

광스위칭 소자의 기술동향

尹台焄, 鄭泰赫
釜山大學校 電子工學科

I. 서론

스위칭은 통신망에서 필수적인 동작이고 또한, 디지털 컴퓨터와 신호처리 시스템에서 기본적인 동작이다. 최근 대용량의 데이터 처리가 가능한 광섬유 통신의 급속한 발전은 광신호처리를 위한 대용량 중계기와 터미널 시스템의 필요성을 가져왔고, 결과적으로 고속 광스위칭의 필요성을 가져왔다.

스위치는 통신 또는 신호처리 시스템의 전달경로들 사이의 접속을 하거나 분리하는 소자로서 다음의 파라미터들에 의해 특징지어진다. 입력과 출력선들의 수를 나타내는 크기와 데이터가 한 방향 또는 두 방향으로의 전달 여부를 나타내는 방향성, 스위칭 시간, 전달 지연 시간, 데이터 처리율, 스위칭 에너지, 전력손실, 주입손실, 크로스토크, 스위치의 외형적인 크기 등이다.¹

비선형 광효과를 이용한 광소자는 광스위치를 위한 주요 소자로서 많은 주목을 받고 있다. 제 2고조파 발생과 같은 파장 변환 효과는 그들의 실제적인 유용성 때문에 광스위치로서 초기부터 연구되어 왔다. 또 다른 비선형 광효과로 인가전장 또는 입사 빔세기 의존하는 굴절률 변화 또는 흡수율 변화는 최근에 상당한 연구가 이루어지고 있다. 이런 효과들은 전기적 제어 광스위치 또는 완전 광스위치와 같은 빔 제어 소자에 응용된다.²

컴퓨터 상호접속과 프로세서들은 전자공학에 기초를 둔 접속과 소자밀도의 한계에 의해 제한되어 병목 현상에 직면하고 있다. 그러나 이런 문제의 해결을 위해 연구되고 광학의 궁극적인 완전 광시스템은 아직 충분히 만족시켜주지 못하고 있는 것이 사실이다.

완전 광시스템을 제한하고 있는 근본적인 원인은 광비선형성이 약하다는 것이다. 이런 문제의 해결방안으로 최근에 smart pixel 기법으로 알려진 새로운 하이브리드 광전자공학기법이 전세계적으로 상당한 연구가 진행되고 있다.³

본 해설에서는 먼저 광소자가 시스템에서 구성될 때 고려되어야 할 점에 대해 알아 보고 동작방법에 따른 광스위치의 종류와 그 특징 등을 알아본다. 그리고, 빛에 의해 제어되는 완전 광스위치(all-optical switches)와 최근 2차원과 3차원 스위치 어레이로써 많은 연구가 되고 있는 smart pixel에 대해 알아본다.

II. 시스템구성시 광소자의 고려사항

광소자들은 시스템과 관련하여 고려되어야 하는데, 많은 뛰어난 소자들이 안타깝게도 대형의 논리시스템에서 사용되지 못하고 있다. 이것은 cascade와 같은 기본적 요구를 만족시키지 못하거나 활용하기에 매우 불편하기 때문이다. 그리고 어떤 소자는 보다 더 나은 전체적인 시스템 구성을 위해 광의 통신능력을 사용하므로 시스템에서 매우 유용하지만 실제적인 수확능력은 전자소자에 비해 떨어진다.

디지털논리는 기본 논리함수의 수행능력이외에도 두 가지 특징이 절대적으로 요구된다. 첫째, 캐스케이드성 즉, 한 게이트는 다음 게이트를 동작시킬 수 있도록 입력과 출력 포맷(전자시스템에서 전압과 광시스템에서 파장)의 양립성이 요구된다. 둘째, 팬아웃 즉, 임의의 논리시스템이 구성될 수 있어야 하고

시스템에서 손실을 극복할 수 있는 이득을 제공해야 한다. 소자들은 적어도 2개 또는 그 이상의 팬아웃을 가져야 한다. 시스템에서 어떤 곳에서는 논리반전 수행능력도 가져야 한다.

또한 시스템 디자인을 쉽게 할 수 있기 위해 요구되는 것은 임계 바이어싱의 부재, 임출력의 분리, 논리레벨 재저장, 함수의 유연성 등이다. 함수의 유연성은 보다 미묘한 개념이다. 어떤 크고 복잡한 시스템을 디자인할 경우 즉, 시스템이 복잡한 함수를 수행해야 할 경우 그것은 복잡한 함수를 디자인하기 위해 많은 선택들을 포함해야 한다. 복잡성은 하드웨어의 물리적 접속과 레이아웃, 그리고 소자들 자체 등의 많은 레벨에서 존재한다. 그것은 결과적으로 소자 레벨에서 선택되어야 한다. 그렇지 않으면 시스템의 나머지 부분에 모든 복잡성을 강요해야 하며, 이것은 디자인을 보다 어렵게 만들것이다. 예를 들어 전자공학에서 비록 우리는 단지 NOR 게이트를 이용하여 임의의 논리시스템을 구성할 수 있지만, 실제적으로는 다른 함수들(즉, flip-flop, AND 게이트 등)과 같은 소자들이 전체 시스템을 보다 간단하게 만들므로 그렇게 하지 않는다.

현재 함수 유연성이 좋은 광소자는 매우 적다. 다른 바이어스 조건하에서 다른 함수를 수행할 수 있는 소자들은 복잡성을 간단하게 바이어싱 시스템 디자인으로 변환하므로 이런 문제를 해결할 필요가 없다. 실제적으로 적당한 시스템을 만들기 위해 요구되는 것은 첫째, 충분히 낮은 광 동작 에너지, 둘째, 열방출이 허용되는 충분히 낮은 총 동작 에너지, 셋째, 관련이 있는 광 시스템과의 양립성(즉, 평면 광도파로 소자는 단지 1차원 어레이에 쉽게 적용될 뿐 2차원 광 프로세싱 광학에는 적합하지 못하다.), 넷째, 다른 방법들보다 요구되는 일을 더 잘 수행하는 전체 시스템이 되도록 충분히 빠름 등이다. 이런 모든 성질들을 고려함에 있어서 시스템에서 소자의 에너지를 고려하는 것은 매우 중요하다. 즉, 소자를 스위칭하는데 요구되는 에너지뿐만 아니라 그 결과를 다음 소자로 전달하는데 요구되는 에너지를 고려해야 한다.

이제까지 기술한 다양한 특징들은 시스템에 따라 중요도가 다르게 나타난다. 시스템에서 크고 복잡하고 2차원적인 병렬프로세서와 작고 간단하고 빠른 직렬프로세서에서와 같은 두 극단적인 종류가 이런 차이를 설명한다. 크고 복잡한 프로세서에서는 모든 면들이 2차원 동작의 가능성만큼이나 디자인의 편리함

에 관계와 낮은 스위칭 에너지는 매우 중요하다. 아주 빠른 속도는 큰 시스템의 속도가 그것의 한 쪽에서 다른 쪽으로 전달하는데 소요되는 시간에 의해 제한되므로 그다지 중요하지 않다. 또한, 속도의 제한은 좀더 소자를 동작시킬 수 있도록 충분히 파워를 제공하고 낮춘다. 그 예로, 1 W 레이저로 칩당 1 Tbs/s의 총 처리량을 가지는 시스템을 동작시키기 위해 비트당 1 pJ 시스템에너지 보다 작은 것이 요구된다(소자 스위칭 에너지는 시스템손실과 마진때문에 이것보다 10-100정도 낮은 값을 가질 것이다). 상대적으로 간단한 광소자가 1000-10000개의 소자를 어드레스할 수 있다면 그것은 1-10 ns의 동작속도를 필요로 한다.

마지막으로, 시스템은 충분히 비용이 싸면서 요구되는 일을 수행할 수 있어야 한다. 어떤 기술에서는 복잡한 소자가 단순한 소자보다 비용이 적을 수 있다(실리콘 칩이 레이저 다이오드에 비교할 때). 비용을 고려함에 있어서 소자를 시스템과 분리해서 생각해서는 안된다. 즉, 소자접속의 비용을 고려해야 하며 이것은 광학의 주요 장점중 하나다. 비용결정에 있어서 매우 중요한 점은 기존의 기술의 재사용 문제이다. 반도체의 경우 그 기술은 이미 많은 발전을 했기 때문에 반도체를 광학물질로 사용하려는 노력은 결코 우연이 아니다. ¹

Ⅲ. 광스위치의 종류 및 특징

반도체 전자 스위치의 최소 스위칭 시간은 10-20 ps, 스위칭 에너지는 10-20 fJ, 그리고 스위칭 전력은 1μW 정도이다. 이들에 대한 도식을 그림 1에 나타내고 있다. Josephson 소자의 경우, 보다 낮은 에너지(약 10^{17} J)와 1.5 ps의 스위칭 시간 동작을 하였고, 이론적으로는 피코초이하의 동작이 가능하다.

광신호들은 전자적 스위치들을 이용하여 스위칭이 가능하며, 이것은 빛을 전기적 신호로 변환하는 광검출기, 전자 스위치, 그리고 전기적 신호를 빛으로 변환하는 LED(또는 레이저)로 구성할 수 있다. 그러나 이런 광/전기/광의 변환은 불필요한 시간지연과 전력손실, 광검출의 과정에서 발생하는 광상(optical phase)의 손실 등이 나타나게 된다. 직접적인 광스위칭이 전자 스위칭보다 우수한 스위치의 특징을 가

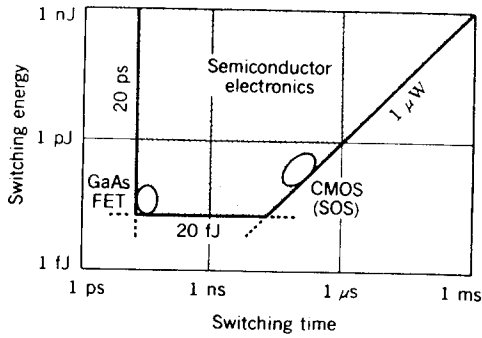


그림 1. 반도체 소자의 스위칭 에너지, 스위칭 시간 및 스위칭 전력

지고 있으며, 직접적인 광스위칭의 방법으로는 광역학(opto-mechanical), 전기광학(electro-optic), 음향광학(acoustic-optic), 그리 자기광학(magneto-optic) 스위칭 등을 들 수 있다.⁵⁻⁷⁾

1. 광역학 스위치

광역학 스위치는 거울, 프리즘, 홀로그래픽 격자 등을 이용하여 광신호를 원하는 방향으로 가도록 한다. 압전소자가 빠른 역동작을 하는데 사용되고, 모세관 셀에서 수은의 움직임은 거울을 동작시키는데 사용된다. 광역학 스위치의 단점은 낮은 스위칭 속도(수 msec 정도)를 가지는 것이며, 장점은 낮은 주입손실과 낮은 크로스토크를 가진다.

2. 전기광학 스위치

전기광학 스위치로 이용되는 전기광학 물질은 전기장에 의해 굴절률이 변화되는 성질을 가진다. 전기광학 스위치에 있어서 벌크 결정을 이용해 큰 스위치 어레이를 만드는 것은 어려우므로, 집적광학기술이 많이 이용되고 있다. 집적광학 광도파로는 LiNbO_3 와 같은 전기광학 유전체 기판에 굴절률이 높은 Ti 금속을 확산시키므로서 만들 수 있다. 집적광학 Mach-Zehnder 간섭계를 이용한 1×1 스위치와 방향성 결합기(directional coupler)를 이용한 2×2 스위치에 대해 그림 2에 보여주고 있다. 이런 스위치들은 20 GHz 이상의 속도와 함께 수 볼트의 전압에서 동작한다. $N \times N$ 집적광학 스위치는 2×2 스위치의 결합을 통해 구현할 수 있으며, 현재 8×8 스위치가 상용화되어 있고, 보다 큰 스위치의 개발이 진행 중이다. 단위 면적당 스위치 수의 제한은 각 방향성

결합기의 상대적으로 넓은 물리적 차원과 칩에서 접속의 평면성 등에 의한 것으로 보인다. 집적광학 기술의 직각성(rectangular nature)은 광섬유와 같은 원통형 도파로와 효율적인 결합을 얻기가 어렵다. 상대적으로 큰 주입손실을 가지며, 특히 기본 모드 광섬유가 방향성 결합기에 접속될 경우 더욱 그렇다. 결합계수는 편광의존도를 가지므로 도파된 빛의 편광은 적당히 선택될 필요가 있다. 이것은 입력과 출력에 결합되는 광섬유가 편광을 유지해야 함을 의미한다. 전기광학 스위치로서 액정의 이용은 스위치 어레이 크기를 증가시킬 수 있지만 스위칭 속도가 느린 단점을 가진다.

3. 음향광학 스위치

음향광학 스위치는 소리에 의한 빛의 Bragg 굴절성을 이용한다. 굴절되는 빛의 크기는 소리의 크기에 의해 조절될 수 있다. 또한 굴절각은 소리의 주파수에 의해 조정된다. 음향광학 변조기는 1×1 스위치이며, 음향광학 주사기(scanner)는 $1 \times N$ 스위치이다. 음향광학 셀에서 $N=2000$ 까지 가능하다. 만약 음향광학 셀의 다른 부분에서 다른 주파수의 음파를 보낼 경우 $N \times M$ 스위치 또는 접속소자를 얻을 수 있다.

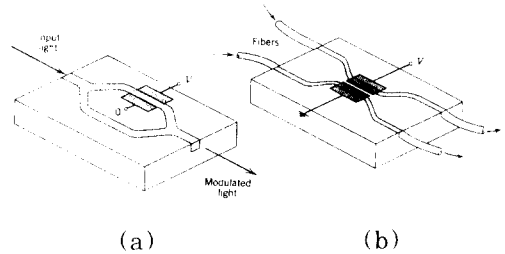


그림 2. (a) 집적광학 Mach-Zehnder 간섭계를 이용한 1×1 스위치
(b) 집적광학 방향성 결합기를 이용한 2×2 스위치

4. 자기광학 스위치

자기광학 스위치에 이용되는 자기광학 물질은 자기장이 광학성질을 변화시키는 특징을 가지고 있다. 즉 Faraday 효과에 의해 자기장이 있는 곳에서 빛의 편광방향이 변화되는 성질을 이용한다. 자기광학물질은 최근 광자기 디스크의 사용에 의해 보다 많은 주목을

받고 있다. 자기광학물질의 자화(magnetization) 변화는 강하게 집중된 레이저를 통한 가열에 의해 변화되는 열자기(thermomagnetic) 효과를 이용한다. 그리고 약하게 선형 편광된 빛이 편독을 위해 사용된다. 자기광학물질은 대개 필름의 형태로 비자기(nonmagnetic) 기판위에 성장된다. 자기광학 스위치 어레이는 단일 필름위에 분리된 셀의 형태(각 셀의 크기는 $10 \times 10 \mu\text{m}$)로 에칭하므로써 구성할 수 있다. 자기광학 스위치는 어레이 크기가 비교적 크며(현재 1024×1024 까지 가능) 스위칭 속도가 100 ns 정도를 가진다.

IV. 완전 광스위치

완전 광스위치에서는 빛이 비선형 광물질의 특성을 통해 빛을 제어한다. 비선형 광효과는 직접 또는 간접효과가 있다. 직접효과는 빛이 전자의 자화를 또는 광자 흡수율을 변화시키는 원자 또는 분자레벨에서 일어난다. 직접 비선형 광효과로는 광 Kerr 효과(인가되는 빛 세기에 의해 굴절률이 변화)와 포화 흡수(인가되는 빛 세기에 의존하는 흡수계수) 등이 있다. 간접 비선형 광효과는 전하와(또는) 전기장이 주된 역할을 하는 중간과정을 가진다. 그 예로는 광굴절 효과를 이용한 광굴절 물질과 optically-addressed 액정 공간 광변조기(liquid crystal spatial light modulator) 등이 있다. 이런 비선형 광효과는 완전 광스위치를 만드는데 사용되고 있다. 예를 들어, 그림 3에서 보듯이 광상변조(optical phase modulation)는 간섭계의 한쪽에 Kerr 물질을 둬서 빛의 변조로 변환된다.⁸

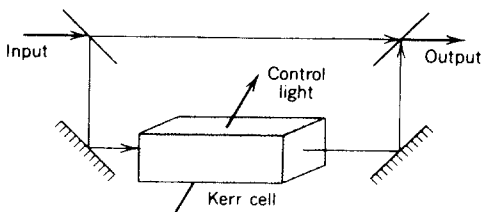


그림 3. Mach-Zehnder 간섭계를 이용한 완전 광스위치

간접 비선형 광효과는 쌍안정 광소자에서도 응용되

고 있으며, 비선형 광요소에는 두가지 형이 있다. 먼저, 굴절률 n 이 빛 세기의 함수인 분산 비선형 요소와 흡수율 α 가 빛 세기의 함수인 소실(dissipative) 비선형 요소가 있다. 광쌍안정성은 광 Kerr 효과를 나타내는 많은 물질들(나트륨 증기, 탄소 2황화물, 니트로벤젠 등)에서 볼 수 있다. 이런 물질들의 비선형성의 계수는 매우 작으므로, 충분한 비선형을 위해 소자의 크기가 증가하게 되고 결과적으로 반응시간이 길어지고(nanosecond 범위) 스위칭을 위한 전력도 커지게 된다. 비선형 Fabry-Perot 에탈론은 두 개의 부분반사 유리사이에 비선형 매질을 채워 넣은 비선형 Fabry-Perot 공진기이다.⁹ 비선형 매질은 입사되는 레이저 광의 강도에 따라 굴절률이 변한다. GaAs, InSb, InAs, 그리고 CdS 등과 같은 반도체는 강한 광 비선형성을 가지고 있으므로, 광쌍안정 소자는 이들을 이용하여 단순히 Fabry-Perot 에탈론의 거울과 같은 동작을 하도록 두 평행한 부분 반사면과 함께 반도체 물질의 층 구조를 만들므로써 구현될 수 있다. 비선형성이 크므로 층이 얇아지고 결과적으로 반응시간이 짧아진다. 비선형 매질중에서 GaAs 소자가 상온에서 동작가능하고, 동작 속도가 대단히 빨라 가장 유망하다. 특히, 양자우물구조의 GaAs-GaAlAs 에탈론은 비선형효과가 보다 크고, 다이오드 레이저 파장에서 동작시킬 수 있다.¹⁰ GaAs 스위치의 스위치 On 시간은 수 피코초 정도이지만 스위치 Off 시간은 느린 캐리어 재결합에 의해 상당히 길게 나타나고 있다(수 nanosecond). 스위치 Off 시간은 표면 재결합의 향상을 통해 200 ps의 스위치 Off 시간을 얻을 수 있다. 스위칭 에너지는 1에서 10 pJ이고, 이론적으로는 펨토줄 정도의 값까지 줄일 수 있다. InAs와 InSb는 보다 긴 스위치 Off 시간(200 ns 정도)을 가지지만 스위칭 에너지의 증가를 통해 속도를 증가시킬 수 있다. 스위칭 소자의 크기에 있어서 1 cm^2 GaAs 칩에 100×100 의 어레이를 만들 수 있으며, 여기서 주된 어려운 점은 열 방출 문제이다. 만약 스위칭 에너지가 1 pJ이고, 스위칭 시간이 100 ps, 스위칭 소자의 수가 10^4 pixels/ cm^2 일 경우 열부하(heat load)는 100 W/cm^2 가 된다. 광소자의 데이터 처리속도는 10^{11} bits/sec이고, 이것은 전자 슈퍼컴퓨터의 10^{10} bits/sec 처리속도에 비해 월등히 빠른 속도를 보여준다.¹¹

지금까지는 완전 광스위치 동작을 하는 쌍안정 광

시스템에 대해 알아 보았지만 그와 달리 전기장을 포함하는 하이브리드 전기/광 쌍안정 시스템이 있는데, 그림 4에 나타난 것과 같이 Fabry-Perot 에탈론의 내부에 Pockels 셀이 있는 구조를 가지고 있다. 출력 빛은 광검출기를 사용하여 검출하고, 검출된 광 세기에 비례하는 전압이 셀에 인가되므로 결과적으로 출력 세기에 비례하는 굴절률의 변화를 가져온다. 전기 광학 물질로서 LiNbO_3 를 사용할 경우 1 ns의 스위칭 시간, 1 μW 의 스위칭 전력, 1 fJ의 스위칭 에너지를 얻을 수 있다.

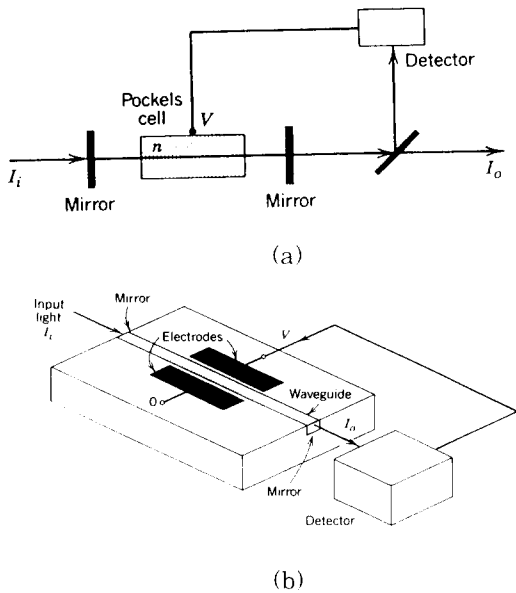


그림 4. (a) Pockels 셀을 포함하는 Fabry-Perot 간섭계
(b) 집적광학의 구현

표 1은 완전 광스위치의 종류를 보여준다.² 여기서, SEED(self-electro-optic-effect device)와 같은 O-E 피드백 소자는 높은 광감도와 2차원 어레이로 적용하기에 용이하므로 많은 연구가 진행 중이다. SEED는 GaAs와 AlGaAs의 얇은 층을 교대로 성장시킨 헤테로구조 양자우물 반도체를 사용하므로서 만들 수 있다. SEED는 적당히 빠른 속도와 매우 낮은 에너지에서 동작하는 어레이 형태의 구현을 가능케 한다. 특히, S-SEED(symmetric SEED)는 자유공간 디지털 광학에서 많이 연구되고 있으며, 논리 소자, S-R 래치, 점 어레이 생성, 광집속 등에 이용된다. 레이저 다이오드 스위치는 많은 팬아웃을 가지고 파장제어되는 재생 소자이다. 보다 빠른 응답시간을 얻기위해 유리 또는 유기물질과 같은 매우 빠른 비선형 광물질이 사용될 수 있다. 이런 물질들을 간섭계 또는 광도파로 결합기와 결합하므로써 피코초

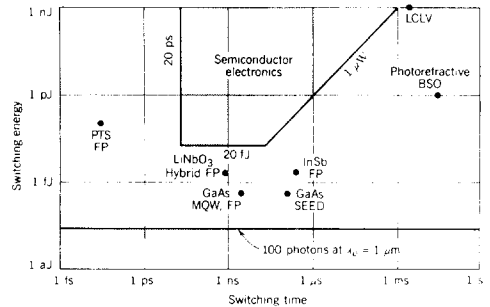


그림 5. 광쌍안정 소자의 스위칭 에너지, 스위칭 시간
(FP:Fabry-Perot, PTS:polymerized diacetylene)

표 1. 완전 광스위치의 분류

Classification	Structure	Waveguide-Vertical	Function	Material	Power-Speed (Reported)	Remarks
O-E Feed Back	• SEED • VSTEP	— ○	• Gating • Bistability	• GaAs	6 μW -100 μW ~3.6 μs -1ns	• High-sensitivity • 2-Dia Array
Laser Osc. /Amp	• LD-Osc. + Saturable Abs. • LD-Amp.	○ ○	• Gating • Bistability • Wavelength Converter	• GaAs • InGaAsP	1 μW -1ns	• Large fan-out • Wavelength Control
Optical Kerr switch	• Etalon + Kerr Medium	— ○	• Gating • Bistability	• GaAs, InSb • ZnS, ZnSe • MQW • Doped glass	4 μW -20ns ~150ps	• 2-Dia, Array
	• Fiber Kerr Medium + Interferometer	○ —	• Gating	• SiO ₂ glass	1.8 μW -<100ps ~32 μW -100fs	• Picosecond Response
	• Waveguide Kerr Medium + Coupler	○ —	• Gating	• Organics	1 μW -<400fs	• Ultrafast Response

또는 펄스 응답 소자를 얻을 수 있다. 그림 5에는 여러가지 광쌍안정 소자들의 스위칭 에너지, 스위칭 시간 등을 나타내고 있다.¹²⁾ 통상의 시스템에서 쌍안정 스위치의 수행에 있어서 몇가지 문제점이 있다. 그것은 어레이의 모든 부분에서 게이트 특성의 균일성과 캐스캐이드성, 어레이에서 개별 픽셀의 팬아웃 능력과 어드레스 능력 등의 문제이다. 그렇지만 비선형성의 물리적 개념과 소자의 동작에 관한 지식이 날로 발전하고 있으므로, 개별 소자의 동작을 정확히 모델화하고 동작 파라메타를 최적화할 수 있을 것이다.¹³⁾

V. SMART PIXEL

smart pixel은 일반적으로 입사광 데이터를 처리하고 처리된 데이터를 출력하며, 다시 광의 형태로(비록 프로세싱을 일반적으로 전자공학영역에서 수행하지만) 처리하는 자율적 소자로 정의된다. 여기서는 현재 관심을 끌고 있는 smart pixel로써 다중 양자 우물 SEED, 광전자 집적회로, 수직 detector/emitter 스위치, SLM(spatial light modulator) 등을 소개하고자 한다.

1. 다중 양자 우물 SEED

SEED는 광바이어스와 외부 광원을 필요로 한다. SEED는 시간 순차 메모리를 가지는데 시간 순차 광이득은 낮은 스위칭 입력과 함께 보다 강한 외부소스의 변조에 의해 얻을 수 있다. 상대적으로 낮은 광 콘트라스트는 광 문턱의 정확한 제어, 입력 파워 레벨의 필요성, 캐스캐이딩의 어려움 등을 가지게 한다.¹⁴⁾ 이런 문제는 S-SEED를 이용하여 해결할 수 있다.¹⁵⁾ S-SEED에서는 입력과 출력 광논리 상태가 두 개의 SEED소자에서 파워레벨의 비에 의해 결정되고 스위칭은 광 입력파워의 차에 의해 영향을 받는다. SEED는 높은 변조 속도(5.5 GHz)를 가지고¹⁶⁾ 최근 두 스위치어레이 사이에 4086 광접속을 할 수 있는 두 개의 64×32 어레이 S-SEED의 캐스캐이드 동작에 대한 실험을 하였다.¹⁷⁾ 광 바이어스의 제거와 감도의 개선의 한 방법으로 FET-SEED(field-effect-transistor SEED)가 사용되고 있다.¹⁸⁾

2. 광전자 집적회로

광 입력 데이터 신호는 광감지기에 의해 전기적 신호로 변환된다. 그 신호는 증폭되고 처리되어 광신호로 재변환된다. 광은 전기적 접속보다 넓은 대역폭과 고집적도를 가지는 상호접속이 가능한 병렬성을 가지고 있다. 이런 병렬 구조는 상호접속 어레이의 fan-out과 fan-in 능력이 뛰어난 것을 요구한다.¹⁹⁾ 이득을 가지는 광전자 집적회로는 순수한 광 또는 전기적 회로보다 상호접속능력이 우수하다. 최근 OP-OEIC(optically powered optoelectronic integrated smart pixel circuits)에 기초를 둔 상호접속 구조 디자인은 전기선을 광파워선으로 대체함으로써 각 픽셀의 hard-wired 접속의 수를 최소화하였다.²⁰⁾

3. 수직 detector/emitter 스위치

소자표면에 수직으로 광신호가 동작하는 반도체 광스위치는 광 병렬 데이터전송시스템과 광 병렬 신호 처리시스템에서의 적용가능성에 의해 그 중요성이 높다.²¹⁻²⁴⁾ 또한, 이런 소자는 크기가 작고, 낮은 전력 소모를 가지며, 광 입출력의 수직성에 의한 2차원 집적화 능력이 우수한 장점을 가지고 있다.²⁵⁾ 대개 표면수직 광스위치(surface-normal photonic switching)는 짧은 상호작용 길이를 가지므로, 높은 콘트라스트 비를 가지기 위해 높은 변조효율을 가지는 전기광학효과가 채택되어야 한다. 게다가, 공간적으로 분리된 두 광신호가 동시에 동작하기 위해 광스위치의 모노리딕 2차원 어레이가 필요하다. 그러므로, 스위치의 구조는 집적화에 적합해야 한다. 최근 이런 수직으로 광신호가 동작하는 소자에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.²⁶⁻²⁷⁾ 표면수직 광스위치의 종류에는 3가지 유형이 있다. 첫째, 전기흡수 변조기(electroabsorption modulators)로써 양자우물의 QCSE(quantum-confined Stark effect)가 주로 이용된다. 이런 효과에서 흡수 edge는 상대적으로 낮은 동작전압에 의해 보다 긴 파장쪽으로 천이할 수 있다. 둘째, 굴절률 변조기이다. 굴절률의 변화는 인가전압의 변화에 의해 유도된다. 이런 변화는 광공진기의 파장 재조정(detuning)으로 나타난다. 이런 유형에서 주입손실은 작지만 굴절률 변화의 효율이 크지 못하므로 낮은 동작전압에서 높은 콘트라스트를 얻을 수 없다. 게다가, 콘트라스트는 입사파장에 민감하게 반응한다. 마지막 세번째는 최근에 많은 연구가 되고 있는 것으로서 광신호의 직접 증폭 흡수이

다.²⁸ 동작원리는 direct bandgap을 가지는 반도체의 이득계수의 변화에 기초를 두고 있다. 이득계수는 작은 순방향 전압 swing에 의해 넓게 변화되므로 낮은 동작전압을 가지고 높은 콘트라스트를 쉽게 얻을 수 있다. 이런 광스위치는 광공진기가 없으므로 넓은 광 대역폭(콘트라스트가 상수값을 가질 수 있는 파장)을 가진다.

4. SLM

SLM은 스위치 어레이에서 많은 픽셀들이 교차하도록 적당한 프레임 rate와 공간 간섭성이 요구되는 2차원과 3차원에 적용되고 있다. SLM은 전기광학, 음향광학, 자기광학, 광역학, 광굴절, 간섭효과 등을 통하여 구성할 수 있다.²⁹⁾ 액정 전기광학물질의 장점은 높은 복굴절성과 낮은 동작전압을 가진다는 것이다. SLM의 광 콘트라스트의 개선을 위해 비대칭 Fabry-Perot 공진기(ASFP)의 사용에 많은 초점을 맞추고 있다.^{30,31)} ASFP는 에피텍셜 다층 반사기에 의해 형성된 Fabry-Perot 공진기내에 단일 SLM을 둬으로써 만들어 진다. 최근에는 액정 변조기를 VLSI 실리콘 후면과 직접 접촉한 SLM이 개발되었다. 이 소자는 단순 SLM의 단점의 많은 부분을 개선하였으며, 광감지기, 아날로그와 디지털 회로, 그리고 액정의 상태를 전기적으로 제어하는 메탈 변조 패드 등을 포함하는 능동요소와 결합한 형태로 제작될 수 있다. smart pixel로서 SLM은 기억소자, On-Chip 센서 또는 변환기, 픽셀내의 프로세싱, 픽셀 상호통신, 광출력 등의 특성을 가진다.³²⁾

VI. 결론


지금까지 광소자가 시스템에서 구성될 때의 고려사항과 광스위치의 종류 및 특성에 대해 살펴보았다. 광소자 자체의 스위치로서의 특성이 우수한 것보다 우선 주변 소자와의 캐스캐이드, 팬아웃, 시스템에서 소자의 에너지, 비용 등의 고려가 필요하다. 광스위치의 종류에는 광역학, 전기광학, 음향광학, 자기광학 스위치들이 있으며, 비선형 광물질의 특성을 이용하여 빛에 의해 제어되는 완전 광스위치에 대해 살펴보았다. 자유공간에서의 스위치 어레이로서 쌍안정 특성을 가지고 있는 SEED가 많이 연구되고 있으며,

반도체로 구성되는 저전력 소자와 유리나 유기물질로 구성되는 소자들은 앞으로의 광 시스템에서 주된 요소가 될 것으로 기대된다. 최근에는 광스위치가 단순한 스위칭 기능뿐만 아니라 여러가지의 부가기능을 함께 가지는 'smart pixel'에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다. 앞으로 구조의 소자개발을 위한 연구와 함께 새로운 물질에 대한 연구 발전도 절실히 요구된다.

參考文獻

- [1] T. K. Gustafson and P. W. Smith, eds., Photonic Switching, Springer-Verlag, New York, 1988.
- [2] K. Tada and H. S. Hinton, eds., Photonic Switching II, Springer-Verlag, New York, 1990.
- [3] S. R. Forrest, H. S. Hinton, "Introduction to the special issue on smart pixels," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, pp. 598-599, 1993.
- [4] B. S. Wherrett and F. A. P. Tooley, eds., Optical Computing, Scottish Univ. Summer School in Physics, 1989.
- [5] G. F. Marchall, ed., Laser Beam Scanning : Opto-Mechanical Devices, Systems, and Data Storage Optics, Marcel Dekker, New York, 1985.
- [6] Y. Silberbeg, "Photonic switching devices," *Optics News*, vol. 15, no. 2, pp. 7-12, 1989.
- [7] S. F. Su, L. Jou and J. Lenart, "A review on classification of optical switching systems," *IEEE Communication Magazine*, vol. 24, no. 5, pp. 50-55, 1986.
- [8] P. W. Smith, "Application of all-optical switching and logic," *Phi. Trans. R. Soc. Lond.*, vol. A313, pp. 349-355, 1984.
- [9] 신상영, 이창희, "광쌍안정소자와 그 응용."

- 전자공학회지 제 15권, 제 4호, pp. 443-454, 1988.
- [10] M. E. Warren, S. W. Koch, and H. M. Gibbs, "Optical bistability logic gating, and waveguide operation in semiconductor etalons." *IEEE Computer*, vol. 20, no. 12, pp. 68-81, Dec. 1987.
- [11] B. E. A. Saleh, M. C. Teich, *Fundamentals of photonics*, John Wiley & Sons, Inc., 1991.
- [12] P. W. Smith and W. J. Tomlinson, "Bistable-optical promise subpicosecond switching." *IEEE Spectrum*, vol. 18, no. 6, pp. 26-33, 1981.
- [13] H. Haug, *Optical Nonlinearities and Instabilities in Semiconductors*, Academic Press, Inc., 1988.
- [14] D. A. B. Miller, et al., "The quantum-well self-electrooptic effect device: optoelectronic bistability and oscillation, and self-linearized modulation." *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-21, pp. 1462-1476, 1985.
- [15] A. L. Lentine, et al., "Symmetric self-electrooptic effect device: optical set-reset latch, differential logic gate, and differential modulator/detector." *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 25, p. 1928, 1989.
- [16] G. D. Boyd, et al., "5.5 GHz multiple quantum well reflection modulator." *Electron. Lett.*, vol. 25, pp. 559-561, 1989.
- [17] F. B. M. Cormick, et al., "Experimental investigation of a few space optical switching network using S-SEEDS." *Appl. Opt.*, 1992.
- [18] L. M. F. Chirovsky, et al., "Batch fabrication and operation of GaAs-AlxGal-xAs field-effect transistor-self-electrooptic effect device (FET-SEED) smart pixel arrays." *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, pp. 670-677, 1993.
- [19] H. S. Hinton, "Architectural considerations for photonic switching networks." *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 6, p. 1209, 1988.
- [20] J. J. Brown, T. Gardner, and S. R. Forrest, "An integrated, optically, powered, optoelectronic smart logic pixel for interconnection and computing applications." *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, pp. 715-726, 1993.
- [21] A. Himeno, H. Terui, and M. Kobayashi, "Guided-wave optical gate matrix switch." *J. Lightwave Technol.*, vol. 6, pp. 30-35, Jan. 1988.
- [22] A. A. Sawchuck, B. K. Jenkins, C. S. Raghavendra, and A. Varma, "Optical crossbar networks." *IEEE Computers*, vol. C-6, pp. 50-60, June 1987.
- [23] N. Nakagawa, "Role of optical amplifiers in realizing all-optical communication networks." in *Photonic Switching II*, K. Tada and H. S. Hinton, Eds. Berlin:Springer-Verlag, 1990, p. 14.
- [24] M. Hisamoto, M. Fukui, and K. Kitayama, "Self-routing optical crossbar switch." *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 2, pp. 522-524, 1990.
- [25] K. Kasahara, "VSTEP-based smart pixels." *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, pp. 757-768, 1993.
- [26] Y. Mori, "Two-dimensional GaAs photonic switch array with direct gain and high contrast." *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, pp. 396-402, 1993.
- [27] T. Numai et al., "Indistinct threshold laser operation in a pnpn vertical to surface transmission electrophotonic device with a vertical cavity." *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, pp. 403-410, 1993.
- [28] Y. Mori, "Characteristics of 4×4 photonic switch array with gain and

- high contrast." *Appl. Phys. Lett.*, vol. 58, pp. 438-440, 1991.
- [29] C. Warde and A. D. Fisher, "Spatial light modulators: application and functional capabilities," in *Optical Processing*, J. Horner, Ed. San Diego, CA: Academic, 1987.
- [30] P. Zouganeli, et al., "High tolerances for low-voltage, high-contrast, low-insertion-loss asymmetric Fabry-Perot modulator," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 3, pp. 733-735, 1991.
- [31] K. -K. Law, L. A. Coldren, and J. L. Merz, "Low-voltage superlattice asymmetric Fabry-Perot reflection modulator," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 3, pp. 324-326, 1991.
- [32] K. M. Johnson, D. J. McKnight, and I. Underwood, "Smart spatial light modulators using liquid crystals on silicon," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, pp. 699-714, 1993. 

筆者紹介



尹 台 燾

1956年 8月 24日生

1979年 2月 서울대학교 공과대학 전자공학과 (학사)

1982年 2月 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (석사)

1986年 8月 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (박사)

1990年 3月 ~ 1991年 2月 Univ. of Arizona, Optical Sciences Center 연구원
1986年 11月 ~ 현재 부산대학교 공과대학 전자공학과 부교수

주관심 분야 : 광스위칭소자, 광도파로소자, 액정 Display 등



鄭 泰 赫

1966年 4月 20日生

1991年 2月 부산대학교 공과대학 전자공학과 (학사)

1993年 2月 부산대학교 대학원 전자공학과 (석사)

1994年 현재 부산대학교 대학원 전자공학과 (박사과정)

주관심 분야 : 광스위칭소자, 광도파로소자, 액정 Display 등