전반사형이 불가능하고 다중양자우물구조의 경우에는 QCSE에 의하여 굴절률 변화량이 커서 가능하다. 이 경우의 에피 구조가 PIN 구조이고 역전압을 인가하여 동작시키므로 GHz 이상의 동작 속도를 얻을 수 있다는 장점을 갖고 있으나 동작 전압의 불안정성과 QCSE를 이용하는



(그림 2) 내부전반사형 광스위치

이유로 인하여 사용 가능한 파장 영역이 10nm 이내로 좁다는 문제를 내포하고 있다. 전류 주입에 의한 전반사형은 비교적 제작이 수월하고 제작된 광스위치는 안정된 특성을 보이며 전광효과를 이용한 경우와 달리 사용 가능한 파장 영역이 넓어서 시스템 적용 실

현에 유리하다. 그러나 비교적 속도가 느린 단점이 있게 된다.

3) LD-gate 형 광스위치

LD-gate형 광스위치는 위에서 언급된 굴절률 변화를 이용하여 동작 시키는 것이 아니고 Y분지기 도파로와 반도체 광증폭기의 흡수 및 증폭을 이용한 집적된 구조이다. (그림 3)에서 보는 바와 같이 광도파로를 따라서 진행하는 광신호를 Y분지기 도파로에서 두 개로 나눈 후에 반도체 증폭기를 통과시켜 전류 주입 여부에 따라 광신호가 증폭 또는 흡수되도록 하는 on/off 게이트 형태의 광스위치이다. 이 광스위치는 구조가 다른 형태의 광스위치에 비해 비교적 복잡한 반면 광도파로에서 발생하는 모든 손실을 광증폭기에서 보상할 수 있어 손실없는 광스위치 구현이 가능하고 크기가 작아 집적화에 유리하고 속도 특성은 광증폭기의 특성에 의해 결정되며 1ns 이하의 고속 동작이 가능하다. 그러나, LD-gate형 광스위치 제작을 위하여서는 정확한 도파로 설계, 건식 식각, 재성장, 무반사 박막 증착 등의 고도화된 기술을 필요로 하는 어려움이 있다.



(그림 3) LC-gate형 광스위치

4) 디지털 광스위치

디지털 광스위치(DOS; Digital Optical Switch)는 (그림 4)에서 보는 바와 같은 구조로서 집합 각도가 작은 Y 분지기에서 도파 모드의 adiabatic 진화를 이용하는 것이다. 도파되는 빛이 Y 분지기를 지나면서 굴절률을 높게 제어하는 쪽의 도파로로 스위칭되는

것이다. Y 분지기 형태를 갖고 있어 바이어스가 인가되지 않을 경우에는 3dB 분지기 역할을 하여 분배 기능을 내포하고 있다. 굴절을 변화를 어느정도 이상 증가 시키면 그 방향으로만 신호가 스위칭되는 디지털 반응은 인가 조절을 용이하게 한다. 또한 편광에 독립적인 특성을 보이고 50nm 이상의 넓은 파장 대역폭의 특성을 보인다. 제어에 필요한 굴절을 변화가 방향성 결합기형이나 간섭계형에 비하여 크지만 절대량에 있어서는 Y 접합의 각도가 수 밀라디안 이하로 작다면 아직도 작은 수준인 0.003 이하이다. 따라서 DOS형의 스위칭 동작은 PIN 이종합에서 역방향 또는 순방향 인가 동작에서 반송자의 제어에 의해 얻어질 수 있으나 bulk 물질에서 순수한 전광 효과만으로는 얻을 수가 없다.

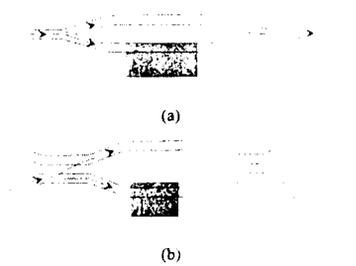


(그림 4) 디지털 광스위치

5) 마흐젠더 간섭계형 광스위치

MZI(Mach-Zehnder Interference)형 광스위치의 기본 동작 원리는 다음과 같다. (그림 5-a)는 MZI형 광변조기의 개념으로서 입력된 광신호는 빔 분리기에 의하여 두 개의 빔으로 나뉘어지고 각각이 다른 경로를 따라 진행되다가 두 번째 분리기에서 합쳐지게 된다. 이 때 한 쪽의 경로에서 신호의 위상에 변조시키면 이에 따라 간섭을 일으키게되어 입력 신호에 대한 변조가 일어나는 것이다. 마흐젠더 간섭계형은 방향성 결합기형에 비하여 다른 점중의 하나가 모드 결합과 위상 천이 지역을 분리시켜서 독립적인 최적화가 가능하게 한 것이다. MZI형

광스위치는 (그림 5-b)에서 보는 바와 같이 입출력단 전후에 MZI 변조기의 빔 분리기인 Y 분지기 대신에 2x2 결합기를 이용한다. 한 쪽의 입력단으로 입사된 광신호는 2x2 결합기를 통하여 두 개로 분리되고 분리된 한 쪽의 신호에 대하여 위상 변조 여부에 따라 출력단에 있는 2x2 결합기를 통하여 출력단의 위치가 결정된다.



(그림 5) MZI형 (a)변조기 및 (b)광스위치

5. 결 론

다양한 통신 서비스의 요구와 교환용량의 증대로 인하여 광교환의 필요성은 점차적으로 커지고 있다. 이러한 교환 시스템의 구현을 위하여서는 시스템의 연구에 앞서서 광교환용 핵심 소자의 연구개발이 우선되어야 한다. 이에 따라 세계 주요 연구 기관에서는 시스템 개발과 함께 핵심 광부품에 대한 연구에 박차를 가하고 있다. 그러나 이러한 불구하고도 아직까지는 만족스러울만한 결과가 많지 않은 형편이다. 가장 활발히 연구 개발되어온 매트릭스 광스위치를 보면 앞에서 언급한 대로 여러 물리적 현상을 이용하여 다양한 구조의 소자를 구현하여 연구 결과들이 발표되고 있다. 특히, 최근에 이르러 에피택시 기술, 건식식각 기술 및 리소그래피 기술의 발전으로 인하여 급속한 발전을 이루고 있어 상용화가 이루어지는 날이 멀지 않을 것으로

기대된다.

참 고 문 헌

- 1) H. Takeuchi, Y. Hasumi, S. Kondo, and Y. Noguchi, "4x4 Directional Coupler Switch Matrix with an InGaAlAs/InAlAs Multiquantum Well Structure", IEE Electron. Lett, Vol.29, pp.523-524, 1993.
- 2) K. R. Oh, K. S. Park, D. K. Oh, H. M. Kim, H. M. Park, and K. Lee, "A Very Low Operation Current InGaAsP/InP Total Internal Reflection Optical Switch using p/n/p/n Current Blocking Layers", IEEE Photon. Technol. Lett. Vol.6, pp.65-67, 1994.
- 3) K. R. Oh, J. H. Ahn, J. S. Kim, S. W. Lee, H. M. Kim, K. E. Pyun, and H. M. Park, "2x2 InGaAsP/InP Laser Amplifier Gate Switch Arrays using Reactive Ion Etching". IEE Electronics Letters, Vol.32, pp.39-40,1996.
- 4) W. H. Nelson, A. N. M. Masum Choudhury, M. Abdalla, R. Bryant, E. Meland, and W. Niland, "Wavelength- and Polarization-Independent Large Angle InP/InGaAsP Digital Optical Switches with Extinction Ratios Exceeding 20 dB", IEEE Photon. Technol. Lett. Vol.6, pp.1332-1334, 1994.
- 5) N. Yoshimoto, Y. Shibata, S. Oku, S. Kondo, Y. Noguchi, K. Wakita, and M. Magauma, "Fully polarization independent Mach-Zehnder optical switching using a lattice matched InGaAlAs / InAlAs MQW and high mesa waveguide structure", IEE Electron. Lett, Vol.32, pp. 1368-1369, 1996.

<정 영철 위원 >