

광신호처리의 기본이론 및 응용

元 容 俠

韓國電子通信研究所 光交換研究室

I. 서론

광학기술이 신호처리분야에 필수적으로 이용 되어야 하는 까닭은 광의 고유특성인 공간 및 시간영역에서의 큰 대역폭과 병렬처리가 가능할 뿐만 아니라 이제까지의 전자기술로는 해결할 수 없었던 초고속 신호처리를 가능케 하는 광소자의 잠재력 때문일 것이다. 특히 끊임없이 향상되고 있는 컴퓨터의 계산능력의 한계를 극복하고 새로운 형태의 컴퓨팅 도구를 제공하기 위한 기술로서 고도의 병렬처리가 가능한 광학기술의 필연성이 대두되어 왔다. 결국 광신호처리의 궁극적 목표는 현재의 컴퓨터의 한계를 극복하고 새로운 차원의 기능을 가능케 하는 광컴퓨터의 실현과 그 맥을 같이 하고 있다.

광신호처리의 연구는 광소자 기술분야와 광학구성 기술분야로 구분되어 진행 되어 왔다. 광소자의 연구는 기존 컴퓨팅 하드웨어의 성능과 신호속도를 향상시키기 위한 결정적 역할을 할 수 있으리라 기대되어 왔다. 광소자를 이용하여 신호처리의 속도를 향상시키기 위한 개념은 종래의 미세구조로 집적화 하거나 배선구조를 고도로 개선 하는것을 훨씬 뛰어넘는 혁신적인 방법으로 평가 되었다. 그러나 이러한 기술은 기존 디지털 전자식 컴퓨팅 개념의 토대위에서 개발 되어 왔기 때문에 기존 컴퓨터에 익숙해 있는 사용자에게도 기술적으로 큰 어려움 없이 강력하고도 다양한 기능의 컴퓨팅 환경을 제공할 수 있으리라 기대된다. 한편, 광학기술은 과거 오랫동안 독자적으로 발전되어 왔지만 최근에 와서 신호처리 또는 광컴퓨팅 분야에 접목되면서 전자공학 기술로는 구현하기 힘든 고도의 성능을 구현하기 위한 연구에 집중되고 있다. 이 분야에서는 신호처리의 고속성 뿐만 아니라 병렬

성을 함께 구현할 수 있는 장점이 있어 많은 응용 잠재력을 내포하고 있고, 이 중에서 특히 광 신호처리의 병렬성을 활용하는 연구가 보다 활발하게 진행되고 있다. 이 분야의 대표적인 응용예를 살펴보면, 이차원적인 상관관계(convolution)수행, 인공지능이나 신경망 모델에서 학습원리에 관련된 문제의 적정화, 또는 간단한 푸리에 관련(Fourier-based)계산 등이 있다. 이러한 응용에서는 광파의 고유한 공간적인 병렬성을 이용하기 때문에 기존계산에서 이진법을 사용하여 계산하는 방법과는 달리 다진법을 이용한(multi-valued)계산 이라던가 퍼지이론 또는 애널로그 신호처리가 보다 쉽게 이루어질 수 있다. 현재의 추세로 볼때, 광소자 기술과 광학구성 기술에서 광학적인 장점과 전자기술의 장점을 최대한 이용하여 결합한 하이브리드 시스템 형태로 발전되어 가면서 하드웨어의 성능을 극대화하는 방향으로 진행 될 전망이다.

광 신호처리 분야는 현대의 광학이 정보통신분야에 관련 되면서 부터 그 응용 범위가 다양 해지고 각 응용 분야별로 세분화 되어 발전되고 있다. 따라서 이 모든것을 한번에 깊이있게 소개 하기에는 너무 방대하므로 본 고에서는 광신호처리를 위한 기본 광학이론과 광스위칭 및 광컴퓨팅에 관련된 대표적인 광소자 및 시스템 등을 응용 차원에서 개괄적으로 기술하고자 한다.

II. 광정보처리를 위한 푸리에 광학

1. 공간 필터링(spatial filtering)

종래의 광정보처리는 렌즈를 이용한 푸리에 광학과 선형적인 기하광학 시스템을 이용한 영상처리에서부

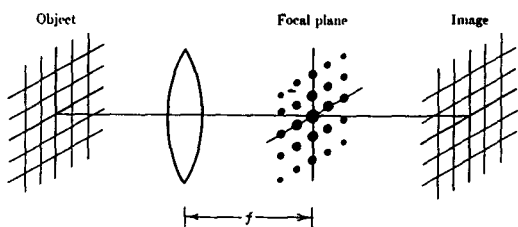


그림 1. Abbe-Porter의 푸리에 합성실험 구성도

터 시작하였다. 가장 간단한 형태의 광정보처리 실험은 1893년에 Abbe와 Porter에 의해 처음 행하여진 푸리에 합성(Fourier synthesis) 실험이었다.^[1] 이 실험은 기본적인 푸리에 해석이론을 바탕으로 coherent image를 재생할 수 있는 실험적 증명을 보여준 좋은 모델이었다. 그림1에서 그물모양의 영상이 볼록렌즈 전면의 coherent light source로 조사되면 렌즈의 뒷면의 촛점거리면에 푸리에 스펙트럼이 나타나고 렌즈를 통과한 각 푸리에 성분들은 다시 결합되어 영상면에 본래의 그물영상이 재생된다. 이때 푸리에 스펙트럼이 나타나는 렌즈의 촛점거리면에 여러가지 장애물(즉, 조리개, 작은 길쭉한 틈, 작은 차단막 등)을 놓으면 영상면에 생기는 영상의 스펙트럼을 여러가지 형태로 조절할 수 있다. 그림2에서 작은 길쭉한 틈(slit)을 렌즈의 촛점거리에 수직으로 위

치하게 하면 그물모양의 영상의 수직성분은 완전히 차단되고 수평성분만 재생된다. 반대로, 이 slit을 90°회전하여 수평으로 놓으면 영상의 수평성분이 차단된다. 이 밖에 다른 흥미 있는것으로서 slit 대신에 아주 조그마한 차단점(small stop)을 촛점거리상의 중앙점에 위치 시키면 주기성을 갖는 그물모양의 영상의 푸리에 성분의 zero-frequency는 차단되고 high-frequency만 통과되어 뒷면에 생기는 영상은 명암전도(contrast reversal)가 생기게 된다. 즉, 영상의 모서리 부분은 밝게 나타나고 그 외의 부분은 어둡게 보인다(high pass filter). 반면, 차단점 대신 같은 위치에 조그만 구멍이 있고 그 외의 부분이 막혀 있으면 low pass filter의 특성을 나타낸다. 이와 같은 공간필터링 기술은 영상 데이터 처리의 기본으로서 사진의 해상도를 향상 시키는데 많이 사용되어 왔으며 광정보처리 분야의 중요한 초석이 되었다.^[2,3]

푸리에 광학을 이용하여 정보처리분야에 응용한 예는 보상필터(compensating filter)를 사용하여 사진 필름이나 현미경의 해상도를 개선하는 종래의 용도에 의 신호의 convolution, correlation등의 수행이 가능하므로 최근에는 통신분야에서 입력신호의 변조, 저장, 필터링, 검출 및 추론등에 이용되는 등 그 응용범위가 매우 넓어졌다.^[4,5,6] 이러한 응용의 대표적인 것으로서 패턴인식(특히, 문자인식)분야와 synthetic-aperture radar 분야가 있다.^[7,8,9] 패턴인식은 기본적으로 정합필터(matched filter)의 개념을 이용한다.

정합필터의 개념은 맨 처음 통신분야에서 신호검출을 위해 사용된 방법이었으며, 백색잡음 속에 섞여 있는 미지의 신호를 검출하기 위하여 정합필터를 사용하여 S/N비(신호 대 잡음비)를 증가 시키는 것이었다. 정합필터는 Vander Lugt 합성 필터를 이용하는 것으로, 이 필터에 잘 정합된 특정신호가 입력신호와 결합되어 그 출력부분에서 상관관계(cross-correlation)함수로 나타나도록 하여 출력신호로부터 입력신호를 재생하기 위함이다.^[10] 정합필터의 부품으로 Mach-Zehnder 간섭계나 Rayleigh 간섭계등을 이용할 수도 있으나 홀로그래프를 이용하여 편리하게 만들 수도 있다. Vander Lugt 홀로그래픽 필터는 다음 절에서 다시 언급된다.

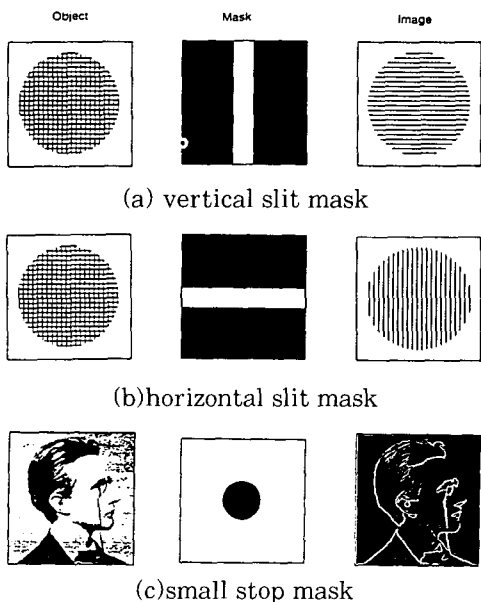


그림 2. 공간 필터링 특성의 예

2. 홀로그래피

홀로그래피는 광신호를 저장하고 재생하는 기술로

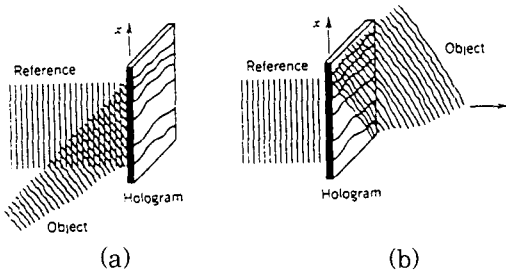


그림 3. 홀로그램을 이용한 정보처리 (a) 입력신호 (object wave)와 기준신호의 간섭패턴 저장 (b) 입력신호의 재생

서 광 신호처리 분야에서 매우 중요한 자리를 차지하고 있다. 그림 3에서 보는 바와 같이 입력영상을 나타내는 광파형과 기준 광파형을 서로 결합시켜 생긴 간섭패턴으로 코드화된 정보의 홀로그램을 만든다. 이때 코드화된 정보는 크기 및 위상의 정보를 모두 포함한다. 일단 입력파형과 기준파형의 간섭패턴으로 만든 홀로그램이 저장되고 나서, 기준파형만을 이 홀로그램에 입사시키면 원래의 입력파형을 재생할 수 있다. 그림 4는 홀로그램을 이용하여 만든 Vander Lugt 홀로그래픽 필터를 도식한 것이다. 임펄스 응답함수인 $h(x, y)$ 의 푸리에 변환의 홀로그램이 일단 저장되고 나서 함수 $f(x, y)$ 의 푸리에 변환된 신호가 이 홀로그램을 통과하여 렌즈를 통과한 후 역 푸리에 변환되면, 그 결과인 함수 $g(x, y)$ 는 $f(x, y)$ 와 $h(x, y)$ 의 convolution관계로 나타난다. 이것은 임펄스 응답함수를 가진 공간필터의 특성을 보여주며 앞 절에서 기술된 패턴인식을 위한 정합필터에 응용될 수 있다. [11, 12]

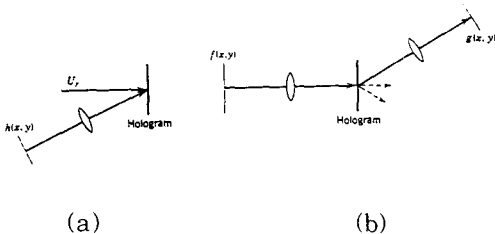


그림 4. Vander Lugt 홀로그래픽 필터. (a) 푸리에 변환된 함수의 홀로그램 저장 (b) 재생된 신호의 역푸리에 변환

Ⅲ. 전기광학 효과와 비선형 광학

어떤 물질에 전기장(electric field)이 가해질 때 그것의 광학적 특성이 변화게 된다. 가령, 인가된 전기장에 비례하여 물질의 굴절율이 변화할 때 그 효과를 선형적(linear) 전기광학 효과 또는 Pockels effect라 하고 그 굴절율이 전기장의 제곱에 비례할 때 비선형적(quadratic) 전기광학 효과 또는 Kerr effect라 한다. 보통 굴절율의 변화는 아주 미미하지만 빛이 물질을 통과하는 거리가 빛의 파장보다 아주 길면 그 변화의 효과는 아주 크게 나타날 수 있다. [13] 따라서 이러한 물질을 이용하여 전기적으로 광학 특성을 조절할 수 있는 광학소자를 만들 수 있다. 광 신호처리 분야의 확장은 바로 이러한 전기광학 효과 및 비선형 광학 소자의 성능과 특성에 직접적으로 좌우되며 그 응용의 한계가 결정된다.

1. 전기광학 효과를 이용한 소자

Pockels effect를 이용한 가장 간단한 광학소자로서 우선 위상 변조기(phase modulator)를 들 수 있다. 광선이 일정한 길이의 매질을 통과할 때 광선의 위상지연(phase delay)이 일어나게 된다. 이때 빛이 통과하는 광도파로의 일정길이에 전극을 부착하여 전기장을 인가하면 광선의 위상변화를 인가된 전압의 함수로 변화 시킬 수 있다. 이러한 전기광학효과와 위상 변조기는 보통 집적광학 기술로 제조가 가능하고 빠른 속도 및 낮은 동작전압에서 동작한다. 현재까지 집적광학 소자(integrated-optical device)의 기관으로 많이 이용되고 있는 재료중의 한 가지는 LiNbO_3 로서, LiNbO_3 기관위에 타이타늄을 열확산시키면 이 부분의 굴절율이 증가하게 되어 광도파로가 형성된다. 또한 위상 변조기는 광량(세기) 변조기(optical intensity modulator)로도 사용할 수 있다. 위상지연 그 자체 만으로서는 광의 세기와는 무관하지만 간섭계의 한쪽 지선(branch)에 위상 변조기를 씌우므로써 광량 변조기를 만들 수 있다. 그림 5 (a)는 그 한 예로서 집적광학 형태의 Mach-Zehnder 간섭계를 보여준다. 간섭계에 인가 되는 입력광은 beam splitter(그림 5에서 입력부분의 Y형 branch)에 의해 똑같은 양으로 분리되어 양쪽 지선으로 전파되고, 이 중에서 한쪽 지선에 위치한 위상 변조기에 전파되는 광선의 위상을 전압으로 조절하면

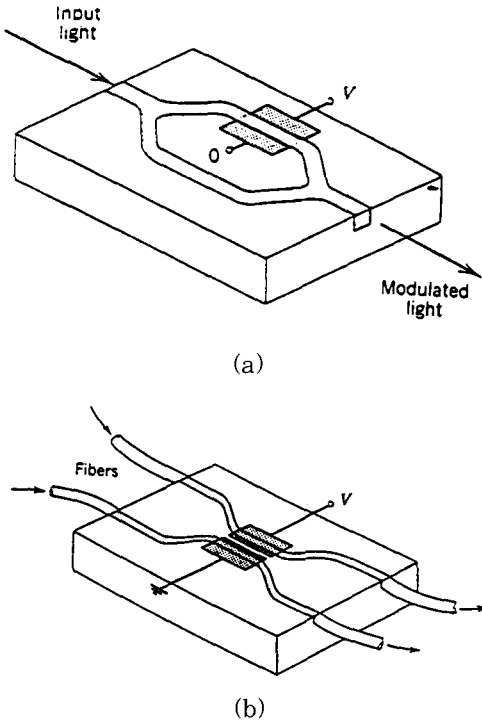


그림 5. (a) 집적광학 형태의 Mach-Zehnder 간섭계 (b) 집적광학 형태의 방향성 결합기

나머지 다른 한쪽의 광선과 만날 때 서로 간섭을 일으켜 최종 출력광의 세기가 조절된다. 이 때 두 광선의 광 경로차가 $\pi/2$ 일때 선형적 광량 변조기로 작용하고, 경로차가 0 일때와 π 일때는 출력광이 각각 off 와 on 로 변하는 스위치로 작용한다. 이 변조기로서 현재 25 GHz이상의 변조속도가 발표되었다. 집적광학 소자에서 두개의 평행한 도파로가 매우 근접해 있을때 두 도파로 사이에서의 광결합을 조절하는 것도 전기광학 효과의 다른 중요한 응용 중의 하나이다. 이것은 하나의 도파로를 전파하는 광선을 다른쪽의 도파로로 전달할 수 있는 방향성 결합기(directional coupler)를 가능하게 한다. 그림5(b)의 방향성 결합기에 인가된 전압이 zero 이면 한쪽의 도파로의 광선은 다른쪽으로 모두 전달되어 두 입력 신호가 교차하게 되고, 반대로 V_0 이면 모든 광선은 한쪽의 도파로에 그대로 남아있게 되므로 두 입력 신호는 교차하지 않고 그대로 직진하게 된다. 현재 LiNbO_3 를 사용한 방향성 결합기가 가장 많이 쓰이고 있으며, 이 소자의 스위칭 전압 V_0 는 보통 10V 이하

이고 스위칭 속도는 10 GHz 이상이 보고되고 있다. 다음에는 광정보처리에서 필수적인 SLM 소자(spatial light modulator)를 생각해 보자. SLM은 개별적 광량 변조기를 이차원적으로 배열하여 이차원 평면상의 각 지점에서 광세기 변조가 가능 하도록 한 소자이다. 즉, SLM에 입사되는 입력광선은 이차원 평면상의 각 점에서 제각기 다른 투과율 또는 반사율로 변조되어 출력된다. 투과율과 반사율은 전기광학 효과에 의해서 조절이 가능해야 하나 이차원 평면상에서 구현 하기가 매우 어렵다. SLM은 최근에 연구되고 있는 대부분의 광컴퓨터의 구조에서 광배선 등에 이용되기 시작 하였으며, 전기광학효과 외에 자기광학효과, 음향광학효과, 광굴절효과, 기계적인 효과(예를 들면, 변형이 가능한 거울)등 여러가지 방법이 이용되고 있다. [14,15] 이제까지 가장 혼란 두가지 SLM으로 액정형 light valve 와 자기광학형이 있지만 최근에 전기광학효과를 이용한 SLM이 더욱 활발히 연구되고 있다. 그림 6은 전기광학 효과를 이용한 보다 새로운 SLM 소자를 보여주고 있으며, 광학적으로 변조패턴을 write할 수 있어 광학적 조절이 가능한 소자이다. 전기광학 물질의 조절에 필요한 전기장을 고르게 분포시키기 위한 박막형의 광전도 물질(photoconductive material)을 전극과 전기광학 물질 사이에 삽입 하였다. 광전도 물질에 입사되는 광 변조 패턴은 이차원 평면의 각 위치에서 각각 다른 광세기를 갖고 있으며, 광세기에 비례하여 광전도 물질의 콘덕턴스가 변화한다. 광전도 물질은 양쪽의 전극사이에 위치하여 캐패시터로 작용하며, 초기충전 상태를 유지한다. 이 캐패시터의 전하량(전압)은 전

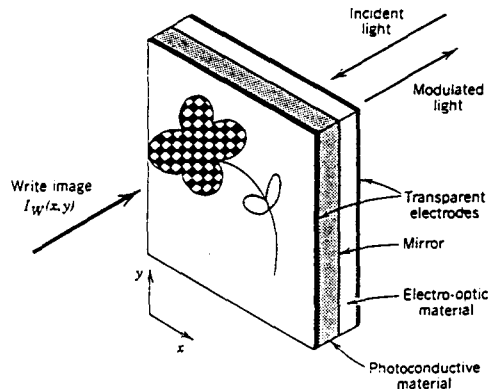


그림 6. 전기광학 SLM (spatial light modulator) 구조도

덕턴스에 반비례하므로, 결국 국부적으로 형성된 전기장은 그 지점에 입사된 광변조 패턴의 세기에 반비례하여 형성된다. 이 외에 최근 디지털 광컴퓨팅에 적합한 새로운 원리의 SLM들이 많이 개발되고 있다. 이 중에서 반도체 광소자인 SEED(self-electro-optic-effect device)가 1985년 Miller에 의해 개발되었다.^[16] 스위칭 시간이 2ns, 5:1의 명암비, 32×64 집적도, 그리고 50 line pairs/mm의 배선해상도가 보고되었다. 이 밖에도 SEED는 광논리소자, 스위칭소자 등으로도 활용된다.

2. 광굴절 효과를 이용한 소자

광굴절 효과를 나타내는 물질은 광전도(photoconductive) 특성과 전기광학(electro-optic) 특성을 함께 갖고있어 공간적으로 분포된 광패턴을 인식하여 같은 모양의 패턴을 갖는 굴절을 분포형태로 저장할 수 있는 능력을 갖고있다. 이러한 과정을 다시 한번 간단히 설명해 보자. 광굴절 물질을 빛에 노출시키면 물질내의 불순물 에너지 준위에서 전도대로 여기된(excited) 자유공간 전하가 생성되고 이 자유공간 전하들은 확산하여 다른 이온화된 불순물 준위에서 포착되어 재결합 하게된다. 이때 비균질의 공간전하 분포(inhomogeneous space-charge distribution)가 형성되고, 이 전하분포는 또한 내부 전기장 패턴을 형성하게 되며, 내부 전기장은 전기광학효과(Pockel)에 의해 국부적으로 물질의 굴절율을 변조 시키게 된다. 결국 광파를 사용하여 물질의 굴절율을 공간적으로 분포하여 변화 시킴으로써 광학적으로 영상신호의 기록이 가능하다.^[17,18] 주요 광굴절 물질로서 BaTiO₃, Bi₁₂SiO₂₀, LiNbO₃, KNbO₃, GaAs, SBN 등이 있다.

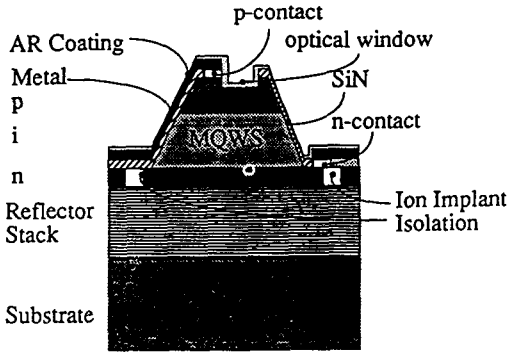
광굴절 효과는 특히 광병렬처리에서 뛰어난 특성을 갖고있기 때문에 데이터 저장용 물질이나 광배선용 소자 등 여러방면에 응용될 수 있다. 또한 이러한 영상저장 특성을 이용하여 실시간 홀로그램 형태의 'Two-wave mixing'을 가능하게 한다. 두개의 광파형, 즉, 기준파형과 입력 영상파형,이 합쳐질 때 간섭된 현파의 패턴이 생성되고, 이것은 다시 굴절을 변화 패턴으로 grating을 형성하여 물질내에 저장된다. 이때 패턴이 저장된 물질에 기준파형을 입사시키면 원래의 입력 영상파형을 재생시킬 수 있다. Two-wave mixing 방법은 'NOT' 와 'NOR'의 논리수행, 두 입력영상의 상관관계, 증폭, 광배선 등

에 응용될 수 있다.^[19]

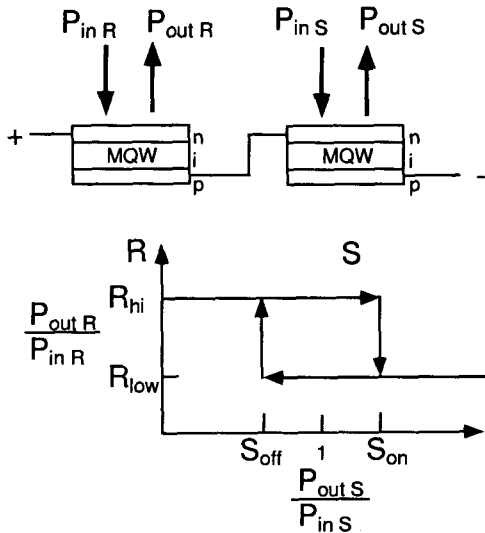
3. 비선형 광학효과를 이용한 소자

1970년대 후반경의 광신호처리 또는 광컴퓨팅 분야에서 새로운 전기를 맞이하게 된것 중의 하나는 비선형 광학효과가 큰 물질의 발견일 것이다.^[20,21,22] 완전 광스위치(all-optical switch or optic-optic switch)도 이러한 3차의 susceptibility (χ^3)를 이용한 것이다. 비선형 광학효과는 직접적인 것과 간접적인 것으로 나눌 수 있다. 우선, 직접적인 효과는 물질에 광선을 직접 인가할 때 원자의 susceptibility 또는 광자의 흡수율을 변화시켜 발생하는 효과를 말하며 Kerr effect(인가된 광선의 세기로서 굴절율을 변화 시키는 효과) 와 포화흡수(인가된 광선의 세기에 따라 흡수계수를 변화 시키는 효과)가 이에 해당된다. 간접적인 비선형 효과는 광선이 매질에 인가될 때 전기전하 또는 전기장이 유도되는 중간단계를 거쳐 비선형 효과가 일어나는 것을 말하며 앞에서 기술된 광굴절 물질이나 광조절 액정 SLM 소자 등이 이에 해당한다. 이 외의 간접적 비선형 효과를 이용한 소자로서 광쌍안정 스위칭(optical bistable switching)소자를 들 수 있다. 광쌍안정 스위칭 소자는 광 게이트와 flip-flop 등에 응용되어 디지털 광컴퓨터에 사용될 수 있다. Fabry-Perot etalon은 중요한 광 쌍안정 소자의 하나이다.^[23,24] etalon에서 입력된 광의 세기가 증가하면 양쪽 거울면 사이의 매질의 굴절율이 증가하게 되고 이것은 또다시 etalon의 광파 전달곡선의 최대점을 다른 파장영역으로 이동 시키게 되어 결국 입력광의 세기에 따라 스위칭을 수행하게 된다. 이러한 비선형 etalon 소자는 간단한 Boolean 논리 게이트로서의 기능뿐만 아니라 광쌍안정 특성을 이용하여 광 latch 소자기능도 수행할 수 있다.

GaAs, InAs 등과 같은 반도체를 소자에 응용함으로써 많은 잇점을 얻을 수 있다. 가령, 밴드갭 근처의 파장에서 여기자(exciton: electron-hole pair) 흡수효과를 이용한 강한 비선형성을 얻을 수 있다는 점과 결정층을 박막으로 만들 수 있어 소자의 응답시간을 매우 빠르게 할 수 있다는 점이다. SEED는 반도체를 이용한 전기광학 쌍안정 소자로서 그림7(a)에 보여지는 바와 같이 에너지 밴드갭이 작은 박막의 GaAs층과 밴드갭이 큰 AlGaAs층을 교대로 적층시킨 다중 양자우물 구조(multiple



(a)



(b)

그림 7. (a) SEED 변조기의 반도체 결정구조
(b) S-SEED의 구조 및 동작특성

quantum-well, MQW)를 갖는다. 이 구조에서 양자우물층 내에 갇혀있는 여기자의 흡수를 외부인가전압으로 조절하여 출력광을 조절할 수 있다(Quantum Confined Stark Effect). 실제로 GaAs층의 두께를 보통 100 Å (1Å=10⁻⁸cm) 정도로 하고 적층된 양자우물의 개수를 약 60개 정도로 한다. 이렇게 많은 수의 양자우물층을 적층하는 것은 양자우물내에 잔류하는 여기자의 흡수율을 증가시키고 파장에 대한 흡수 선택도를 향상시켜 결국 소자의 명암비(contrast ratio)를 증가 시키기 위함이다. 그리고 AlGaAs층에 의한 양자벽의 높이는 Al의 비율(mole 농도)에 따라 결정되고 대개 30%정도의 Al을 사용

한다. 이러한 소자는 스위칭 시간이 느리고 동작전압이 높은 단점(10V 정도)이 있다. 그러나 최근 Al 비율농도를 5% 이하로 감소시켜 양자벽을 충분히 낮추어 주므로써 스위칭 시간을 수십 ps(1ps=10⁻¹²s), 동작전압도 5V 이하이며^[25], Fabry-Perot 구조를 이용하여 명암비를 10:1 이상으로 개선시킨 새로운 SEED가 개발되고 있다.^[26] 또한 실제로 프로세서에 적용하기 위해서 두개의 SEED를 직렬로 연결하여 만든 Symmetric-SEED(S-SEED)형태로 사용하며 1pJ 정도의 낮은 입력광이 인가되어도 스위칭을 수행한다. S-SEED는 SLM 형태로 광배선 기능을 수행할 뿐만 아니라 다음과 같이 광논리기능도 가능하다. 그림7(b)에 S-SEED의 동작특성이 나타나 있다. R 과 S로 명명된 두개의 SEED 형태의 변조기가 결합되어 RS flip-flop 형태를 이룬다. 이 그림에서 R 변조기의 반사율은 R 과 S의 입력광 세기 비에 따라 hi 또는 low값을 갖는다(통상, R_{hi}=30%, R_{lo}=10%). 이 소자는 완전히 대칭구조를 가지고 있으므로 R 변조기의 반사율이 hi 상태이면 S 변조기는 low상태가 되며 그 반대의 경우도 가능하다. 따라서 이 소자는 어느 한 변조기에 0 이나 1로 preset 하므로써 NOR 게이트로 동작 시킬 수 있다.

IV. 광스위칭 과 광컴퓨팅

스위칭은 통신망에서 매우 중요한 기능중의 하나이다. 이 뿐만 아니라 디지털 컴퓨터와 신호처리 시스템에서도 기본기능을 제공한다. 고속 광섬유통신 시스템이 최근 급속히 발전 됨에 따라 그에 상응하는 광신호처리를 수행할 수 있는 대용량 광 중계기와 터미널 시스템이 필요하게 되고 이에 필요한 고속 광스위치의 개발이 요구된다. 마찬가지로 빠른 광게이트, 스위치 그리고 메모리 소자가 개발되면 광컴퓨팅 기능도 실현될 수 있다.

1. 광스위칭

광스위칭 기술은 종래의 전자식 스위칭 기술의 한계를 극복하고 광의 고유특성인 고속성, 병렬처리 능력 등을 활용하는 차세대 종합정보통신망 구축에 필요한 핵심적인 스위칭 기술로 부각 되고있다. 광스위칭 기술은 아직 광스위칭 소자의 기술수준에 머무르

고 있는 실정이며 현재 광스위칭 소자 기술이 아직 미흡하므로 광스위칭 시스템의 스위칭 및 제어기능 전체를 광기술로 대체 하기에는 상당한 시간이 걸릴 것으로 예측 되지만 선진외국에서는 소규모의 기능별 광스위칭 시스템을 개발하여 발표하고 있다.^[27]

광 스위칭 방식은 공간분할 방식, 시간분할 방식, 파장분할 방식, 자유공간분할 방식 등이 있다.

공간분할 방식은 도파로형태의 유도된(guided) 공간통로상에서 입력신호를 스위칭 하는 방식으로, 주요 부품으로 광 매트릭스 스위치가 사용된다. 광스위치 재료로는 주로 LiNbO_3 , InP, Polymer 등이 있으며, LiNbO_3 광스위치는 전기광학적 특성을 이용하여 스위칭을 수행하는 소자로서 가장 먼저 개발되기 시작 하였으며 특성은 많이 안정되어 있는 편이나 열문제가 있고 송수신기와의 집적화의 어려움이 있을뿐만 아니라 가격이 상대적으로 비싼 단점이 있어 현재는 상품화를 위한 개발이 주춤한 상태이다. 반면, InP 광스위치는 결정구조와 미세양자구조 등이 가능하므로 파장분할 방식 등 다양한 기능을 갖는 소자를 실현할 수 있으나 공간분할 방식용으로 사용할 때는 전기광학적인 방법이나 내부전반사 형태를 이용한다. 또한 InP 스위치는 광송수신기와 집적이 용이한 장점을 갖고있다. 한편 Polymer 를 이용한 광스위치는 가장 최근에 연구 되기 시작 하였으나 대역폭이 GHz 이상이고 손실이 상대적으로 매우 낮을뿐만 아니라 제작 또한 상대적으로 용이한 장점이 있어 활발한 연구가 진행되고 있는 소자이다. Polymer 광스위치는 재료합성 방법, 제작방법에 따라 파장분할 방식, 공간분할 방식, 광배선 등 여러가지 기능의 소자의 실현이 가능하다. 시간분할형 광스위칭 방식은 광의 고속성을 이용할 수 있고 또한 기존 전자식 스위칭의 원리와 유사하므로 이들과의 정합이 용이하다. 시간분할형 방식은 공간분할 방식에서의 공간경로별로 신호채널을 분리하는 방법과는 달리 시간상에서 각 신호채널이 다중화 되고 스위칭 되기 때문에 광신호를 임시 저장하고 다시 읽을 수 있는 광메모리 기술이 필요하다. 현재 광메모리 소자에 대한 개발수준은 전자 메모리 처럼 자유롭게 응용되는 단계가 아니다. 이 기능을 수행하는 소자로는 광섬유 지연선(optical fiber delay line)과 쌍안정 레이저 다이오드 등이 사용되고 있다. 파장분할을 이용한 스위칭 방식은 하나의 광 전송로에 여러개의 파장을 갖는 광신호를 동시에 다중화 할 수 있으므로 광의 병렬성을 최대한

이용할 수 있어 대용량 광대역 스위칭 시스템을 실현하는데 적합하다.^[28] 파장분할 스위칭을 위한 주요 소자로는 파장가변 레이저 다이오드(tunable laser diode)와 파장가변 필터(tunable filter)가 필요하나 아직 소자기술이 성숙되지 않아 시스템 개발을 지연 시키는 요인이 되고 있다. 마지막으로, 자유공간 분할형 스위칭 방식은 공간분할 방식의 일종으로 생각 되기도 하지만 도파로, 광섬유 등의 유도된 공간통로(guided path)를 가지고 있지 않기 때문에 공간분할 방식과 구별된다. 자유공간 방식은 소자의 표면과 표면 사이에서 광선(optical beam)형태로 직접 전달, 교환 되기 때문에 2차원 또는 3차원의 스위칭 시스템 구성이 가능하여 공간의 이용효율을 극대화할 수 있다.^[29] 주요 소자로서 표면방출 레이저 다이오드(surface emitting laser diode) 등과 같은 광원과 논리를 수행하는 SLM 소자 등이 있다. SLM 소자는 전기적인 제어신호에 따라 광선의 통과/폐쇄 기능을 수행한다. 그러나 이 방식은 소자의 제작이 어렵고 광정렬(optical alignment)이 까다로워 흔들림에 약한 단점을 갖고있다. 이상의 여러가지 스위칭 방식들은 각각 독립적으로 사용되기 보다는 시스템 목적에 따라 대개 두가지 이상 혼합하여 스위칭 효율을 극대화 하고있다. 그러나 결국 광스위칭은 소자의 의존도가 매우 높고 관련 소자의 기술개발 속도가 느리기 때문에 현재와 같은 기술 과도기에는 제어기능 등의 비교적 복잡한 기능은 전자소자를 이용하고 고속성과 병렬성과 같은 광의 고유특성을 활용하는 기능은 광소자를 이용하여 이 두가지가 결합된 복합적인 시스템이 한동안 지속적으로 개발될 전망이다.

2. 광배선(optical interconnection)

광배선 기능은 광신호처리 분야에서 광스위칭이나 광논리 기능과 더불어 가장 중요한 것중의 하나로서 필요한 정보를 광신호 매체에 적절히 분배하는 기능이다. 디지털 신호처리 및 컴퓨터 시스템은 게이트, 스위치, 메모리 부품들을 복잡한 배선으로 연결한 구조를 갖고있다. 전자 시스템에서의 배선은 반도체 집적회로내에 전선, 동축선, 채널 등으로 구성되나, 광배선은 집적화된 광결합기나 광섬유 결합기 또는 마이크로 렌즈가 부착된 광도파로를 이용 한다.^[30] 또한 자유공간 광선을 이용 하는것도 한 방법이다. 전자범으로는 이 방법을 수행할 수 없다. 왜냐하면 이 방법을 적용하기 위해서는 우선 전자범이 진공상태내

에 있어야 하고 간섭없이 두 전자빔이 교차할 수 없기 때문이다. 자유공간 광배선을 위해 필요한 재래식 광부품 들로서 거울, 렌즈, 프리즘 등이 사용된다. 이러한 부품 으로서 두개의 평면 사이에 연결되는 배선패턴(즉, shift, fan-in, fan-out, projection, shuffle 등)을 구성할 수 있다. 만일 두개의 평면 사이에 임의의 배선패턴을 구성 하려고 한다면 매우 복잡하고 제작하기 어려운 상용 광부품을 설계 해야한다. 그러나 CGH(computer-generated hologram) 기술을 사용하면 각각 다른 공간 주파수를 갖는 많은 phase grating 조각을 만들어 고밀도의 광배선 패턴이 가능하다.^[31,32] 따라서 홀로그램의 각 지점에서 grating 공간 주파수를 적절히 선택하여 임의의 배선패턴을 생성할 수 있다. 이 외에 배선패턴이 필요에 따라 재구성될 수 있는 다이내믹 홀로그래픽 배선 방법이 있다.^[33] 이 방법은 광굴절 재료를 이용한 four-wave mixing과 같은 광비선형 특성을 이용한다. 즉, 두개의 파형이 서로 간섭을 일으켜 grating을 생성하여 또다른 파형을 이 grating에 입사 시키면 반사가 일어난다. 이때 두 파형사이의 각도에 의해 grating의 공간 주파수가 결정되고 이것은 또한 반사파의 반사각도를 결정한다.

기존 전자 집적회로(microelectronics) 내에서 전자배선 대신 광배선을 대체하는 연구가 활발히 진행되어 왔다.^[34,35] 컴퓨터와 컴퓨터간의 통신(특히, local area networks)에서 광섬유를 사용하여 성공을 거둔후, 프로세서-프로세서, 백플레인-백플레인, 보드-보드, 칩-칩간의 통신에서도 광섬유를 사용 하려는 시도가 자연스럽게 생겨났다. 그러나, 광섬유 외에 자유공간 배선방식을 이용한 칩-칩 또는 칩 내부의 배선 연구도 진행중에 있다. 최근 대규모 집적회로(VLSI)나 병렬처리 아키텍처 등 초고속화, 고밀도화를 지향하는 노력에도 불구하고 칩 면적의 상당부분을 차지하는 배선문제 때문에 큰 장애를 겪고 있다. 실제로 게이트 에서의 시간지연 보다 배선에 기인한 시간지연이 더 길기 때문에 이것을 줄이기 위해 배선길이를 적정화 할 필요가 있다. 광배선 방법은 이러한 문제를 해결할 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 광배선 방식은 광선 간의 간섭현상이 없고 자유공간 방식인 경우 3차원 배열도 가능하기 때문에 집적도를 향상 시킬 수 있고 주위의 캐패시턴스와 인덕턴스에 영향을 받지 않으므로 시간지연, 대역폭, 전력 등에서 전자배선 방식에 비해 우수한 특성을 갖고

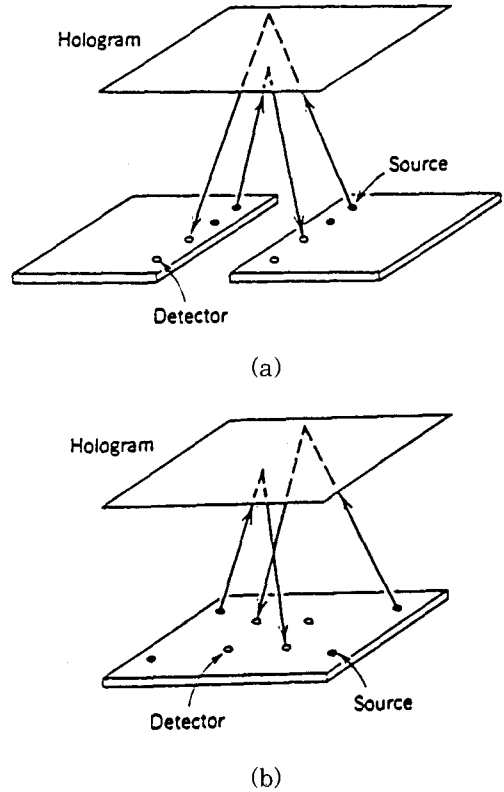


그림 8. 홀로그램을 이용한 광배선 구성도 (a) 칩과 칩간의 배선 (b) 칩 내부의 배선

있다. 광 배선방식은 그림8에서와 같이 전기신호를 광신호로 변환하는 광원과 광신호를 전기신호로 변환하는 광수신기, 그리고 routing 소자(반사 홀로그램)를 사용하여 광원에서 나온 광선을 보내고자 하는 광수신기 쪽으로 반사시켜 광선을 연결한다. 이러한 구성은 칩과 칩간의 연결 뿐만 아니라 칩 내부의 배선에도 적용할 수 있다. 더 나아가 다이내믹 홀로그래픽 광부품으로 소거/재구성이 가능한 새로운 배선방법도 활발히 연구중에 있다. 결국 광배선은 현재의 전자 집적회로에서 매우 중요한 자리를 차지할 것은 자명한 일이다.

3. 광컴퓨팅

디지털 광컴퓨팅 개념은 기존 디지털 전자 컴퓨터의 므방에서 부터 시작한다. 전자식 게이트, 스위치 및 메모리 부품은 그대로 광부품으로 교체될 수 있다. 또한 집적회로내의 전기적 배선은 집적광학의 광

도파로, 전기선은 광섬유, 전기적 비트인 '1' 과 '0' 는 광의 세기에 따라 '밝음' 과 '어두움'으로 각각 대치 될 수 있다. 디지털 광컴퓨터의 아키텍처는 디지털 전자컴퓨터의 형태를 그대로 모방한다. 이와 같이 직접적인 모방이 가능함에도 불구하고 정교한 기술이 요구되는 현재의 광소자의 크기, 속도, 스위칭 에너지, 출력 등이 아직 전자소자에 비해 월등히 모자라는 특성을 나타내는 실정이다. 소규모의 집적 회로에서 스위치의 속도가 매우 빠른소자가 가능 하더라도 스위칭 에너지 와 전력손실이 엄청나게 크다. 그러나 이러한 문제는 원천적인 것이 아니라 기술적인 것이므로 기술개발에 따라 극복될 수 있을것이다.

기존 전자회로에서 전자를 실어 전달하기 위한 통로로서 전선, 마이크로스트립 배선, 평면전도채널 등이 필요 하지만 광자는 이러한 전기적인 통로가 필요 없고, 오히려 앞질의 광배선 부분에서 언급한 바와같이, 3차원의 입체적인 광배선(global optical interconnection) 방식을 적용할 수 있다. 이 방식은 두개의 평면 사이에 홀로그램을 사용하여 3차원의 자유공간 광연결망을 구성 하는것이다. 예를들어, 입력평면에 있는 10^4 개의 점들의 각점은 출력면의 10^4 개의 모든점과 연결이 가능할 뿐만 아니라 출력면의 10^4 개의 점 중에서 임의의 100개의 점을 선택하여 연결할 수도 있다. 이러한 입체적 배선방법의 배선용량은 전자회로에서 가능한 것 보다도 훨씬 능가 한다. 그림9는 디지털 광 컴퓨팅 시스템을 가상적으로 나타낸 것이다. 2차원으로 배열된 N개(예를들어, $N=10^6$)의 광 게이트 어레이는 홀로그램으로 연결되어 있으며 각각의 게이트들은 소수 또는 다수의 다른 게이트에 연결된다. 이러한 연결은 국부적일 수 있고 총체적일 수도 있다. 이때, 배선망의 홀로그램을 변경함으로써 시스템을 재구성(programed) 할 수 있다. 이러한 유형의 병렬 아키텍처는 기존 VLSI에서 사용되는 전형적인 아키텍처(보통 bus line수에 제한됨)하고는 전혀 다르며, 따라서 광컴퓨터에서 사용되는

병렬 구성도는 전자의 어레이 프로세서에서 가능한 것 보다도 훨씬 뛰어 나다고 할 수 있다.^[36] 더우기 광프로세서의 우수한 병렬성이다 초고속의 스위칭 속도가 결합된다면 그 계산능력은 엄청난 위력을 발휘 할 것으로 예상된다. 게이트의 동작형태가 병렬이므로 데이터 처리량은 게이트 수와 스위칭 속도의 곱으로 표시된다. 가령, 10^6 개의 게이트가 0.1ns의 스위칭 속도로 동작 한다면 이 시스템은 초당 10^{16} 비트의 동작을 수행할 수 있게된다. 이러한 수행능력은 인간의 두뇌와 거의 비슷하며 현재 가장 빠른 전자컴퓨터 보다 훨씬 뛰어나다고 할 수 있겠다. 그러나 이러한 엄청난 수행능력의 이면에는 상당한 기술적 난제들이 아직 남아있다. 즉, 충분히 낮은 스위칭 에너지와 전력손실에서 동작하는 게이트가 가능해야 하고 고속으로 동작하는 게이트들을 초고밀도 어레이로 실현해야 가능한 것이다. 만일 이러한 기술이 개발되면 디지털 영상처리 및 인공지능과 같은 병렬처리 시스템에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.^[37]

마지막으로 애널로그 광 프로세싱에 관하여 간단히 살펴 보기로 하자.^[38,39] 앞에서 기술된 바와같이, 입체적 광배선 방식은 스위치 및 게이트의 대규모 어레이가 개발될때 까지는 디지털 컴퓨팅에 당장 응용하기는 힘들것으로 보인다. 그러나 그 이전에 응용 가능한 기술로서 애널로그 광 프로세싱을 생각할 수 있다. 현재 가능한 애널로그 광프로세싱의 응용부분은 광대역 신호처리, 레이더 신호처리, 영상처리, 그리고 신경망에서의 인공 눈, 인공지능 및 연산기억 등이 있다. 애널로그 광 프로세서로서 할 수 있는 대부분의 수학 연산은 '덧셈' 과 '곱셈' 의 기본동작의 조합으로 이루어 지며 대규모 병렬처리 광 배선망으로 구성할 수 있다. 여기서 광배선 구성을 위한 routing 소자는 보통 렌즈와 같은 재래형 소자가 많이 사용되어 왔으나 점차 홀로그램 소자, 음향효과 광학소자(acousto-optic device) 등을 이용하는 추세에 있다. 필요한 수학연산을 위해 필요한 변수는 구성하고자 하는 'incoherent optical processor' 또는 'coherent optical processor' 에 따라 광학적 상태가 달라진다. 즉, 'incoherent optical processor' 에서 계산변수로서 광의 세기 또는 광세기의 반사나 투과가 되며 이러한 수치는 반드시 실수값(real value)이 되어야 하고 음수가 될 수 없다. 한편, 'coherent optical processor'에서는 이러한 값들이 복소수(complex amplitude)가 될 수 있으며, 따라

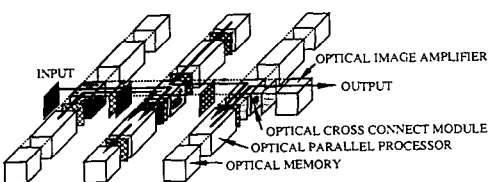


그림 9. 디지털 광컴퓨터의 구조도

V. 결론

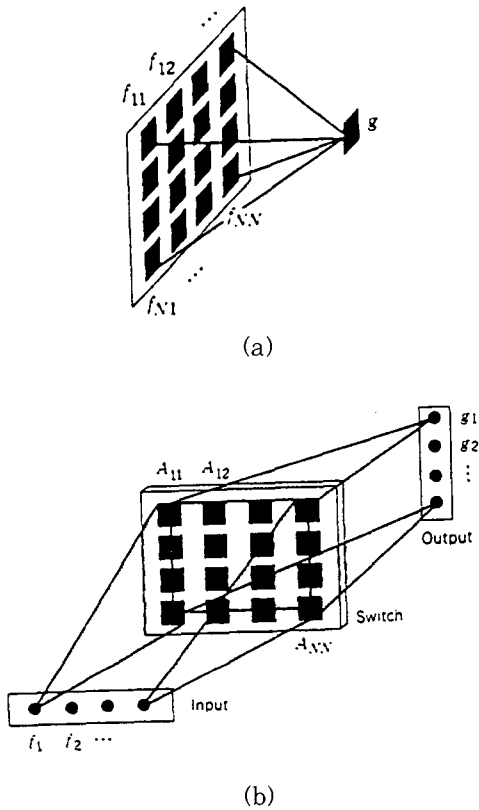


그림 10. 애널로그 광연산 구성도 (a) 광학 덧셈 연산 (b) 광학 매트릭스-벡터 곱셈 연산

서 이 시스템에서는 위상 변조기나 배선소자로서 홀로그래를 사용할 수 있다. 그러므로 '덧셈'연산은 그림10(a)에서와 같이 fan-in 배선구조로서 여러개의 점을 통과한 광선들이 한 점에 모여 더해 지도록 공간 배선망이 구성될때 가능하며, '곱셈' 연산은 변조기를 통하여 빛을 투과 하거나 반사시켜 출력빔이 입력빔과 변조기의 투과율 또는 반사율의 곱으로 배선망이 구성될때 가능하다. 그림10(b)는 fan-out구조와 fan-in 구조가 교차로 결합된 매트릭스의 곱셈을 위한 구성도를 나타내고 있다. 광 프로세서는 구조적으로 이차원 배열을 하고있기 때문에 데이터는 이차원 어레이 형태나 영상의 형태로 입력될 수 있다. 따라서, 이러한 특성으로 말미암아 배선망의 구조에서 응용할 수 있는 선택의 범위가 상당히 넓어질 뿐만 아니라, 여러가지 다양하고 흥미있는 광신호처리 시스템을 구성할 수 있다.

광학기술은 소전력으로 초고속 스위칭을 가능하게 할 뿐만 아니라 고도의 병렬구성을 가능하게 하며 고도의 fan-in 과 fan-out을 구성할 수 있음을 보아왔다. 그러나 이러한 가능성은 광학 자체의 고유 특성이긴 하지만 이 특성을 충분히 보여주는 광소자의 구현이나 컴퓨팅 시스템 등에 활용 하기에는 아직은 다소 문제가 있다. 아직은 트랜지스터와 같은 소자에 견줄만한 광소자가 거의 없는 실정 이지만 광기술은 광배선이나 저장 등의 분야에서 월등한 장점을 가지고 있다. 광 저장기술은 광학연구 과정에서 많은 진전을 보아왔고 이제 컴퓨팅에서 아주 중요한 대용량 광 저장(mass optical storage) 기술을 기대할 때가 되었다. 재료기술이 점차 발전됨에 따라 소거를 할 수 있는 체적 홀로그래픽 메모리가 가능하게 되어 초고속으로 데이터를 처리할 수 있을 뿐만 아니라 연산 처리나 데이터 베이스 처리등의 여러가지 종류의 신호처리를 가능하게 할 것이다. 광배선 분야 에서도 현재는 스위칭 속도 보다도 데이터 흐름의 고밀도를 추구하는 대용량 광배선이 가능하다. 여기에 매우 빠른 스위칭 속도를 갖는 광소자가 개발되면 광배선의 용량이나 응용면에서 과연 획기적인 결과를 기대할 수 있을 것이다. 현재부터 한동안은 'smart pixels' 과 같은 광학/전자가 결합된 하이브리드 시스템이 개발될 전망이다. 이것은 어레이를 이루고 있는 각 pixel에서 프로세싱의 일부를 고도의 전자소자에게 일임 함으로써 현재의 광학기술의 장점과 전자기술의 장점을 최대한 이용하는 기술적 전략이라 볼 수 있다.

미래의 광신호처리 분야에서 특히 중요한 것은 재료의 개발이며 또한 SLM의 성능을 향상 시키는 것이다. 특히, 속도, 에너지 조건과 해상도등이 만족 되어야 하겠지만 가격 등의 문제도 해결해야 할 문제이다. 그 외에, 장기간 동안의 안정도(신뢰도), 손실, 파장의 의존성 등도 함께 해결 되어야 할 것이다. SLM 소자는 광배선 기능조절 및 정보의 입력에 필수적인 소자이다.

현재 디지털 전자 하드웨어 개발에는 막대한 투자가 있는 반면, 광회로나 광부품을 이러한 전자 시스템에 적용 하려는 노력은 상대적으로 아주 미미 하지만 꾸준히 지속되고 있는것은 사실이다. 재료기술의

제약이 있으나, 앞으로 20년 이내에 완전 광프로세서(all-optical processor)가 개발되어 상용화 될 전망이다. 그러나 당분간은 광 신호처리는 시스템 차원 보다는 소자 차원에서 보다 활발한 연구가 진행될 전망이다 이므로, 현재에는 광학적으로 대규모 용량의 데이터를 처리할 수 있는 상용화된 시스템을 기대 하기에 는 아직 이르다고 볼 수 있다.

參 考 文 獻

- [1] A.B.Porter, "On the Diffraction Theory of Microscope Vision", *Phil. Mag.*, vol. 11, pp.154, 1906.
- [2] C.E.K.Mees, *The Theory of the Photographic Process* (rev.ed.), The Macmillan Company, New York, 1954.
- [3] D.Casasent(ed.), *Optical Data Processing: Applications*, Springer-Verlag, New York, 1978.
- [4] P.Elias, D.S.Grey, and D.Z.Robinson, "Fourier Treatment of Optical Processes", *J. Opt. Soc. Am.*, vol.42, pp. 127, 1952.
- [5] P.Elias, "Optics and Communication Theory", *J. Opt. Soc. Am.*, vol.43, pp. 229, 1953.
- [6] E.L.O'Neill (ed.), *Communication and Information Theory Aspects of Modern Optics*, General Electric Co., Electronics Lab., Syracuse, N. Y., 1962.
- [7] E.A.Trabka and P.G.Roetling, "Image Transformation for Pattern Recognition Using Incoherent Illumination and Bipolar Aperture Masks", *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 54, pp.1242, 1964.
- [8] J.D.Armitage and A.W.Lohmann, "Character Recognition by Incoherent Spatial Filtering", *Appl. Opt.*, vol.4, pp.461, 1965.
- [9] L.J.Cutrona., et al., "On the Application of Coherent Optical Processing Techniques to Synthetic-aperture Radar", *Proc. IEEE*, vol.54, pp.1026, 1966.
- [10] A.B.Vander Lugt, "Signal Detection by Complex Spatial Filtering", *IEEE Trans. Infom. Theory*, vol.IT-10, pp.2, 1964.
- [11] L.M.Soroco, *Holography and Coherent Optics*, Plenum Press, New York, 1978.
- [12] H.J.Caulfield and L.Sun, *The Applications of Holography*, Wiley-Interscience, New York, 1970.
- [13] F.A.Hopf and G.I.Stegeman, "Applied Classical Electrodynamics, Vol.2: Nonlinear Optics", Wiley, New York, 1986.
- [14] J.A.Neff, R.A.Athale, and S.H.Lee, "Two-Dimensional Spatial Light Modulators: A Tutorial", *Proc. IEEE* 78, pp.826, 1990.
- [15] *Appl. Opt.*, 28, issue 22 on Spatial Light Modulators, 1989.
- [16] D.A.B.Miller, et al., "The Quantum Well Self-electrooptic Effect Device: Optoelectronic Bistability and Oscillation and Self-linearized Modulation", *IEEE QE-21*, pp.1462, 1985.
- [17] P.Gunter and J.-P.Huignard, *Photorefractive Materials and Their Applications I & II*, Springer-Verlag, vols. 61 and 62, 1988; see also *IEEE QE-25*, issue 3, pp. 312-647, 1989.
- [18] P.Yeh, et al., "Photorefractive Nonlinear Optics and Optical Computing", *Opt. Eng.*, vol.28, pp.328, 1989.
- [19] K.-I.Kitayama and F.Ito, "Optical Signal Processing using Photorefractive Effect", on a Special Issue of *Multidimensional Systems and Signal Processing, An International Journal*, vol.2, no.4, 1991.
- [20] H.M.Gibbs, G.Khitrova, and N. Peyghambarian(eds.), *Nonlinear Pho-*

- tonics, Springer-Verlag, New York, 1990.
- [21] D.S.Chemla and J.Zyss(eds.), *Nonlinear Optical Properties of Organic Molecules and Crystals*, vols. 1 and 2, Academic Press, Orlando, FL, 1987.
- [22] C.Flytzanis and J.L.Oudar(eds.), *Nonlinear Optics: Materials and Devices*, Springer-Verlag, Berlin, 1986.
- [23] H.M.Gibbs and N.Peyghambarian, "Nonlinear Etalons and Optical Computing", *SPIE Proc. Optical and Hybrid Computing*, pp.142-148, 1986.
- [24] 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.
- [25] S.W.Lee, T.M.Kim, K.U.Chu, S.Park, M.S.Jeong, and O'D.Kwon, "Symmetric Self-electro-optic-effect Device Array Grown by Metalorganic Vapor Phase Epitaxy using GaAs/Al_{0.04}Ga_{0.96}As Shallow Quantum Wells", *Appl. Phys. Lett.*, vol.62, no.11, pp. 1176-1178, 1993.
- [26] Y.W.Choi, O.K.Kwon, S.H.Lee, S. Shim, Y.H.Won, and E.H.Lee, "ESQW-Modulator and ESQW-SEED using Asymmetric Fabry Perot Structures", to be appeared on *Proc. OSA '93 Annual Meeting*, Toronto, 1993.
- [27] P.W.E.Smith, "Trends in Photonic Science and Technology: Implications for Photonic Switching", *Proc. International Topical Meeting on Photonic Switching*, Kobe, April 1990.
- [28] M.S.Goodman, et al., "Multiwavelength Technology, Fast Tunability and New Approaches to Switching", *Proc. International Topical Meeting on Photonic Switching*, Kobe, April 1990.
- [29] H.S.Hinton, F.B.McComick, T.J.Cloonan, F.A.P.Tooley, A.L.Lentine, and S.J.Hinterlong, "Photonic Switching Fabrics Based on S-SEED Arrays", *Proc. International Topical Meeting on Photonic Switching*, Kobe, April 1990.
- [30] J.E.Midwinter, "Digital Optics, Smart Interconnect or Optical Logic?", *Physics in Technology*, vol.119, part I, pp.101-108; part II, pp.153-165, May 1988.
- [31] W.J.Dallas, "Computer-Generated Holograms", *The Computer in Optical Research*, Springer-Verlag, pp.291-366, New York, 1980.
- [32] W.-H.Lee, "Computer-Generated Holograms: Techniques and Applications", *Progress in Optics*, vol.16, pp.119-232, North-Holland, Amsterdam, 1978.
- [33] A.A.Sawchuk and B.K.Jenkins, "Dynamic Optical Interconnections for Parallel Processors", *SPIE Proc.*, vol. 625, pp.143-153, 1986.
- [34] A.Husain, "Optical Interconnect of Digital Integrated Circuits and Systems", *SPIE Proc.*, vol.466, pp.10-20, 1984.
- [35] J.W.Goodman, "Optical Interconnections in Microelectronics", *SPIE Proc.*, vol.456, pp.72-85, 1984.
- [36] H.J.Caulfield, "Parallel N4 Weighted Optical Interconnections", *Appl. Opt.* 26, pp.4039, 1987.
- [37] Y.S.Abumostafa and D.Psaltis, "Optical Neural Computers", *Scientific American*, vol.256, no.3, pp.88-95, 1987.
- [38] D.Casasent, "Acoustooptic Linear Algebra Processors: Architectures, Algorithm, and Applications", *Proceedings of IEEE*, vol.72, pp.831-849, 1984.
- [39] W.T.Rhodes and P.S.Guilfoyle, "Acoustooptic Algebraic Processing Architectures", *Proceedings of IEEE*, vol.72, pp.820-830, 1984. ⊕

筆者紹介



元 容 俠

1957年 3月 6日生

1978年 2月 울산공과대학 전자공학과 (학사)

1981年 2月 서울대학교 전자공학과 (석사)

1990年 8月 Cornell Univ. 전기공학과 (박사)

1986年 1月 ~ 1990年 10月 Cornell Univ. Research Assistant.

1981年 12月 ~ 1985年 12月 한국전자통신연구소 광통신연구실.

1990年 10月 ~ 1992年 7月 한국전자통신연구소 기초기술연구부.

1992年 7月 ~ 현재 한국전자통신연구소 교환기술연구단 책임연구원,
광교환연구실, 실장.주관심 분야 : Photonic Switching, Nonlinear Optical Devices, Quantum Well
Structures, Optical Interconnection, Optical Computing.