

적외선 관측기기(Infrared Instrument)

해설자: 박수중 (경희대학교 우주과학과, 2006.04.26)

플랑크의 복사 법칙에 의하면, 모든 물체는 온도의 함수로 복사 방출을 한다. 표면 온도가 약 6000K인 태양은 대부분의 에너지를 0.5 μm 파장대에서 방출하기 때문에 인간의 눈은 이 파장대를 감지할 수 있도록 진화하였다. 그런데, 태양보다 온도가 훨씬 낮은 물체는 눈으로 볼 수 없는 긴 파장의 빛을 방출한다. 이러한 적외선(Infrared 또는 IR)의 존재는 1800년 영국의 천문학자 William Herschel이 발견했지만, 적절한 적외선 검출기가 없었기에 본격적인 적외선 관측은 고체 물리가 발달한 20세기에 가능하게 되었다.

일반적으로 적외선 영상장비는 외부의 조명장치가 없어도 자체 온도에서 방출되는 복사 에너지를 감지할 수 있어서 산업 및 군사 목적으로 중요하게 사용되고 있다. 산업용 적외선 영상 장비는 사용 목적에 따라 NIR (0.75-1.4 μm), SWIR (1.4-3 μm), MWIR (3-8 μm), LWIR (8-15 μm), FIR (15-1000 μm) 밴드로 구분한다. 그러나 천문관측용 적외선 기기는 검출기의 특성과 사용 환경에 따라서 근적외선(near-IR, 1-5 μm), 중적외선(mid-IR, 5-30 μm), 원적외선(far-IR, 30-300 μm)으로 구분한다.

적외선(Infrared 또는 IR) 파장대는 가시광선과 전파 (특히 극초단파) 파장대 사이에 위치한다. 전파 수신기는 전자기파의 파동(wave)을 측정하지만 적외선 검출기는 광자(photon)의 수를 세는 원리로 작동하므로 적외선 관측기기의 광학장치는 가시광선을 관측하는 관측기기의 광학계와 유사하다. 그러나 적외선은 가시광선보다 광자의 에너지가 작기 때문에 적외선 관측기기를 제작하기 위해서는 (1) 특수한 적외선 검출기를 사용해야 하고, (2) 열잡음과 열복사를 줄이기 위해 기기의 광학계를 포함한 시스템 전체를 냉각해야 한다.

적외선 검출기 (IR Detector)

적외선 검출기의 대부분을 차지하는 반도체는 실리콘 또는 게르마늄과 같은 4족 원소의 크리스탈 격자 (crystal lattice) 구조로 만든다. 불순물 (impurity)이 섞이지 않은 순수 결정을 진성반도체 (intrinsic semiconductor)라고 한다. 안정된 상태에서는 모든 전자가 격자에 속박되어 있는 원자가전자 (valence electron)로 존재하지만, 외부에서 입사한 광자 에너지를 흡수하여 자유전자가 되면 이

이름	T (K)	E_g (eV)	λ_c (μm)
Si (실리콘)	295	1.12	1.11
Ge (게르마늄)	295	0.67	1.85
PbS (황화납)	295	0.42	2.95
InSb (인듐안티몬)	295	0.18	6.9
InSb (인듐안티몬)	77	0.23	5.4
$\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ (MCT, $x=0.554$)	77	0.5	2.5

표 1. 진성반도체의 밴드갭 에너지와 관측 한계 ($\lambda < \lambda_c$).

결정체는 순간적으로 도체의 성질을 갖게 된다. 이 때 반도체에 전압을 걸고 흐르는 전하의 양을 측정하면 흡수된 광자의 수를 측정할 수 있다.

입사한 광자의 에너지가 원자가전자(valence electron)를 속박하는 밴드갭 에너지 (bandgap energy)보다 작으면 적외선 검출기는 반응하지 않는다. 따라서 그 반도체 물질의 밴드갭 에너지가 작을수록 긴 파장의 전자기파를 관측할 수 있다. 표 1은 대표적으로 사용되는 반도체의 물성과 온도에 따른 밴드갭 에너지와 파장 한계를 보여준다. 참고로 원자가전자는 외부의 광자 에너지 없이도 자체 온도에 의한 Maxell-Boltzmann 분포에 따라 자유전자가 되므로 검출기를 냉각해야 한다.

표 1에서 보여주듯이 광학 검출기로 가장 많이 쓰이는 실리콘은 1.1 μm 보다 짧은 파장대의 관측을 할 수 있다. 여기서 주의할 점은 표준 측광 밴드 *UBVR*에서 0.9 μm 파장대를 관측하는 *I*-밴드는 인간의 눈으로 감지할 수 없는 적외선(Infrared)을 의미하지만, 이 파장대의 광자는 실리콘 CCD도 쉽게 관측할 수 있다. 즉 *I*-밴드의 관측은 광학 관측기로 가능하고, 적외선 관측기기의 범주에는 포함되지 않는다. 일반적 의미의 적외선 관측기기는 실리콘의 반응한계 1.1 μm 보다 긴 파장대의 관측을 목적으로 한다.

근적외선(near-IR)에 포함되는 1-5 μm 파장대를 검출할 수 있는 반도체 물질은 많이 있다. 그 중에서 HgCdTe는 수은과 카드뮴의 화합 비율에 따라 밴드갭 에너지가 달라지는데, 천문학에서는 2.5 μm 까지 관측할 수 있는 HgCdTe 검출기를 가장 많이 사용한다. 표준 측광 밴드인 *J*(1.3 μm), *H*(1.6 μm), *K*(2.2 μm) 밴드보다 긴 *L*(3.5 μm), *M*-밴드(4.8 μm)를 관측하는 경우 InSb 검출기를 사용한다. (그림 1 참조)

광자의 에너지가 더 작은 중적외선(mid-IR)을 관측하기 위해서는 반도체의 밴드갭 에너지가 훨씬 더 작아야 한다. 그러나 반도체 물질 고유특성인의 밴드갭 에너지를 줄이는 것은 한계가 있어서 진성반도체에 5족의 불순물을 약간 첨가한 외인성반도체(extrinsic semiconductor)를 만들면 이 첨가물은 밴드갭 에너지가 작아지는 효과를 낸다(그림2 참조). 천문학에서 많이 사용하는 Si:As (비소를 첨가한 실



그림 1. InSb 512×512 Array (Raytheon사의 ALADDIN III Quadrant). 한국천문연구원 소백산천문대 근적외선 카메라 KASINICS에 사용한다. (사진제공: 한국천문연구원)

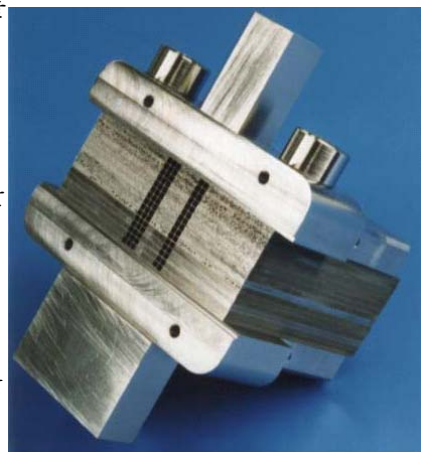


그림 2 Stressed Ge:Ga 사용에 (AKARI FIS에 장착한 검출기의 시험 모델). Ge:Ga 검출기는 작은 창 속에 있고 아래-위에서 힘을 받고 있다. (사진제공: ISAS/JAXA)

리콘)은 27 μm 까지 반응한다. 그러나 이 첨가물의 양은 적기 때문에 양자효율을 높이기 위해서는 픽셀의 크기가 커야하므로 근적외선 검출기를 사용하는 관측기기보다 광학계의 크기가 커지는 단점이 있다.

원적외선 파장대인 30-300 μm 는 천문학 이외의 분야에서는 거의 사용하지 않아서 이 파장대의 관측을 위해서는 천문학자들이 아직도 직접 검출기를 개발하고 있다. 가장 많이 사용되는 물질은 Ge:Ga (갈륨을 첨가한 게르마늄)이고 120 μm 까지 반응한다. 더 긴 파장을 관측하기 위해서는 반도체 외부에서 물리적

인 힘 (stress)을 가해서 밴드갭 에너지를 더욱 작게 할 수 있다. 우주 적외선 망원경에 사용하는 Stressed Ge:Ga는 200 μm 까지 관측할 수 있다 (그림 3 참조).

원적외선 관측에서는 위에서 설명한 반도체 검출기 이외에 볼로미터 (bolometer)를 사용하기도 한다. 볼로미터가 광자를 흡수하면 그 에너지는 열로 변환되는데, 이 열에 의해 변하는 저항의 차이를 측정하면 입사한 빛의 세기를 구할 수 있다. 볼로미터의 양자효율은 90-100%이고 또한 광자의 파장에 관계없이 반응하므로 효율이 높다. 그러나 픽셀의 수가 많은 배열 구조 (array)를 만들기가 어렵고 볼로미터의 온도를 1K 이하로 냉각해야 하므로 우주망원경 탑재체로 제작하는데 어려움이 있다.

적외선 광기계

적외선 관측기기는 전파보다 짧은 전자기파의 광자 수를 측정하는 원리이므로 광학 관측기기에서 사용하는 광학계 설계 이론을 사용할 수 있다. 즉 기하광학 원리를 적용하여 카메라를 설계하고, 빛의 회절(diffraction)과 간섭(interference) 현상을 이용하여 분광기를 제작할 수 있다. 그런데 적외선에서는 온도를 가진 모든 물체가 복사에너지를 방출한다. 따라서 적외선 관측기기에서는 열복사를 줄이기 위한 냉각 및 열복사 차단 장치가 필요하다.

광학(가시광선) 관측기기에서도 광자를 감지하는 검출기는 자체 온도에 의한 들뜸 (thermal exciation)을 최소화 하기위해 검출기의 냉각이 필수적이고 전파 관측에서도 SIS 믹서를 초저온 냉각해야 하지만, 적외선에서는 전체 광기계 시스템을 냉각해야 하기 때문에 대형의 냉각 장치를 설계해야 한다. 특히 렌즈, 반사경, 금속 구조물 등은 열팽창률이 서로 다르기 때문에 냉각에서도 기계적 안정성과 광학적 정밀성을 유지할 수 있도록 고려하는 광기계 연구가 필요하다. 그 예로 한국천문연

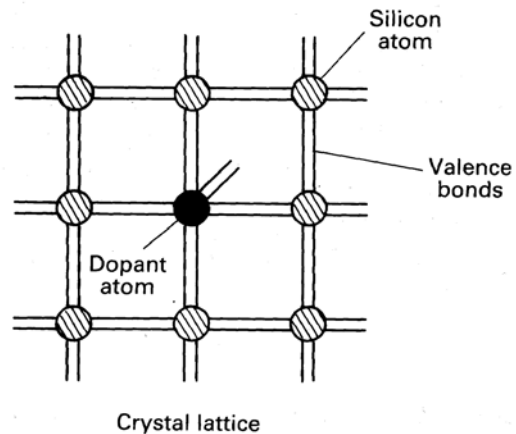


그림 3. 불순물(impurity)를 첨가한 외인성 반도체 (extrinsic semiconductor)의 결정구조.

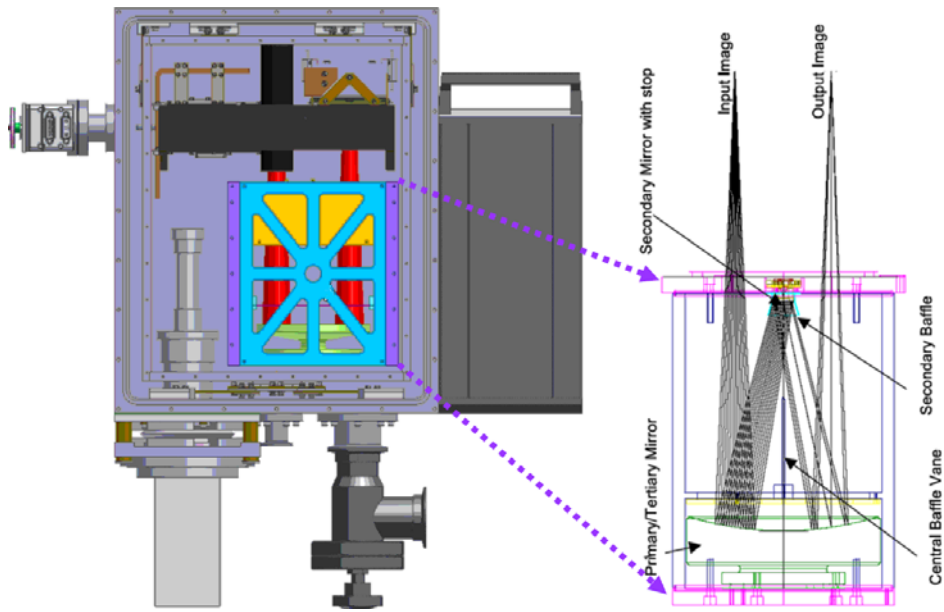


그림 4 한국천문연구원 소백산 천문대의 근적외선 카메라 KASINICS 개념도. 진공 상자 내부에 광학계가 설치되어 있다. 오른쪽의 그림은 광학망원경 구조물의 열복사를 차단하기 위한 오프너 시스템을 보여준다. (사진제공: 한국천문연구원)

구원 소백산천문대의 근적외선 카메라는 전체 광기계부가 진공 상자(Dewar)내부에 서 80K까지 냉각될 수 있는 구조로 설계되어있다 (그림 4참조).

그리고 적외선 관측기기 외부의 광학계 (예, 망원경 등)는 냉각을 시킬 수 없는 경우에는 원하지 않는 빛을 차단하기위한 냉각 배플(cold baffle)을 설치해야 한다 . 배플의 위치는 망원경 주경의 상이 생기는 출구동공 (exit pupil)의 위치하도록 설계한다 (그림 4 오른쪽 그림 참조).

적외선 관측기기의 종류

천체를 관측하기위한 적외선 관측기기는 크게 지상 망원경 장착용과 우주 망원경 탑재용으로 나눌 수 있다. 우주는 진공 상태라서 망원경 자체도 냉각할 수 있지만 (그림 5 참조) 인공위성의 무게와 전력에 제한이 있어서 냉각기의 선택이 제한된다. 또한 위성을 발사할 때의 진동과 충격을 견디기 위한 광기계부 제작이 필요하다.

근적외선 파장대에서는 지구 대기가 비교적 투명하므로 주로 지상에서 관측을 한다. $\lambda(1.3 \mu\text{m})$, $H(1.6 \mu\text{m})$ 밴드에서는 상온($\sim 300 \text{ K}$)의 열복사 세기가 무시

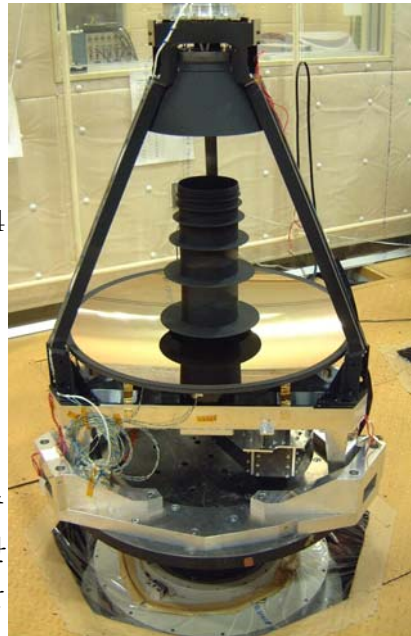


그림 5 일본의 적외선 천문 위성 AKARI에 탑재할 망원경. 전체 망원경 광학계는 6K 까지 냉각된다. (자료제공: ISAS/ JAXA)

할 수 있을 정도로 작아서 광학계를 냉각할 필요가 없다. 그러나 상온의 열복사 세기는 $2.3\ \mu\text{m}$ 보다 긴 파장대에서 급격하게 증가하므로 InSb 검출기를 사용하는 경우에는 관측기기의 냉각에 더 주의해야 하고, 열복사를 차단할 수 있는 광학구조가 필요하다.

지상에서 중적외선을 관측하기 위해서는 전용 적외선 망원경이 필요하다. 적외선 망원경은 가운데가 막혀있는 작은 부경이 주경 이외에서 오는 빛을 차단한다. 그리고 이 부경은 빠르게 움직이면서(chopping) 배경의 열복사 에너지를 제거 한다 (그림 6 참조).

중적외선과 원적외선에서는 망원경과 대기의 열복사가 감도에 큰 영향을 준다. 특히 천문학의 원적외선 파장대($30\text{-}300\ \mu\text{m}$)는 지구 대기의 수증기(H_2O)에 의해 완전히 흡수되어 지상에서는 관측이 불가능하고 과학기구 (scientific balloon), 관측용 로켓 (sounding rocket), 항공기 천문대 (airborn observatory) 등에서 제한적으로 관측하기도 한다. 중적외선과 원적외선 파장대의 본격적인 관측은 진공의 우주공간에서 냉각된 적외선 우주망원경으로 가능하다 (그림 7 참조).



그림 6. 적외선 전용 망원경의 부경 모습 (자료제공: Gemini 천문대).

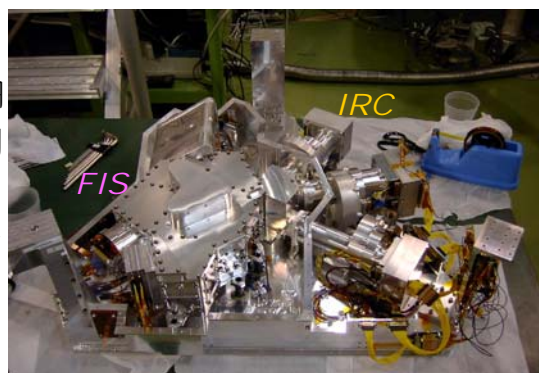


그림 7. AKARI의 원적외선 관측기기 (FIS)와 근·중적외선 관측기기 (IRC)의 비행 모델. (자료제공: ISAS/JAXA)

참고문헌

- McLean, I. S. 1997, "Electronic Imaging in Astronomy" (John Wiley & Sons Ltd, West Sussex)
- Rieke, G. H. 1994, "Detection of Light: From the Ultraviolet to the Submillimeter" (Cambridge University Press, Cambridge)
- Tokunaga, A. T. 2000, in "Allen's Astrophysical Quantities, 4th Edition", edited by A. N. Cox (Springer-Verlag, New York), p. 143
- 육인수, 이성호, 진호 외 10명, 천문학논총, 20, 143-149