

적외선 센서 기술

글 _ 김진상 || 한국과학기술연구원 박막재료연구센터
jskim@kist.re.kr

1. 서 론

우리는 TV 혹은 다른 영상 매체를 통하여 위성에서 촬영한 지표면 사진이나 야간에 미사일이 목표물을 폭격하는 장면, 구름사진 등을 자주 접하곤 한다. 이들 영상물은 모두 흑백 사진임을 관심 있는 분들은 알고 있을 것이다. 컬러 TV 시대임에도 불구하고 이들 위성사진은 왜 흑백으로만 제작되고 있을까? 이는 고성능 적외선 센서가 내장된 카메라로 목표물에서 방사하는 적외선 강도의 크고 적음을 시각적으로 나타낸 영상물이기 때문이다. 적외선은 대기 중을 투과할 때 가시광선에 비하여 감쇠가 적으며, 이를 감지하는 적외선 센서는 지표면의 미세한 온도 차이를 감지할 수 있기 때문에 조명이 없는 캄캄한 밤이나, 구름이 낀 날에도 지표면을 관측하는 것이 가능하다. 태양에서 방출되는 다양한 종류의 전자기파 중 지표면에 도달하는 가장 강력하고 많은 양을 가진 것이 0.8~1000 μm 파장에 해당하는 적외선이며 이는 인간의 눈으로 구분되어지지 않는다.

1800년대 초 영국의 윌리엄 허셸(William Herschel)경은 태양광의 분광 시험 중 적색부 보다 파장이 긴 부분의 빛이 존재하며, 이 파장의 빛이 인체에 온열 효과를 가져온다는 것을 발견하였다. 그 후 1890~1900년초 플랑크(N.Plank)에 의해 절대온도 0도 이상의 모든 물체에는 자신의 온도에 해당하는 에너지를 빛의 형태로 방출한다는 흑체 이론이 완성되었다. 즉, 실온(섭씨25도)의 물체는 10 μm 파장의 빛을, 금이 녹는 온도(섭씨 1064도)에서는 3 μm 파장의 적외선을 가장 강하게 발산 하고 있다. 암흑 속에서 실온의 물체를 인간이 구분 할 수 없는

것은 대부분 적외선을 방출하고 인간의 눈으로 구분이 가능한 가시광선의 양은 극히 적기 때문이다. 금이 녹는 온도에서는 3 μm 영역의 적외선을 가장 많이 방사하고 있지만 일부 가시광선도 수반되며 사람이 눈으로 인지하는 것은 이 영역의 빛이다. 그러나 피부로는 눈으로 감지하기 전에 이미 따스해짐을 느낄 수 있으며 이는 적외선의 온열 효과 때문이다.

일반적으로 파장이 0.8~3 μm 까지를 근적외선, 3~5 μm 까지를 중적외선, 8~14 μm 까지를 원적외선으로 분류하고 있다. Fig. 1은 대기 중에 입사되는 적외선의 파장에 따른 투과 특성을 보여준다. 대기 중을 투과하는 적외선은 대기 중의 산소, 오존, 이산화탄소, 수증기 등에 의해 일정파장의 빛은 흡수 되고 근적외선 영역의 일부 분, 3~5 μm 및 8~14 μm 영역의 파장만 투과하고 있다. 이 파장 대역을 대기창(atmospheric window)라고 부른다. 따라서 적외선을 감지하는 센서는 대기창에 해당하는 파장영역의 빛을 감지하도록 설계되어야 한다. 전투기를 향해 발사되는 열 추적 미사일은 전투기의 몸체 혹은 엔진으로부터 방출되는 적외선을 감지하여 추적하는 원리를 이용하고 있다. 이 외에도 적외선 센서는 인체의 미세한 온도분포 측정을 통한 암의 조기진단, 지표면의 온도 분포의 측정을 통한 자원탐사, 건물이나 구조물의 비파괴 검사, 각종 전자기기의 열분포 측정을 통한 신뢰도 평가 등에 널리 응용되어지고 있으며 점차 그 응용분야를 확대하고 있는 추세이다. 본 특집에서는 이러한 적외선 센서의 동작원리 및 종류에 대한 간략한 언급과 현재의 기술동향 및 향후의 발전방향에 대하여 살펴보고자 한다.

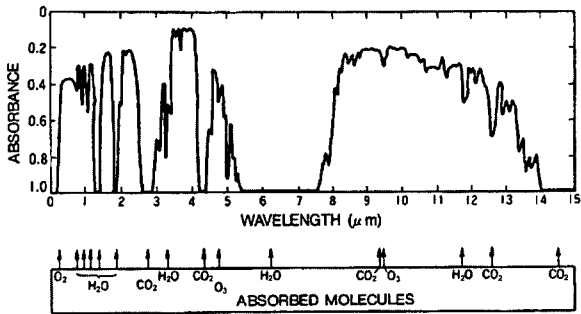


Fig. 1. 적외선의 파장에 따른 대기투과 특성.

2. 적외선 검출기의 분류

적외선 검출기는 크게 열 검출기(thermal detector)와 광 검출기(Photon detector)로 구분되어 질 수 있다. 적외선은 온열효과를 가져오기 때문에 열선이라고도 명명되어지고 있다. 현재 실생활에서 널리 사용되는 적외선 온열기, 가스렌지를 대체하는 적외선렌지 등은 적외선의 이러한 온열특성을 이용하는 것으로 적외선의 방사 및 투과율을 극대화하여 효율을 높이는 구조로 제작되어지고 있다. 열 검출기는 목표물로부터 입사되는 적외선에 의해 물질의 온도가 상승함으로써 유발되는 물성의 변화(전도도, 대전량 등)를 감지하는 원리를 이용하고 있다. 물체의 온도변화로부터 유발되는 저항의 변화를 감지하는 볼로미터(bolometer), 온도변화에 따른 전기적 극성의 변화를 감지하는 초전형(pyroelectric) 검출기 및 물질 양단의 온도차에 의해 발생하는 기전력을 감지하는 열전(thermoelectric) 검출기가 열 검출기로 분류된다. 열 검출기는 넓은 파장 대역에 걸쳐 균일한 감지능(detectivity)을 가지며(Fig. 2), 냉각을 필요치 않다는 장점이 있으나, 물질의 온도가 상승하거나 냉각하는데 걸리는 시간으로 인해 응답속도가 느리고, 감지능이 다소 낮다는 단점이 있다.

광 검출기는 반도체 물질로 제조되며 적외선이 입사되었을 때 반도체 물질내의 전자-정공의 여기로 유발되는 전류, 전압의 변화를 감지한다. 따라서 광 검출기는 반도체 물질의 에너지 밴드 갭에 해당하는 특정 파장대역에서 감지능이 최대가 되는 파장 선택성을 갖는다. 광 검

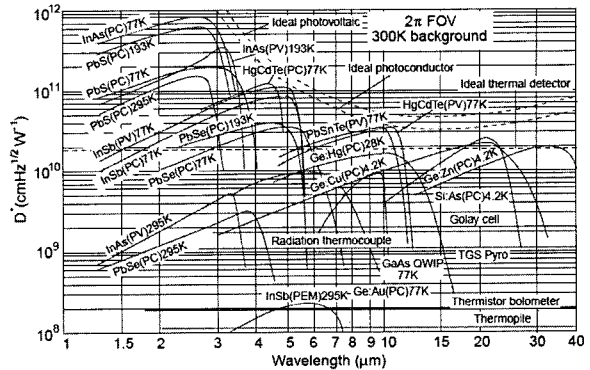


Fig. 2. 적외선 센서 재료의 작동온도 및 감지도 특성. (출처; Progress in Quantum Electronics 27 (2003) 59)

출기는 응답속도가 매우 빠르고 감지도 또한 우수하나 근적외선 파장 이외의 장파장 적외선을 감지하고자 할 때는 주변 온도에 의해 여기 되는 전자-정공 쌍의 형성을 억제하는 냉각장치를 필요로 한다. 원거리 관측이 필요한 첨단 군사장비, 미세한 온도변화를 감지하는 의료장비 등에서는 광 검출기가 주로 사용되고 있다. Fig. 2는 현재 제작되고 있는 각종 적외선 검출기의 동작온도 및 적외선 파장대역에서의 감지능(detectivity) 나타낸 것이다.

3. 열 검출기

3.1 볼로미터

볼로미터는 적외선 입사에 따른 물질의 저항 변화를 감지하는 것으로 전기저항이 온도의 상승에 의해 감소되는 NTC 서미스터(negative temperature coefficient thermistor), 온도상승에 의해 저항이 증가하는 PTC 서미스터(positive temperature coefficient thermistor)로 구분되어진다. 볼로미터는 온도 감지기, 발열체의 스위칭 용도로 이미 널리 사용되어왔다. 전술한 바와 같이 볼로미터는 냉각이 필요 없으므로 휴대용으로 적합하고 저가로 구현이 가능하지만 성능 면에서 광 검출기에 비해 떨어진다.

1980년대 초 미국 DARPA의 지원 아래 저가의 고성능 열 영상이미지를 얻고자 하는 요구가 제기된 후 MEMS 기술을 이용한 새로운 개념의 볼로미터 2차원

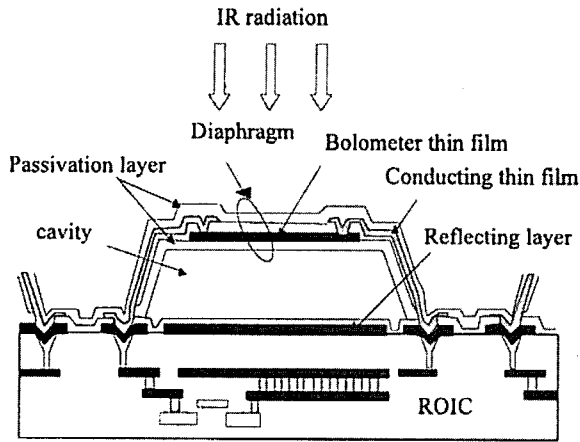


Fig. 3. 실리콘 판독회로 위에 제조된 마이크로 볼로미터의 구조 (출처: NEC Res. and Develop., Vol 44 (2003))

어레이를 제작하는 기술이 미국 Honeywell 사에서 제시되었다. 이들 기술의 핵심은 쉽게 가열되고 냉각될 수 있도록 열적고립 구조의 얇은 멤브레인 형태로 볼로미터를 제작하였다. 이렇게 함으로써 응답속도 및 감지능을 크게 개선하였으며 실리콘 판독회로 (read out circuit)와 멤브레인 구조의 볼로미터 2차원 어레이를 결합하여 실시간 영상을 가능하게 하였다. Fig. 3에 열적 고립구조를 갖는 대표적인 마이크로 볼로미터의 구조를 나타내었다. 먼저 각 화소로부터 신호를 읽어 들이는 역할을 하는 실리콘 판독회로를 제작하고 그 위에 희생층, 보호층 (passivation layer), 볼로미터 필름 및 보호층을 순차적으로 형성한 후 희생층을 제거함으로써 열적 고립구조를 만든다. Honeywell 사에서는 비냉각 적외선 소자의 열적 고립 구조에 대한 특허권을 소유하고 있으며 현재 미국의 Boeing, Raytheon, Lockheed Martin 사에서 화소의 숫자가 320x 240이며 온도분해능이 20mK에 이르는 비냉각 마이크로 볼로미터 열상시스템을 상용화하여 시판하고 있으나 제조방법 등에 관하여서는 기술 유출을 엄격히 제한하고 있다.

볼로미터의 저항체 재료로는 온도-저항 상수 (TCR; temperature coefficient of resistance)가 비교적 큰 SiGe, VO_x, 비정질 Si_{1-x}C_x:H 등을 들 수 있다. 실리콘 판독회로 위에 이차원 초점 배열면의 볼로미터를 제작하기 위해서는 저온 공정이 가능한 물질을 선택하여야 하며 이

러한 이유에서 현재 마이크로 볼로미터 2차원 어레이 제작에 사용되는 저항체 재료로는 VO_x가 대부분 사용되고 있다. VO_x는 온도에 따라 반도체 (저온) 및 금속(고온)상을 형성한다. VO_x는 산소의 조성 x에 따라 상전이 온도가 변화한다. VO₂의 경우 50~70°C에서 상전이가 일어나며 전이온도 근방의 큰 TCR 값을 이용하여 적외선 센서를 제작하고 있다. 그러나 VO_x의 경우 증착방법, 공정변수에 따라 화학 양론적 조성 및 그 물질 제어가 매우 까다로우며 재현성 확보 또한 매우 어려운 문제로 대두되고 있다.

현재 상용화된 마이크로 볼로미터의 감지능은 10⁸cmHz^{1/2}/W 근방이며 이 감지능을 10⁹cmHz^{1/2}/W 이상으로 개선하고자 하는 노력이 활발히 진행되고 있다. 이를 위하여 새로운 구조의 소자 개발에 대한 노력과 더불어 비정질 실리콘, 비정질 YBaCuO, 초전도체인 YBa₂Cu₃O_{6+x} 등 다양한 재료가 적용되고 있다. 특히 비정질 YBaCuO의 경우 온도 분해능이 80mK 이고 픽셀 간격이 40 μm인 320×240의 2차원 어레이가 제작 보고되어 그 가능성이 확인 되었다. TCR 값이 가장 큰 초전도체 YBa₂Cu₃O_{6+x}의 경우 공정온도가 700°C 이상으로 높아 실리콘 판독회로 위에 바로 증착이 어렵다는 문제점이 있다. 향후 저온공정 기법이 개발되면 볼로미터 영상시스템에서 이 재료는 널리 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

3.2 초전형 적외선 검출기

초전 (pyroelectric) 형 적외선 검출기는 강유전체(ferroelectric)의 큐리온도 부근에서 온도에 따른 자발분극의 변화량을 감지하는 원리를 이용하고 있다. 실생활에서 인체감지 기능용 자동문, 자동조명, 보안업체의 침입자 감시용으로 초전형 적외선 단소자는 이미 널리 사용되어 왔으며 근래에 들어서는 2차원 어레이를 이용한 실시간 열영상 시스템의 구현에 까지 이르게 되었다. 초전 열영상 시스템 제작에서 중요한 요소 기술로는 초전재료의 개발, 미세가공기술, 패키징 등을 들 수 있다. 초전형 열영상 시스템 제작 시 초전재료의 증착 및 미세가공은 실리콘 판독회로와 별도로 제작된 후 금속을 매개체로 하이

브리드 본딩하는 방법을 통상적으로 사용하고 있다. 즉, 마이크로 볼로미터의 경우 열적고립 구조로 제작됨으로 하이브리드 본딩이 불가능 하나 초전형 적외선 이미지 센서의 경우 독립적인 재료의 제조가 가능하다. 또한 초전형 적외선 센서의 경우 순간적인 자발분극의 변화량을 검출하여야 하므로 입사되는 적외선을 주기적으로 차단하는 초퍼등의 장치가 필요하며 이로 인해 일부 사용에 제약을 받는다.

초전형 적외선 센서에 요구되는 재료는 큰 초전계수와 동시에 낮은 유전상수 및 유전손실 값을 갖는 물질이다. 일반적으로 물질의 초전계수와 유전상수는 서로 비례적인 상관관계를 가져 위의 두 물성을 동시에 만족시키지는 않는다. 따라서 아예 유전상수 및 초전계수 모두가 큰 물질이나 유전상수 및 초전계수가 작은 물질들로 초전형 적외선 센서는 제작되어왔다. 대표적인 초전 센서재료는 납을 포함하는 페로브스카이트 구조를 갖는 물질이다. PT, PZT 등 큐리온도가 상온에 비하여 높은 물질은 상온 근방의 온도에서 센서 재료로 사용에 제약이 없으나 BST, PST, PMN 등의 경우 큐리온도가 상온 근방으로 분극을 유발하여 초전특성을 유지하기 위해 전장을 가해주어야 하거나 Ca 등의 첨가로 재료의 상전이 온도를 제어하여야 한다.

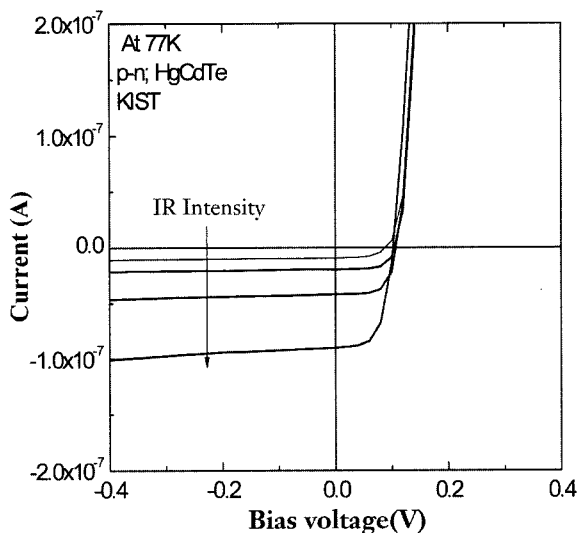


Fig. 4. HgCdTe n/p 다이오드에서 IR 입사강도에 따른 암전류 증가.

현재 가장 널리 사용되고 있는 초전 재료로는 BST($\text{Ba}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{TiO}_3$)를 들 수 있으며, 미국의 Raytheon 사에서는 이를 이용하여 온도 분해능이 평균 70mK에 이르는 320x 240 급의 이차원 어레이를 보고하고 있다. 초전형 센서의 경우 성능 면에서는 앞에서 언급한 마이크로 볼로미터에 비하여는 다소 떨어지지만 열영상 시스템의 내구성이 뛰어나고 제작 공정이 비교적 단순하며 가격측면에서 강점을 가진다. 열상 이미지를 향상시키기 위해서는 양질의 대면적 초전재료 제조공정 개발이 요구되고 있다. 초전형 적외선 센서의 경우에도 마이크로 볼로미터에서와 동일하게 열적 고립구조로 제작할 경우 그 성능은 크게 증가할 것으로 예상된다. 이를 위해서는 실리콘 판독회로의 손상이 가지 않는 저온에서 초전 재료를 제조할 수 있는 공정이 선행되어야 할 것이다.

3.3 열전 적외선 검출기

1821년 독일의 과학자 Seebeck은 물질 양단의 온도차에 의해 기전력이 유발되는 현상을 발견하였다. 이후 Peltier, Thomson은 기전력에 의해 물질의 온도가 올라가거나 내려가는 역 Seebeck 현상을 발표하였으며 이러한 현상을 통칭하여 열전(thermoelectric)현상이라 한다. 열전 적외선 센서는 열전재료에 입사되는 적외선에 의해 유발되는 기전력을 측정하는 원리를 이용하고 있다. 열전현상을 이용한 적외선 센서의 경우 외부인가 전압이 필요 없으며 신호의 잡음 또한 매우 작으나 출력 신호가 매우 작다는 단점으로 인하여 연구개발이 많이 이루어지지 않은 실정이다. 출력 신호를 크게 하기 위해서는 열전 재료 양단의 열전달을 억제하여 온도차를 크게 하여야 하며 구조적으로는 선형의 열전재료를 적층하는 것이다. 현재 상온 근방에서 Seebeck 상수($S=V/\Delta T$)가 큰 물질로는 Bi-Te, Sb-Te 계 화합물이며 이를 이용한 128x 128급의 이차원 열전 적외선 영상 시스템이 일부 보고되고 있다. 또한 Seebeck 계수가 비교적 큰 다결정 실리콘으로 열적 고립구조를 만들어 열전 영상 시스템을 제작하고자 하는 시도도 MEMS 등의 반도체 공정의 발달과 더불어 진행되고 있다.

4. 적외선 광 검출기

반도체 재료로 제조되는 적외선 광 검출기는 적외선 입사에 따른 전자, 정공의 변화를 감지하는 것으로 광 전류형 (Photo conductive) 및 광 전압형 (Photo voltaic)으로 구분되어진다. 반도체 재료에 에너지 밴드갭 보다 큰 에너지의 빛이 입사되면 가전도대에는 정공 전도대에는 전자가 여기 되며 이로부터 유발되는 전류의 증감을 감지하는 것이 광전류 형이다. 광전류 형 적외선 센서는 빛을 주기적으로 차단하는 초퍼가 반드시 필요하며 냉각을 필요로 하는 소자에 일정 전류가 계속 흐르고 있어야 함으로 자체 발열등의 문제점이 나타날 수 있다. 광 전압형은 반도체 재료로 p-n 접합 다이오드를 만들고 역방향 내지는 0 전압에서 적외선 입사에 따른 암전류 (dark current)의 증감을 감지한다. Fig. 4에 역방향에서 적외선 입사비의 강도에 따른 암전류의 증감을 나타내었다. 광 전압형의 경우 0 전압에서 구동되고 초퍼등의 부수적인 장치가 필요치 않음으로 현재 상용화 되었거나 연구 개발되는 2차원 적외선 영상 시스템은 모두 광 전압형으로 구현되고 있다.

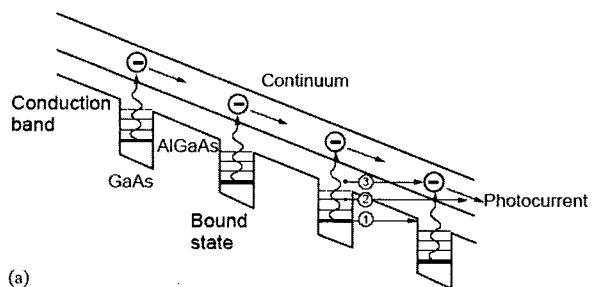
제2차 세계 대전 중 독일에서는 군사 목적으로 PbS 물질을 이용하여 적외선 검출기를 개발하였다. 이후 1950년대에는 PbTe, InSb등의 물질로 중적외선 대역인 3~5 μm 파장의 적외선을 감지 할 수 있는 적외선 검출기가 개발되었다. 광 검출기 물질로 현재에는 HgCdTe 및 InSb가 주종을 이루고 있다. InSb는 감지파장이 3~5 μm 로 제한 되어있는 반면에 HgCdTe 의 경우, HgTe 및 CdTe의 양을 조절함으로 1~12 μm 의 넓은 파장 영역을 감지할 수 있으며 또한 양자 효율이 커서 온도분해능이 수 mK로 매우 우수하다. 이로 인해 현재 상용화된 첨단 군용장비에는 대부분 이 물질을 채택하고 있으며 연구개발 또한 가장 활발히 진행되고 있다.

HgCdTe를 기반으로 하는 적외선 영상 시스템은 현재 화소의 수를 늘려 선명한 적외선 영상을 얻고자하는 방향으로 진행되고 있으며 핵심기술로는 넓은 면적의 HgCdTe 단결정을 얻는 것이다. 덩어리 형태의 HgCdTe의 경우 결정 성장온도에서 높은 Hg의 증기압으로 인하

여 직경 1cm 이상의 크기로 성장하는 것이 매우 어렵다. 근래에는 분자선 에피택시 (Molecular Beam Epitaxy), 유기금속 화학 증착법 (Metal Organic Chemical Vapor Epitaxy)등의 기법으로 Si, GaAs 등 넓은 면적의 기판위에 HgCdTe 에피 박막을 성장하는 기술이 개발되어 720 \times 640급의 이차원 어레이가 제작되어지고 있다. 하지만 여전히 8~12 μm 파장대역을 감지하는 조성의 HgCdTe의 경우 양질의 박막을 얻는 수율은 매우 낮다.

HgCdTe를 이용한 적외선 감지 기술 분야의 선두주자는 프랑스의 Sofradir 사 이다. 여기서는 유럽 대부분의 군사용 적외선 검출기를 공급하고 있으며 미국에도 적외선 검출기를 공급하고 있다. 그 밖에 미국의 Fermionic 사 Raytheon, Rockheed Martin 등에서 활발한 연구가 진행되고 있다. 근래에는 대상 물체로부터 두 파장대의 신호를 동시에 감지하여 좀 더 정확하고 많은 정보를 획득할 수 있는 이중 적외선 동시 검출기 (dual band IR detector) 가 제안되어 개발되고 있다. 미 육군의 통신-전자 사령부 산하기관인 Night Vision and Electronic Sensors Directorate는 중파장(3-5 μm)과 장파장(8-12 μm)의 두 가지 대역에서 작동하는 1024 \times 1024 급의 2색 적외선 초점면 배열 시제품을 개발하는 계획으로 알려져 있다.

최근들어 발달한 반도체 박막의 제조공정 기술발달과 더불어 반도체 재료의 양자우물 구조를 이용하는 양자우물형 적외선 광검출기 (QWIP; Quantum well Infrared Photodetector)에 대한 연구결과도 활발히 진행되고 있다. Fig. 5에서 보이는 바와 같이 QWIP는 GaAs 등으로 양자 우물 구조를 형성 시키고 이때 양자우물 내 구속된 전자가 적외선에 의해 여기 되는 원리를 이용하고 있다.



(a)

Fig. 5. 양자우물형 적외선 센서의 동작 원리.

QWIP는 HgCdTe 등의 다른 검출기에 비해서 좁은 파장 범위에서 감도를 가지는 단점이 있으나 잘 확립된 GaAs 계 반도체 공정을 사용함으로써 생산면이나 감도의 균일성 등에서 유리하다고 할 수 있겠다.

5. 맺음말

적외선 감지 기술은 주로 미국, 프랑스, 이스라엘, 러시아 등을 중심으로 연구가 진행되어 왔다. 주로 군사적인 용도로 사용되어 왔던 적외선 감지 기술의 특성상, 선진국으로부터의 기술이전은 사실상 불가능하다. 또한 첨단 적외선 검출기의 경우 군수용, 위성 탑재용, 의료용 등 제한적인 시장규모 따라 선진국에서의 연구개발은 대부분 국가의 지원 아래 이루어져왔다. 국내에서 군용 및 첨단 제품에 적용되는 고성능 적외선 영상 시스템 기술을 확보하기 위해서는 센서재료기술, 실리콘 판독회로기술, 소자제작 공정기술, 패키징 기술들이 상호 결합되어야 할 것이며 감지능 및 응답속도 면에서 우수한 HgCdTe, InSb, QWIP 등의 광 검출형으로 제작되어야 할 것이다. 또한 이를 위해서는 국가의 지원이 절대적일 것으로 여겨진다.

현재 적외선 영상 시스템에 대한 민수용 수요는 그리 크지 않지만 향후 자동차, 보안시설 감시등 응용분야가 점차 증가할 것으로 판단된다. 민수용 시장에 적절히 대응하기 위해서는 감지능이 일부 떨어지더라도 비냉각,

소형 및 저가로 적외선 영상 시스템을 제조할 수 있어야 할 것이다. 이 경우 열 검출기가 채택될 것으로 전망되며 마이크로 블로미터나 초전형 검출기가 주종을 이룰 것으로 판단된다. 이때 일차적으로는 블로미터 및 초전재료의 개발이 선행 되어야 할 것이다. 현재 널리 사용되는 VO_x 의 안정적인 증착공정 및 이 이외에 높은 TCR을 갖는 물질의 개발에 노력을 경주하여야 할 것이다. 아울러 가격적인 측면에서 우수한 경쟁력을 가지는 초전형 검출기 재료에 대한 연구개발도 활발할 것으로 전망된다. 기공 크기, grain 크기 등이 획기적으로 줄어든 대면적 BST 등의 초전 세라믹 재료개발이 저가의 열영상 시스템 제작을 위하여 절실히 필요하다.

●● 김진상



- 1986년 서울대학교 무기재료공학과(학사)
- 1988년 서울대학교 무기재료공학과(석사)
- 1997년 서울대학교 무기재료공학과(박사)
- 1998년 일본 이화학연구소 반도체 공학연구실, 객원연구원
- 1992~ 한국과학기술연구원 박막재료연구센터, 선임연구원