

## THz 광결정 수동소자

한 해 옥

포항공과대학교 전자전기공학과 나노테라 포토닉스 연구실

### I. 서 론

테라헤르츠 포토닉스(THz photonics)는 현대 광학에서도 가장 최근에 연구가 시작된 분야로서 테라헤르츠(Terahertz, 1 THz=10<sup>12</sup> Hz) 영역의 빛은 일반적으로 0.1~10 THz 정도의 주파수를 가진 전자기파를 말하며 이는 파장으로는 30~3000  $\mu$ m, 광자(photon) 에너지로는 0.4~40 meV에 해당하는 영역이다. 이러한 정의는 경우에 따라 바뀌어질 수 있음은 물론이며 기존의 밀리미터파와 원적외선 영역과도 일부 겹치게 된다. 따라서 이러한 THz파는 광학에서 우리가 흔히 말하는 빛(photon)과 기존의 전자파 영역 사이의 중간에 위치함을 알 수 있고, 특히 물질과의 상호작용을 고려할 때 전통적인 관점에서의 빛과 전자기파의 성질을 모두 가지고 있기 때문에 순수과학적인 관점에서 매우 흥미로운 연구 대상이며 기술적인 면에서도 그 중요성이 나날이 증대되고 있다.

THz파의 실질적인 응용을 위해서는 THz 대역의 광원 개발과 함께 수동소자의 개발이 필수적이다. 그러나 그 동안 THz 대역의 수동소자에 대해서는 THz 광원에 비하여 연구가 활발하게 이루어지지 못한 것이 사실이다. 수동소자들은 THz 신호를 이용한 회로를 구성하게 되고, THz 신호를 전달하기 위한 역할을 한다. 특히 THz 신호를 이용한 회로를 집적화하는데 실질적으로 매우 중요한 역할을 한다. 따라서 기본적인 수동소자의 연구가 THz 신호의 광원 개발과 함께 진행되어야 한다. 이러한 수동 소자에는 도파로,

스위치, 필터, 공진기 등이 있다. 특히 공진기는 효율적인 THz 광원 개발에 직접 응용이 가능하여 앞으로 THz 광원 개발에 중요한 역할을 할 것으로 전망된다.

최근의 THz 수동소자 연구에 있어서 가장 주목을 끌고 있는 것은 광결정(photonic crystal)을 이용한 THz 수동소자 연구이다. 단지, 기존의 방법과 다른 새로운 접근방법이라는 것 이외에도 실제 응용 가능성이 매우 높고, 또한 기존의 이론으로는 불가능한 새로운 기능을 가진 THz 소자의 제작이 가능하다는 점에서 앞으로 집중적으로 연구투자가 이루어질 것으로 전망된다. 광결정(photonic crystal)은 Yablonovitch가 1987년에 제안한 이후로 그 특성이나 응용 분야에 대해서 전 세계의 여러 대학과 연구소들에 의해 활발하게 연구가 진행되어오고 있다. 광결정이란 유전율이 공간상에 주기적으로 변화하는 구조물을 말한다. 예를 들면 현재 광통신 소자에 이용되고 있는 DFB/DBR 레이저는 일차원 광결정을 이용한 광소자이다. 광결정의 특성은 주기적으로 전자가 배열되어 있는 반도체와 같은 결정과 그 특성이 유사하다. 즉 결정 내에서 주기적으로 배열되어 있는 원자 때문에 전자가 밴드갭을 갖는 것과 같이 주기적으로 변화하는 유전율에 의해 광자(photon)가 밴드갭을 갖는 것이다. 따라서 반도체에 불순물을 넣어서 특성을 조절하듯이 광결정 또한 주기적인 구조에 결함을 인위적으로 넣어서 광자의 흡수와 방출과 같은 여러 가지 광특성을 조절할 수 있다. 결정의 결함(defect)을 이용하여 만들 수 있는 광결정을 이용한 소자에는 도파로, 필터, 스위치, 공진기 등

이 있다. 이러한 광결정을 이용한 소자의 장점은 고집적도의 광결정 집적회로를 만들 수 있다는 점이다.

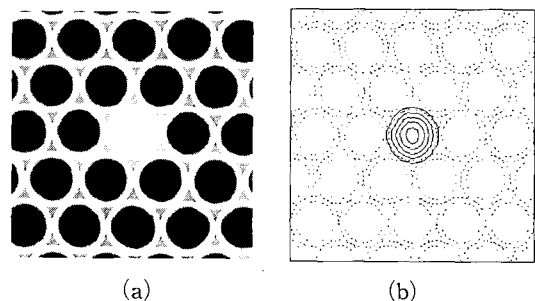
최근에 많은 연구가 이루어지고 있는 광통신 대역(1.3~1.6  $\mu\text{m}$ )에서의 광결정에 비하여 THz 대역의 광결정에 대한 연구는 아직 시작 단계에 있다. 그렇지만 THz 대역에서 광결정은 다른 대역에 비하여 여러 가지 장점을 가지고 있어 그 응용 가능성이 매우 크다고 할 수 있다. 우선 THz 대역이 갖는 장점은 광결정의 주기가 대략 100  $\mu\text{m}$  정도로서 현재의 반도체 공정기술로도 제작하기에 적당하다는 것이다. 즉, 광통신 대역에서 광결정의 크기가 작아서 제작하기 힘들고, 마이크로파 대역에서 제작된 광결정은 전체 크기가 너무 커서 사용하기에 현실적인 문제가 있지만, 두 대역 중간에 있는 THz 대역은 광결정의 주기가 너무 크지도 작지도 않아서 현재의 반도체 공정 기술로도 제작하기 쉽고 전체 크기도 적당한 수준이 된다. 또한 광결정의 주기는 파장에 비례하여 결정되는 scaling 법칙이 성립하기 때문에 THz 대역의 광결정에 대한 연구결과는 다른 파장대역에서도 곧 바로 이용할 수 있게 된다. 본 논문에서는 광결정 기반 THz 수동소자에 대하여 포항공대 나노테라 포토닉스 연구실에서 최근 수 년간 수행되어 연구를 중심으로 기술하고자 한다.

## II. THz 광결정 섬유(THz Photonic Crystal Fiber)

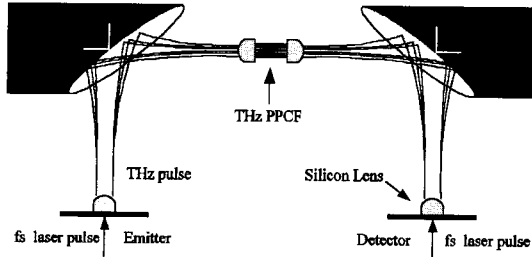
광결정 섬유는 광결정을 이용한 광섬유이다. 광결정 섬유는 광결정에 도입된 결함(defect)의 종류에 따라 두 가지 메커니즘을 가지고 신호를 속박하여 전달한다. 첫 번째 메커니즘은 기존 광섬유와 같이 코어(core)와 클래딩(cladding) 사이에서 일어나는 TIR(total internal reflection)를 이용하는 방법이다. 이 경우 광결정 섬유는 기존 광섬유와 달리 광결정을 클래딩으로 사

용하게 된다. 두 번째 메커니즘은 광밴드갭 효과를 이용하는 방법이다. 이 경우 지금까지의 도파로와는 완전히 다른 메커니즘으로 신호를 구속하게 된다. 이러한 메커니즘으로 인해 광결정 섬유는 기존 광섬유가 갖지 않는 새로운 특성을 갖는다. 그 특성들을 살펴보면, 특이한 분산 성질을 갖게 되고, 넓은 주파수 대역에서 단일 모드만 진행하게 한다. 그리고 선형과 비선형성을 모두 극대화하여 이용할 수 있고, 모드 면적이 넓어서 큰 출력을 전송 가능하게 한다. 또한 광밴드갭을 이용하면 유전율이 낮은 공기 혹은 진공을 통해 신호를 진행시킬 수 있어 손실이나 분산 특성을 향상시킬 수 있다. 이러한 특성으로 인해 광결정 섬유는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 현재 국외의 경우 여러 벤처회사가 만들어져 제품을 생산하고 있다.

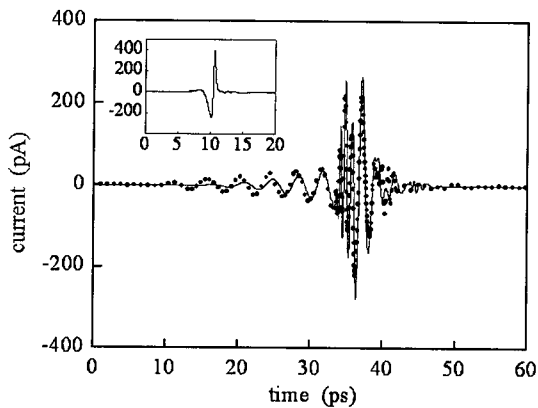
THz 대역에서 광결정 섬유를 이용한 실험은 최근에 포항공대에서 이루어졌으며 사용한 광결정 섬유는 플라스틱(HDPE)을 이용하여 제작되었다<sup>[1,2]</sup>. 플라스틱을 사용한 이유는 THz 대역에서 기존 광섬유의 재료인 실리카보다 손실이 훨씬 작기 때문이다. 플라스틱 광결정 섬유는 두께가 50  $\mu\text{m}$ 이고 지름이 500  $\mu\text{m}$ 인 원기둥을 삼각 격자 구조로 쌓고 열을 가하여 제작하였다. <그림 1(a)>는 제작된 광결정 섬유의 CCD사진이다. 광결정 섬유의 이론적인 계산은 full vector model을 이용한 평면파 확장 방법(plane wave expansion method)과 Hermite gaussian 방법을 사용하여 전산모사하였다. <그림 1(b)>는



<그림 1> (a) 제작된 광결정 섬유 사진, (b) 계산된 광결정 섬유의 기본 모드<sup>[1,2]</sup>



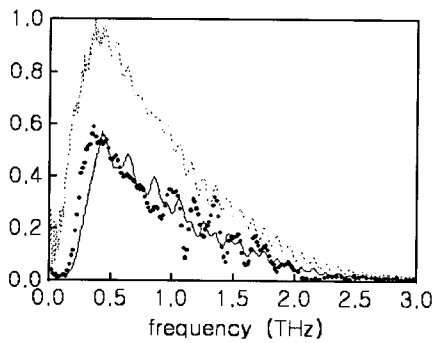
〈그림 2〉 THz 전송실험을 위한 실험장치의 개략도<sup>[2]</sup>



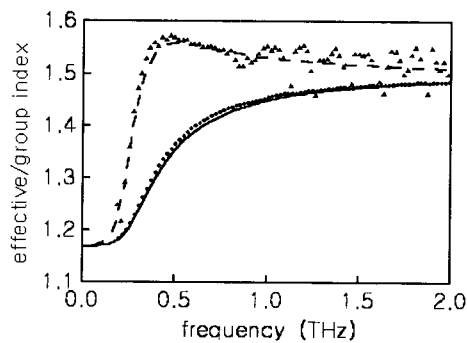
〈그림 3〉 측정된 신호(점선)와 계산된 신호(실선), 삽입된 그림은 입력신호<sup>[1,2]</sup>

1 THz에서 평면파 확장 방법(plane wave expansion method)을 사용하여 계산한 모드 분포이다.

THz 전송실험을 위한 실험장치의 개략도는



(a)



(b)

〈그림 4〉 (a) 입력 신호(짧은 점선), 측정된 신호(점선), 계산된 신호(실선)의 진폭 스펙트럼.  
(b) 위에 곡선 측정된 신호(삼각형)와 계산된 신호(선)의 군 굴절률이고 아래 곡선은 측정된 신호(점선)와 계산된 신호(실선)의 유효 굴절률이다.

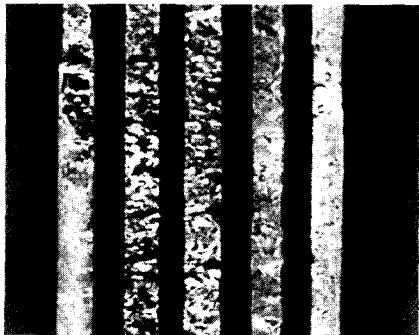
〈그림 2〉와 같다<sup>[2]</sup>. 우선 광정류(optical rectification)를 통해 얻은 0.8 ps 정도의 THz 펄스를 2 cm 길이의 광결정 섬유에 입사한 후, 광결정 섬유를 통과한 신호를 측정하였다. 〈그림 3〉은 광결정 섬유를 통과한 신호를 측정된 실험 결과이다. 〈그림 4(a)〉는 입력신호, 측정된 신호, 계산된 신호의 진폭 스펙트럼이고, 〈그림 4(b)〉는 측정된 신호와 계산된 신호로부터 얻은 유효 굴절률과 군 굴절률이다. 그림에서 알 수 있듯이 0.4 THz에서 군속도 분산이  $2 \text{ ps/THz} \cdot \text{cm}$ 이고 낮은 주파수 영역에서 positive chirp이 발생하는 것을 알 수 있다. 0.2 THz 이하에서 신호가 급격히 작아지는 이유는 모드의 면적이 넓어져 입출력단에서 결합효율이 급격히 감소하기 때문이다.

실험을 통하여 얻어진 광결정 섬유의 손실은  $0.5 \text{ cm}^{-1}$  이하로 작게 측정되었다. 이 실험의 경우 광결정 섬유의 길이가 짧아 정확한 손실 측정이 불가능하였으나 HDPE가 가진 물질 손실이 매우 작으므로 실제 광결정 섬유의 손실은 위의 측정치 보다 훨씬 작을 것으로 판단된다. 이러한 THz 플라스틱 광결정 섬유는 기존의 어떠한 유전체 도파로 보다도 손실이 작을 뿐만 아니라 기존의 광통신에서 사용되던 광섬유와 같이, 앞으로 개발될 THz 소자나 시스템을 위한 기계적으로 유연한 연결 도파로로서의 응용 가능성이 매우 높다고 하겠다.

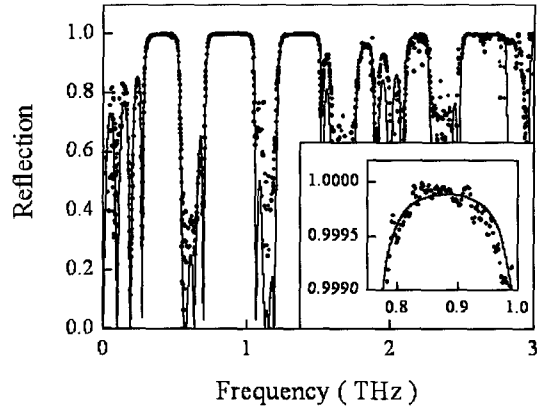
### III. THz 광결정 공기 도파로

위에서 기술된 THz 광결정 섬유에 전송손실은 기본적으로 코어에 사용된 물질이 가지는 흡수율에 의해서 결정되며, 따라서 소자 혹은 시스템간의 근거리 연결 도파로로서 적합하다고 할 수 있다. THz파의 전송거리를 더 길게 하기 위해서는 코어로 사용되는 결합물질의 흡수율이 더욱 작아져야 하며, 이러한 목적에 가장 부합되는 것은 공기 혹은 진공으로 된 결합일 것이다. 이러한 공기 도파로의 개념을 실험적으로 확인하기 위하여 우선 제작하기 쉬운 1차원 광결정을 제작하였다. <그림 5>는 Si를 이용하여 제작한 1차원 광결정의 사진이며 밴드갭 중앙이 1THz 근방에 위치하도록 설계하여 77 μm Si층을 76 μm 공기층을 반복하여 4개의 주기를 갖도록 제작하였다. <그림 6>은 측정된 광결정 거울의 반사율을 보여주고 있다. 이때 반사율은 밴드갭에 중앙에서 0.9998 이상이 됨을 알 수 있다. 제작된 DBR (distributed Bragg reflector)이 단지 4개의 주기만 가짐에도 불구하고 이렇게 높은 반사율을 얻을 수 있었던 것은 첫째, 공기와 Si의 굴절율의 차이가 2.5 이상으로 매우 높고, 둘째, CMP (chemical mechanical polishing)을 이용하여 Si의 두께가 1 μm 정도의 오차를 가지도록 정밀하게 조절되었기 때문이다.

1차원 광결정 공기 도파로는 위에서 제작된 두 개의 1차원 광결정 사이에 390 μm 공기층을 결

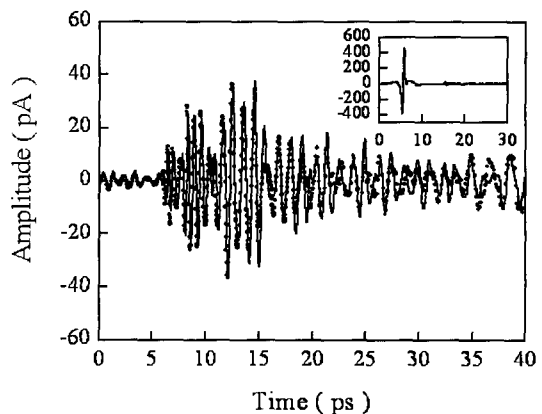


<그림 5> 제작된 THz DBR의 가장자리 단면 사진

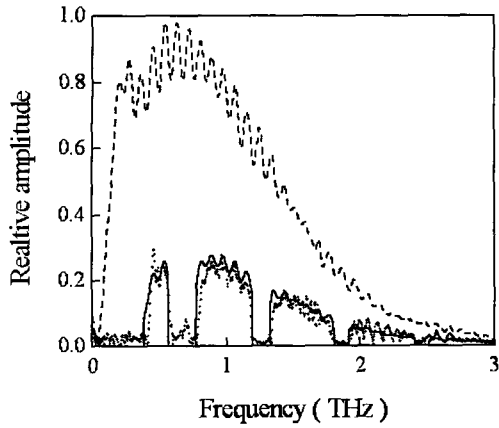


<그림 6> 측정된 반사율과 계산된 반사율(실선)

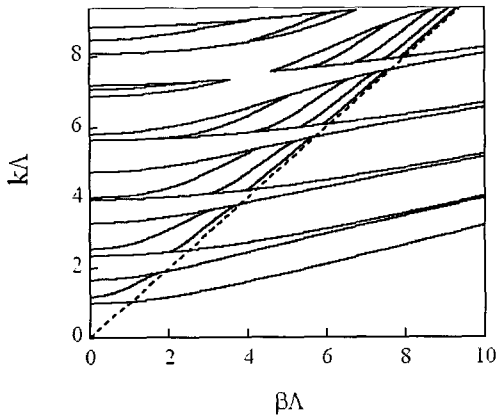
함으로 삽입하여 제작하였다. <그림 7>은 1차원 광결정 도파로에 THz 신호를 입사하여 도파로를 통과한 후의 신호를 측정된 값을 나타낸 것이다. <그림 8>은 <그림 7>에서 얻은 실험치로부터 계산된 주파수 스펙트럼이며 <그림 9>에 나타낸 밴드구조와 비교하면 밴드갭 효과를 명확히 알 수 있다. 즉, 광결정 도파로를 통과하여 측정된 신호의 통과 스펙트럼의 위치가 밴드구조에 나와 있는 결합 모드의 위치와 정확히 일치함을 알 수 있다. 이 광결정 도파로의 결합이 되는 공기층에 신호가 구속되므로 입력단과 출력단에서의 결합 손실을 제외하면 광결정이 가진 높은 반사율로 인하여 그 밖의 손실이 워낙 작으므로 도파로의 순수한 전송손실은 거의 없게 된다.



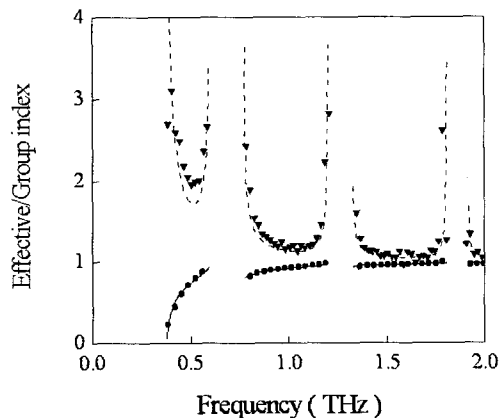
<그림 7> 측정된 THz 신호(점선)와 계산된 신호(실선), 삽입된 그림은 입력신호



〈그림 8〉 입력 신호(짧은 점선), 측정 신호(점선), 계산된 신호(실선)의 진폭 스펙트럼



〈그림 9〉 공기를 결함으로 가지는 1차원 광결정 도파로의 밴드구조



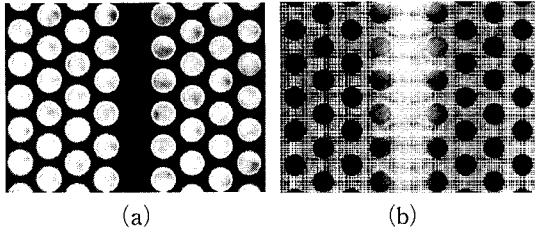
〈그림 10〉 측정된 신호(삼각형)와 계산된 신호(점선)의 군 굴절률이고 아래 곡선은 측정된 신호(원)와 계산된 신호(실선)의 유효 굴절률

〈그림 10〉은 1차원 광결정 도파로의 유효굴절률(effective index)와 그룹 굴절률(group index)에 대한 실험치와 계산치를 보여주고 있다. 밴드갭 중앙에서 분산이 없고 밴드갭 끝에서 분산이 매우 커지는 것을 알 수 있다. 따라서 주파수가 밴드갭 중앙에 위치하는 신호를 보내는 경우 분산이 없고 손실도 없는 도파로가 된다. 앞으로 이러한 광결정 공기 도파로는 플라스틱 계층의 물질을 이용하여 제작할 경우 근거리용 저손실 THz 도파로로서 매우 유망하리라고 전망된다.

#### IV. 집적형 THz 광결정 소자

집적화된 THz 회로를 위해서는 앞서 기술된 형태와는 좀 다른 형태의 광결정 소자가 사용되어야 하며 기능적인 면만을 고려할 때는 일반적으로 2차원 혹은 3차원 광결정 구조가 바람직하다고 할 수 있다. 광통신 대역과 마찬가지로 현재 THz 대역에서 제작된 3차원 광결정의 예는 아직까지는 매우 제한적이다. 그 중의 한 예로는 최근 Wanke 그룹에서 제작된 THz 대역의 wood pile 3차원 광결정을 들 수 있다<sup>[3]</sup>. 사용된 재료는  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 이며 주기는  $150 \mu\text{m}$ 로서 밴드갭 중앙이 2THz에 위치함을 투과율을 측정 실험을 통하여 확인한 바 있다. THz 광결정의 주기가 적외선 광결정에 비하여 100배 이상 크기 때문에 상대적으로 제작이 용이한 점은 있으나 실질적으로 응용되기에는 아직 많은 문제가 있는 것이 사실이다.

제작의 수월성과 기능성을 고려할 때 현재 가장 많은 주목을 받고 있는 구조는 2차원 광결정 슬랩(slab) 도파로라고 할 수 있다. 광결정 슬랩 도파로는 광밴드갭 효과를 이용하므로 전체적인 크기와 도파 손실을 매우 작게 설계할 수 있기 때문에 급격한 격임을 가진 도파로와 같은 구조도 제작할 수 있으며 광스위치, 필터, 공진기 등의 여러 가지 수동소자의 제작에도 응용될 수 있는 중요한 소자이다. 이러한 이유로 THz 대역의 광결정 슬랩 도파로에 대한 연구도 매우 중요하다 하겠다.



〈그림 11〉 (a) 제작된 Si 광결정 슬랩 도파로,  
(b) 3D FDTD로 계산된 순간 전계

〈그림 11(a)〉는 ICP(Inductively Coupled Plasma) 공정을 이용한 건식 식각과정을 거쳐서 제작된 Si 광결정 도파로의 사진이다. 주기는  $300\ \mu\text{m}$ 이고 공기구멍의 지름은  $180\ \mu\text{m}$ 이며, 광결정 도파로의 두께는  $180\ \mu\text{m}$ 이다. 이는  $0.3\ \text{THz}$ 에서 밴드갭 중앙이 되도록 설계된 것이며 단선결함(single line defect)을 첨가하여 제작하였다. 〈그림 11(b)〉는 설계된 구조를 3D FDTD를 이용하여 전산모사한 그림이며, 실험을 통한 확인을 위해서 현재 제작된 구조에 대한 THz 투과 실험이 진행되고 있다.

최근에 일본의 KARC에서는 광결정을 이용한 공진기를 제작하여 THz 광원을 개발을 위한 실험을 수행하였다<sup>[4]</sup>. 광결정 안에 광전도 안테나를 삽입하여 THz를 발생시키면, 삽입된 안테나에서 발생한 THz 신호는 광결정 내부의 결합모드 혹은 공진기 모드에 해당하는 주파수 성분이 크게 향상되고 결합 모드 이외의 THz 신호는 광결정에 의해 억제되는 것을 이론적으로 예측할 수 있다. 이러한 경우 광결정 공진기 효과에 의해 강화된 결합 모드는 안테나의 이득과 코히어런스를 높일 수 있게 되며, 따라서 이와 같은 광결정 공진기는 앞으로 THz 광원 개발에도 큰 역할을 하게 될 것으로 전망된다.

## V. THz 광결정 소자의 설계, 측정 및 제작

앞에서 언급한 바와 같이 광결정 소자는 그 제작이 어려워 현재 실험적인 자료가 적은 반면에 이미 잘 알려진 FDTD, FEM, BPM 등의 전사

모사 방법을 이용한 이론적인 자료는 상대적으로 풍부하다고 할 수 있다. 그러나 전산모사를 통한 설계의 경우도 앞으로 해결해야 할 많은 문제점을 안고 있다. 현재의 전산 모사는 주로 작은 크기의 단위소자에 대한 모사를 중심으로 이루어지고 있는데 그 이유는 여러 단위소자가 결합된 복합적인 기능을 가진 광결정 소자 혹은 광결정 회로의 경우 필요한 전산자원이 비현실적으로 커지기 때문이다. 이를 해결하기 위해서는 궁극적으로 좀 더 효율적인 알고리즘을 개발하는 동시에 컴퓨터 하드웨어 및 운용방식의 개선이 필수적이라고 할 수 있다.

THz 광결정 소자와 기존의 적외선 광결정 소자는 동일한 구조인 경우 굴절률과 흡수계수와 같은 물질상수가 다른 것만 제외하면 전산모사 측면에서는 동일하다고 할 수 있다. 그러나 측정 방식에는 근본적인 차이가 있다. 적외선 광결정 소자는 거의 대부분 주파수(파장) 영역에서 측정이 이루어지는 반면에 THz 광결정 소자는 시간 영역에서의 측정이 주류를 이루고 있다. 이는 측정에 사용되는 광원이 적외선과 THz 대역의 경우, 각각 cw와 pulse( $<1\text{ps}$ ) 형태이기 때문이다. THz 펄스를 이용하는 측정은 fs 레이저를 이용한 광전자 샘플링(optoelectronic sampling) 방식을 사용한다. 이는 시간 영역 분광(time domain spectroscopy, TDS) 측정 방식에 해당하는 것으로서 크기(amplitude)와 위상(phase)를 동시에 측정하는 장점이 있다. 따라서 신호의 크기만을 측정하는 적외선 광결정 측정 방식에 비해서 훨씬 더 정확한 소자 특성을 얻을 수 있게 된다.

사실 이러한 THz 광결정의 측정 방식은 현재 광결정의 전산모사 방법 가운데 가장 많이 사용되고 있는 FDTD 방법과 매우 유사하다고 볼 수 있다. 이는 현재의 전산모사가 대용량 계산에 대해서 가진 문제점을 THz TDS라는 실제 실험을 통한 “THz 아날로그 컴퓨팅(analog computing)”으로 보완 혹은 해결할 수 있다는 것을 의미한다고 할 수 있다. 예를 들어, 소자의 크기가 매우 크거나 급속으로 이루어져 있어서 전산모사에 어려움이 많은 광결정 소자의 경우 소자

의 기본적인 특성을 비교적 짧은 시간에 THz 아날로그 컴퓨팅으로 알아낼 수 있을 것이다.

광결정 소자의 제작은 동작 파장의 크기가 작아질수록 더욱 고난이도의 제작공정이 필요하게 된다. 적외선 광결정 주기는 보통  $0.3\mu\text{m}$  이하가 되며, 최근에 제안된 add/drop 필터<sup>[6]</sup>의 경우 특정 결합이 주기의 수 % (수 십 nm) 정도인데 이의 제작은 전자빔 리소그래피를 사용하더라도 쉽지 않은 정밀도에 해당한다. 반면에 THz 광결정 소자의 제작은 훨씬 수월하다고 할 수 있다. 현재의 반도체 공정기술은  $\mu\text{m}$ 급 구조의 제작은 비교적 쉽게 할 수 있기 때문에 전술한 add/drop 필터의 경우에도 THz 대역에서 제작이 가능함을 알 수 있으며, 나아가 THz 대역에서 얻은 측정 결과를 적외선 대역의 광결정 소자의 설계에도 활용할 수 있을 것으로 전망된다.

## VI. 결 론

광결정을 이용한 여러 가지 THz 수동소자를 제안하였다. THz 광결정 소자는 기존의 이론에 바탕을 둔 소자가 가지지 못한 여러 가지 장점을 가지고 있으며 이를 활용하게 되면 저손실 연결도파로와 THz 집적회로용 기본 소자의 제작이 가능함을 실험과 이론을 통하여 확인할 수 있었다.

이러한 THz 광결정 소자는 THz 포토닉스의 발전에 큰 기여를 함과 동시에 그 제작의 용이성과 측정의 정확성으로 적외선 영역의 광결정 소자의 설계에도 많은 기여를 할 수 있으리라 전망된다. THz 광결정 소자의 실질적인 응용을 위해서는 앞으로 제작 공정과 설계 이론의 개선을 위한 좀 더 체계적인 연구가 꾸준히 수행되어야 할 것이다.

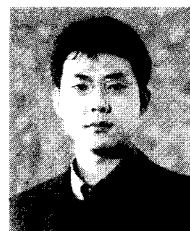
## 참 고 문 헌

- [1] H. Han, H. Park, M Cho, and J. Kim, "THz pulse propagation in a plastic

photonic crystal fiber," Appl. Phys. Lett., vol. 78, pp.2634-2636, Apr. 2002

- [2] H. Park, M. Cho, J. Kim and H. Han, "THz pulse transmission in plastic photonic crystal fibers," Phys. Med. Biol., vol. 47, pp.3765-3769 Nov. 2002
- [3] M. C. Wanke, O. Lehmann, K. Muller, Q. Wen, and Stuke, "Laser Rapid Prototyping of Photonic Band-Gap Microstructures," Science, vol. 275, pp. 1284-1286, Feb. 1997
- [4] M. Tani, P. Gu, K. Sakai, M. Suenaga, H. Kondo, H. Kitahara, and M. W. Takeda, EURESCO Conference Electromagnetic Crystal Structures, St Andrew, 2001
- [5] Shanhui Fan, Pierre R Villeneuve, and J. D. Joannopoulos, "Channel Drop Tunneling through Localized States," Phys. Rev. Lett., vol. 80, pp.960-963, Feb. 1998

## 저 자 소개



韓海旭

1986년 2월 서울대학교 전기공학과 학사, 1988년 2월 서울대학교 전기공학과 석사, 1995년 1월 미국 일리노이대 (어배나-샴페인) 전기공학과 박사, 1995년 1월~1997년 1월 : AT&T Bell Lab 연구원, 1997년 1월~현재 : 포항공과대학교 전자전기공학과 교수, 1998년 10월~2001년 1월 : THz 포토닉스 과기부창의연구단 단장, <주관심 분야 : THz 포토닉스, 나노 포토닉스, 광집적회로, 반도체 레이저>