

적외선 검출기에 사용되는 HgCdTe 반도체의 특성



정웅택

국방과학연구소 선임연구원

1. 서 론

절대온도 0K 이상인 모든 물체는 물질 내부 분자들의 진동에 의해 적외선을 스스로 발산하며, 온도에 따른 파장의 분포 형태는 Planck 복사 법칙에 의해 계산할 수 있다[1]. 이러한 적외선은 대기 중에서 긴 파장 영역(long wavelength infrared, LWIR : 8~14 μm), 중파장 영역(middle wavelength infrared, MWIR : 3~5 μm), 그리고 단파장 영역(short wavelength infrared, SWIR : 1.5~2.5 μm) 인 3가지 대기창 영역에서만 투과하며 다른 영역의 빛은 모두 흡수된다. 상온(300K)인 물체는 8~14 μm 영역대인 LWIR 영역의 적외선을 발산하며, 비행기의 추진제에서 나오는 연기(500K)는 3~5 μm 영역대의 적외선을 발산한다. 이러한 영역대의 적외선이 대기 투과창과 일치하기 때문에 민수용과 군수용의 응용에 사용되고 있다. 그리고 단파장 영역대의 적외선은 광통신에 응용되고 있다.

적외선 검출기의 역사는 1800년경 Herchel이 적외선 방사를 탐지하기 위해 사용한 열전대(thermometer)의 사용으로 시작되었다. 열전대는 1차 세계 대전이 일어날 때까지 적외선을 감지하기 위해

사용한 주요한 3가지 검출기 중의 하나이었다. 다른 하나는 1821년에 Seebeck에 의해 열전효과(thermoelectric effect)가 발견되었고, 곧이어 열전쌍(thermocouple)이 알려졌다. 1829년에 Nobili는 한 묶음의 열전쌍을 직렬로 연결한 최초의 열전기 더미(thermopile)를 만들었다. 또 다른 형태의 적외선 검출기는 Langley가 만든 볼로미터(bolometer)이었다.

광전도(photoconductive) 효과는 1873년에 Smith에 의해 발견되었으며, 1917년에 Case에 의해 thallium과 sulfur를 이용하여 높은 반응도를 가진 최초의 적외선 광전도 소자를 만들었다. 1930년경에 Cs-O-Ag를 이용한 광전도 소자가 개발되었다. 그리고 1933년에 베를린 대학의 Kutzscher가 약 3 μm 영역대에서 광반응을 보이는 lead sulfide를 발견하였으며, 이것은 2차 세계대전 때에 실제로 응용된 최초의 적외선 검출기이었다. 1943년에 독일에서 lead sulfide 적외선 검출기를 양산 단계로 발전하였으며, 1944년에 미국의 Northwestern 대학에서, 1945년에 영국의 Admiralty Research Lab.에서 개발되었다[2].

2차 세계대전 이후에 적외선을 검출할 수 있는 재료들이 많이 연구되었으며, 1950년대 중반에 Ge:X

와 InSb 반도체가 개발되었고, 1959년에 Lawson 등[3]이 에너지갭을 조절할 수 있는 II-VI족 화합물인 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ (HgCdTe) 반도체를 발견한 이후로, 이 반도체는 액체 질소의 낮은 온도에서 동작한다는 단점에도 불구하고 높은 탐지도와 빠른 응답 속도의 장점 때문에 오늘날까지 가장 많이 사용하는 재료이며, 주로 군수용으로 사용되고 있다.

1970년대 후반부터, HgCdTe 관련 기술은 신호 판독회로와의 결합을 위해 광전도형 보다는 높은 임피던스와 전력 손실이 거의 없는 광기전력형(photo-voltaic)의 검출기 개발에 집중되었다. 이러한 노력에 의해 시간 지연 회로와 광스캐너를 이용한 1차원 배열뿐만 아니라, 고성능의 2차원 배열의 초점면 배열(focal plane array, FPA) 검출기가 개발되었다 [4]. 그러나 HgCdTe FPA 개발은 HgCdTe 재료 내부의 많은 결함과 소자 제조의 낮은 수율(yield) 때문에 많은 제약을 받고 있다. 이러한 단점들을 극복하기 위해, II-VI족 화합물 반도체 재료 뿐만 아니라 III-V족 화합물 반도체의 양자우물(Quantum well) 구조, 비냉각형 재료를 이용한 연구도 활발히 진행되고 있다. 이러한 노력에 의해 일체형(monolithic) PtSi Schottky 장벽을 이용한 1024×1024 배열의 검출기가 개발되었으며, 비냉각 열형 검출기들과 III-V족 양자 우물 구조의 검출기가 개발되었다. 비냉각형 적외선 소자들은 특성은 냉각형에 비해 다소 떨어지지만 유지 및 가격 면에서 유리하기 때문에 민수용으로 많이 사용되고 있다.

적외선 검출기의 기술 발전은 결국 적외선을 검출

하는 반도체 재료에 달려있으며, 적외선 검출기에 사용되는 재료 중에서 양자형 반도체는 작동 원리에 따라 표 1-1과 같이 분류할 수 있다.

본 논문은 양자형 적외선 검출기 중 현재 가장 많이 사용되고 있는 HgCdTe 반도체에 국한하여 설명하였으며, 2장에 HgCdTe 반도체의 전기적·광학적 특성에 대해, 3장에 HgCdTe 반도체 웨이퍼의 제조 방법에 대해 요약하였다. 그리고 4장에 맺음말로 글을 맺었다.

2. HgCdTe의 특성

양자형 검출 소자의 유력한 재료들은 주로 II-VI족의 화합물 반도체들이며, 몇 가지 II-VI족 화합물 반도체 재료들의 에너지갭과 격자상수의 관계를 그림 2-1에 나타내었다. 이 그림에서 HgTe를 기본으로 한 CdTe, MnTe, ZnTe 등의 삼원계 화합물 반도체가 MWIR과 LWIR의 두 대역의 파장 에너지를 탐지할 가능성이 있는 재료로 알려져 있다.

HgCdTe 반도체는 빛 흡수 기구가 직접천이형($\Gamma_6-\Gamma_8$)이며, zinc-blende 구조로 되어 있다. HgTe와 CdTe의 조성에 따라 에너지갭이 연속적으로 변하는 특성이 있다. 즉, HgTe는 반금속의 특성을 가지고 있으며, 조성 x 가 0.17 이후부터 반도체의 특성을 보이며, x 가 0.55를 경계로 하여 이 값 이하에서는 온도가 감소하면 에너지갭이 줄어들며, 0.55 이상에서는 반대로 온도가 증가하면 에너지갭이 감소하는 특성을 가지고 있다. 조성에 따른 에너지갭의 관계

표 1-1. 적외선 검출기용 양자형 재료의 종류.

형태	천이	전기 출력 형태	종류
내인성 (Intrinsic)	Interband	Photoconductive Photovoltaic Capacitance PEM	PbS, PbSe, InSb, HgCdTe InSb, InAs, PbTe, HgCdTe, PbSnTe InSb, HgCdTe InSb, HgCdTe
외인성 (Extrinsic)	Impurity to band	Photoconductive	Si:In, Si:Ga, Ge:Cu, Ge:Hg
자유 운반자	Intraband	Photoemissive Photoconductive	PtSi, Pt, Si, IrSi, Schottky barriers GaAs/CsO InSb electron bolometer
양자 우물	quantum levels	Photoconductive Photovoltaic	HgTe/CdTe, GaAs/GaAlAs, InSb nipi InSb/InAsSb SLS

식은 여러 연구자들에 의해 발표되었으며, 그 중에서 HgCdTe의 조성이 $0.17 \leq x \leq 0.30$ 범위에서는 Hansen, Schmit, & Casselman 등 [5]이 발표한

실험식과 Finkman과 Schacham 등 [6]이 발표한 실험식이 가장 많이 인용되고 있다. 이 두 실험식의 에너지갭은 식(2-1)과 식(2-2)과 같이 온도와 조성의 함수로 되어 있다.

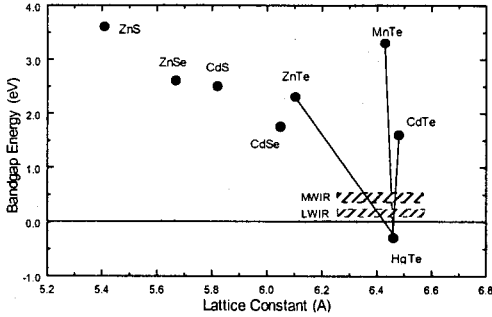


그림 2-1. II-VI족 화합물 반도체의 격자상수와 에너지갭.

$$E_g(x, T) = -0.302 + 1.93x + (5.35 \times 10^{-4})T(1-2x) - 0.81x^2 + 0.832x^3 \quad (2-1)$$

$$E_g(x, T) = -0.3424 + 1.838x + 0.148x^4 + [(7.680001 \times 10^{-4})T + 0.629] \times (1-2.14x)/(1+x) \quad (2-2)$$

여기에서 T는 절대온도 K이며, 에너지갭은 eV 단위이다. 그리고 조성에 따른 격자상수는 Higgins 등 [7]이 다음과 같은 실험식을 제시하였다.

$$a = 6.4614 + 0.0084x + 0.01168x^2 - 0.0057x^3 \quad (2-3)$$

전기적 특성중 내인성 운반자 농도(intrinsic car-

표 2-1. HgCdTe의 대표적인 물리적 특성값 [9].

특성	T(K)	x=0	x=0.2	x=1.0
격자상수 a (nm)	300	0.6463	0.64645	0.6482
열팽창 계수 α ($10^{-6}/K$)	300	4	4.3	5.5
열전도도 C (W/cmK)	300	0.04		0.07
밀도 (g/cm^3)	300	8.076	7.63	5.85
녹는점 (K)		943	940(sol.) 1050(liq.)	1365
에너지갭 (eV)	300	-0.15	0.165	1.505
	77	-0.25	0.09	1.60
	4.2	-0.30	0.064	1.605
유효질량 m_e^*/m m_h^*/m	77	0.029	0.005	0.096
		0.35-0.7	0.3-0.7	0.66
이동도 (cm^2/Vs) μ_e μ_h	77		2.5×10^5	40,000
			700	38,000
고유운반자농도 (cm^{-3})	300		3×10^{16}	
	77		8×10^{15}	
정적 유전상수	300	20.5	18.5	10.5
고주파수 유전상수	300	15.0	13.0	7.2

rier concentration)는 $k \cdot p$ 방법을 사용하여 비포물선 형태로 가정하여 이론적으로 계산하면 다음과 같은 조성과 온도의 함수 형태의 식을 얻을 수 있다[8].

$$n_i = (A + Bx + CT + DxT + Fx^2 + GT^2) \times 10^{14} E_g^{-4} \times T^{3/2} \exp(-E_g/2kT) \quad (2-4)$$

여기에서 n_i 는 cm^{-3} 의 단위이며, $A = 5.24256$, $B = -3.5729$, $C = -4.74019 \cdot 10^{-4}$, $D = 1.25942 \cdot 10^{-2}$, $F = 5.77046$, $G = -4.24123 \cdot 10^{-6}$ 이다. 그리고 전자의 이동도(mobility)에 대한 표현식은 다음과 같다[9].

$$\mu_e = 9 \times 10^4 (0.2/x)^{7.5} / T^{(0.2/x)^{0.6}} \quad (2-5)$$

굴절율은 Finkman과 Schacham 그룹에서 제시한 실험식이 많이 인용되고 있으며, 다음과 같이 조성과 파장의 함수로 표시되어 있다[6].

$$n^2 = A + \frac{B}{1 - (C/\lambda)^2} + D\lambda^2 + E\lambda^4 \quad (2-6)$$

여기서 $A = 16.4135 - 22.1914x + 11.081x^2$, $B = 0.037514 + 1.060482x + 0.876032x^2$, $C = 0.5694x - 1.5355$, $D = -1.4917 \times 10^{-3} + 2.1144 \times 10^{-3}x - 1.0415 \times 10^{-3}x^2$, $E = -1.63 \times 10^{-7}$ 이다. 앞에서 언급한 여러 가지 HgCdTe의 기본적인 물리적 특성을 표 2-1에 요약하였다.

앞에서 여러 가지 식에서 알 수 있듯이 HgCdTe의 여러 가지 물리적 특성 값을 얻기 위해서는 반드시 정확한 조성 x 값을 알아야 한다. HgCdTe의 경우 조성을 유추할 수 있는 방법에는 표 2-2와 같이 여러 가지 방법이 알려져 있으며, 이 중에서 비파괴법이면서 정밀도를 비교적 신뢰할 만한 측정법인 적외선 투과법이 많이 사용되고 있다.

적외선 투과법은 깊이 방향과 반경 방향으로의 조성 분포 분석이 가능하며, 비파괴적인 방법이며, 정밀도도 0.005 정도로 다른 방법에 비해 비교적 정확한 것으로 알려져 있다. 적외선 투과법의 원리는 에너지갭보다 큰 빛이 입사하게 되면 가전도대(valence band)에 있는 이 빛에 의해 전자-정공 쌍이 분리되어 전자는 전도대(conduction band)로 전이하는 에너지로 소요되어 빛이 흡수된다. 반대로 에너지갭보다 작은 빛이 입사하게 되면 가전도대 내의 interband 또는 intraband 흡수가 일어나게 된다[12]. 조성 결정에 영향을 주는 흡수는 가전도대-전도대 흡수에 의한 기구이며, 깊이 방향의 조성의

표 2-2. HgCdTe 조성 결정법 [10, 11].

방법	정밀도	장단점
밀도 측정법	0.005	간단하지만 박막 시료는 적용이 안됨
화학분석법	0.005	절대적인 조성 분석이 가능하나 파괴법임
RBS	0.01	깊이 방향 분석이 가능하나 정밀도가 다소 떨어짐
AES	0.01	깊이 방향 분석이 가능하나 표준 시료가 필요함
Ellipsometry	0.005	굴절률을 측정이 가능하나 측정 및 분석 시간이 길다
EDX	0.005	깊이 및 반경 방향의 분석은 가능하나 파괴법임
SIMS	0.005	깊이 및 반경 방향의 분석은 가능하나 파괴법임
적외선 반사법	0.005	비파괴법이나 표면 조성만 분석이 가능
적외선 투과법	0.005	비파괴법이면서 조성 분포 측정이 가능

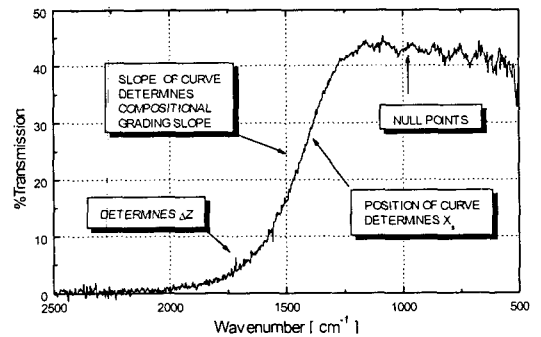


그림 2-2. 식(2-7)과 적외선 투과도와와의 관계.

분포는 식 (2-7)과 같으며, 이 식의 값들은 그림 2-2와 같이 상온에서 측정된 적외선 투과도 곡선에 의해 결정되는 값이다[13].

$$x(z) = (x_0 + sd) - sz + \frac{[1 - (x_0 + sd)]}{1 + 4(z/dz)^2} \quad (2-7)$$

식 (2-7)에서 조성 x 를 구하려면 최소 자승법에 의한 시뮬레이션 과정을 거쳐서 식에 포함되어 있는 변

수들을 결정해야 하는 단점이 있다. 이것을 보완하여 간편하고 쉬운 방법으로 상온에서 HgCdTe 웨이퍼의 적외선 투과도를 측정된 곡선에서 조성을 바로 얻을 수 있는 실험식들이 발표되었다[14, 15].

이 식은 덩어리(bulk) 상태의 웨이퍼와 박막 상태의 웨이퍼에 대해 주어져 있으며, 덩어리 웨이퍼인 경우는 식 (2-8)과 같다.

$$x = .0675 + 9.907 \times 10^{-5} + (-.00818 + 5.29 \times 10^{-7} \times Z_{\downarrow}) \times \ln(10/d) \quad (2-8)$$

여기에서 Z_{\downarrow} 는 측정된 최대 투과도의 50%에 해당하는 파수(wavenumber, cm^{-1})이며, d는 HgCdTe 웨이퍼의 두께이며 μm 단위이다. 그리고 박막 웨이퍼인 경우는 식 (2-9)와 같다.

$$x = .05699 + .0001001 \times Z_{\downarrow} + (-.01462 + 1.165 \times 10^{-6} \times Z_{\downarrow}) \times \ln(10/d) \quad (2-9)$$

식 (2-8)과 식 (2-9)에서 조성을 계산하는데 필요한 것은 웨이퍼의 두께와 Z_{\downarrow} 값이다. 이 식들로부터 HgCdTe 웨이퍼의 조성은 상온에서 측정된 적외선 투과도 곡선에서 쉽게 조성을 계산할 수 있다.

HgCdTe의 전기적 특성은 상온에서는 거의 n형 전도형을 보이며, 갓 성장된 HgCdTe는 성장시 높은 Hg 분압 때문에 Hg 빈자리가 생기며, 액체 질소 온도인 77K에서는 대부분 p형 전도형을 나타낸다. HgCdTe 반도체가 다른 반도체와 다른 특이한 현상은 77K에서 p형 전도형을 나타내는 것으로, 이것은 받개(acceptor)의 농도에 의해 결정되는 것이 아니라 Hg 빈자리 농도에 의해 결정되며, 정공 농도도 Hg 빈자리 농도에 결정되는 것이다. 그리고 n형 전도형으로 만들려면 Hg 분위기에서 열처리를 하면 Hg 빈자리가 채워지면서 성장시 내부에 존재하는 잉여 불순물들에 의해 n형 전도형을 나타내게 된다.

n형인 경우 Hall 계수는 전 온도 영역에서 음의 부호를 가지고 있으며, 77K 보다 작은 온도 영역에서는 거의 변화가 없으며, 77K부터 상온까지는 선형적으로 작아지는 특성이 있다. 반면에 p형인 경우 Hall 계수의 부호는 조성에 따라 다르지만 100K와 200K 사이의 전이 온도에서 바뀌며, 이 온도보다 큰 온도 영역에서는 음의 부호를, 낮은 온도 영역에서는 양의 부호를 나타낸다. 그리고 Hall 계수의 부호가 바뀌는 영역을 혼합영역이라 한다. p형인 경우 이러한 현상이 나타나는 원인에는 식 (2-10)에서 알 수 있듯이 두 가지 원인이 있다.

$$R_H = \frac{p-nb^2}{e(p+nb)^2} \quad (2-10)$$

여기에서 R_H 는 Hall 계수이며, e는 전하량이며, p는 받개의 농도, n은 주개(donor)의 농도이다. 그리고 b는 주개와 받개의 이동도의 비로써 $b = \mu_n/\mu_p$ 이다. 즉, 내인성 운반자 농도는 온도가 상승함에 따라 증가하여 Hg 빈자리 농도보다 많게 되는 효과가 일차적인 원인이다. 또 다른 이유는 전자의 이동도가 정공의 이동도에 비해 약 1000배 정도 크기 때문에 전자와 정공의 농도 차이가 어느 정도 있어도 전자에 의한 효과가 많이 나타나기 때문이다.

HgCdTe의 p형 농도는 Hg 빈자리에 의해 결정되는 값이므로 표면 상태와 온도 및 시간에 따라 그 특성이 변하는 경향이 있기 때문에, 주개와 받개의 농도를 정확하게 조절하기 위해서는 In 또는 As 등의 불순물 주입에 의한 방법으로 조절하여 사용하고 있다.

3. HgCdTe 웨이퍼의 제조 공정

고성능의 적외선 검출소자를 만들려면 고순도의 반도체 재료가 있어야만 가능하다. 이러한 재료는 결정 내부의 결함이 적고 대면적이며 특성이 균일하고 재현성이 있어야 한다. 이러한 HgCdTe 반도체 재료를 만드는 방법에는 원재료들을 녹일 수 있는 높은 온도에서 낮은 온도로 내리면서 재료를 성장시키는 덩어리(bulk) 성장법과 비교적 낮은 온도에서 성장하는 박막 성장법들이 있다.

좋은 재료를 성장시키기 위해서는 상도표(phase diagram)에 관한 자료가 매우 중요하다. HgCdTe와 관련된 상도표에 관한 연구는 많은 연구 그룹에서 발표되었으며, 특히 Brice 그룹에서 Hg-Cd-Te 상도표에 관해 100여개 이상의 연구 결과를 정리하였다[16, 17].

3-1. 덩어리(bulk) 성장법

HgCdTe 덩어리 성장이 다른 재료에 비해 어려운 점은 크게 2가지로 나누어 볼 수 있는데, 하나는 그림 3-1과 같은 높은 Hg 분압이며, 다른 하나는 그림 3-2와 같은 높은 갈라놓기(segregation) 계수이다. 이러한 문제 때문에 표준 결정 성장법으로 성장시킬 경우 HgCdTe 단결정 내부에 물성의 심한 편차가 일어나게 된다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 덩어리 성장의 경우 결정화가 일어나는 온도에서 빨리 온도를 내리는 방법과 원재료가 장입되어 있는 석영관 내부에 이중

구조로 만들어 Hg만을 보관하는 영역을 따로 만들어 Hg 분압을 조절하는 방법이 제안되었다. 그 외에 온도 분포의 균일성을 유지하기 위해 여러 가지 방법들이 제안되었다.

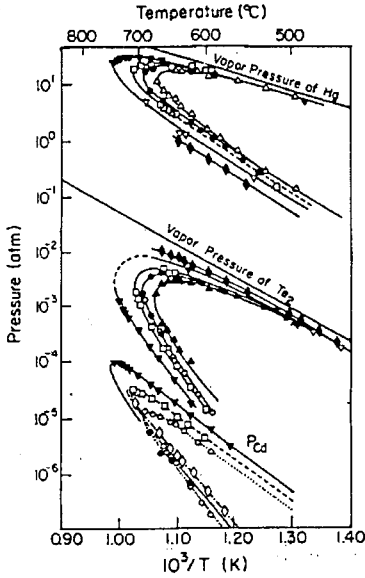


그림 3-1. Hg, Cd, Te의 온도에 따른 분압.

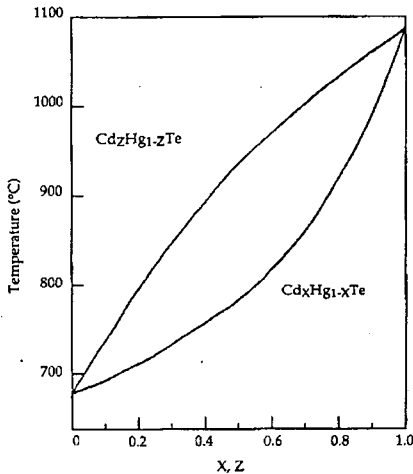


그림 3-2. HgTe와 CdTe의 이원계 액체-고체 경계선.

이러한 문제점을 해결하기 위해 제안된 방법들이

Bridgman-Stockbarger법, 열전대 이동법(traveling heater method, THM), 그리고 고체 재결정화(solid state recrystallization, SSR)법 등이다[18].

이러한 덩어리 성장법은 용액 상태에서 성장을 하기 때문에 성장 과정에서 정화 과정을 충분히 거쳐 덩어리 내부의 불순물 농도를 매우 낮게 낮출 수 있는 장점이 있다. 이로 인해 박막 성장에 비해 전기적 특성 중 이동도와 소수 운반자 수명등의 특성이 매우 우수하다. 그러나 소자화에 필요한 HgCdTe의 두께는 약 10~30 μm 정도로 매우 얇기 때문에, 성장 후에 소자 공정에 사용될 수 있도록 절단(slice) 및 연마(polishing)의 부가적인 과정이 필요하다. 이 과정에서 많은 양의 HgCdTe 결정이 손실되는 단점과 직경이 약 1.5 cm 크기로운 성장되는 단점 때문에 제한적인 응용 분야에만 사용되고 있으며, 주로 비교적 소자 수가 적은 광전도형 소자용으로 가장 많이 사용되고 있다.

3-2. 박막 성장법

박막 성장법은 덩어리 성장법에 비해 대면적의 웨이퍼를 성장시킬 수 있으며 절단 및 연마 공정이 필요 없는 장점이 있다. 그러나 박막을 성장시키려면 반드시 기판이 있어야 한다. 그러므로 박막의 크기는 사용되는 기판의 크기에 의해 결정된다. 기판은 박막층과 격자 부정합이 적어야 하며 표면과 내부에 결점이 적어야 한다. 또한 적외선 영역에서 높은 투과도를 가져야 한다. 이러한 조건을 만족하는 Cd(Zn)Te, Si, GaAs, 사파이어 등이 HgCdTe 박막의 기판 재료로 많이 사용되고 있다.

이중에서 Cd(Zn)Te는 HgCdTe와 격자 부정합이 가장 작은 장점이 있으나 특성이 우수하면서 대면적인 Cd(Zn)Te 기판을 만들기가 어렵다. 이러한 문제 때문에 Si이나 GaAs 위에 Cd(Zn)Te 버퍼층을 먼저 올리고 그 위에 HgCdTe 박막을 성장시키는 방법이 연구되었다. 이 방법은 성장의 어려움에도 불구하고 대면적의 HgCdTe 박막을 얻을 수 있다는 장점 때문에 많은 연구가 이루어졌다. HgCdTe 박막 성장법에는 액상 박막(liquid phase epitaxy, LPE)법, 증기상 박막(vapor phase epitaxy, VPE)법, 분자빔 박막(molecular beam epitaxy, MBE)법들이 많이 연구되었다.

이중에서 LPE법이 가장 많은 연구가 이루어진 분야이며, 소자 제작용 웨이퍼 제조에 가장 많이 응용되고 있다. LPE법에는 용액과 기판을 접촉시키는 방법에 따라 슬라이더(slitter)법, 담금(dipping)법, 기울기(tilting)법 등으로 분류할 수 있다. LPE법

은 Hg, Cd, Te를 함유하고 있는 용액(solution)내에 기판을 접촉시켜 기판이 용액내로 녹아 나는 현상(melt back)을 이용하여 성장시키는 방법이다. 그러므로 LPE법은 용액의 선정이 매우 중요하며, 상도표에 의해 HgTe-과다, Te-과다, Hg-과다 등 3가지 과다 용액의 유사이방(pseudobinary)계를 이용하여 성장한다.

이중에서 HgTe-과다는 약 700℃의 고온과 높은 Hg 분압 때문에 실용화에는 문제가 있다. 그래서 주로 Hg와 Te-과다를 중심으로 성장하는 방법이 연구되었으며, 각각의 성장 온도는 Hg-과다에서는 약 400~500℃이며, Te-과다에서는 약 420~500℃이다. 그리고 Te-과다는 가장 낮은 Hg 분압(약 0.1 기압)에서 성장이 가능하나, 성장 후 표면에 남아 있는 Te를 완전히 제거시키지 못하는 단점이 있다. 또한 Hg-과다에서의 성장은 Hg 용액 내에서 CdTe가 녹아 나는 양이 매우 작기 때문에 성장 중에 Cd의 부족으로 인해 조성의 조절이 어려운 것이 문제로 남아 있었다. 그러나 이것도 성장이 일어나는 부분의 옆에 무한대 용액을 사용하여 해결하였다[19]. 그러나 LPE법은 많은 연구에도 불구하고 표면에 경사진 형태의 얼룩이 남아 있는 문제와 상대적으로 많은 어긋나기(dislocation)가 박막 내부에 존재하는 단점은 여전히 과제로 남아 있다.

또 다른 HgCdTe 박막 성장법으로 VPE법이 연구되었으며, 이중에서 프랑스에서 처음으로 제안된 등열 증기상 박막(isothermal vapor phase epitaxy, ISOVPE)법이 있다[20]. 이 방법은 간단한 준열평형 성장법을 응용한 것이다. 온도가 약 400~600℃인 소스에서 HgTe가 증발하여 CdTe 기판 쪽으로 증착된다. 이때 Hg는 CdTe 기판 쪽으로 확산해서 들어가고, Cd는 표면 쪽으로 확산하게 된다. 이러한 현상으로 인해 표면에 HgCdTe 박막이 성장된다. 그러므로 깊이 방향에 대한 조성의 기울어짐은 필연적인 것으로 소자 응용 방법에 따라 이점이 장점과 단점이 될 수도 있다.

VPE법의 또 다른 방법으로 금속산화물 화학 증기 증착(metalorganic chemical vapor deposition, MOCVD)을 들 수 있다. 이 방법은 성장 온도가 비교적 낮으며, 성장 도중에 성장 조건과 불순물 주입이 용이한 장점 때문에 이중접합 구조의 박막 성장 연구에 많이 사용되고 있다.

현재 HgCdTe 박막 성장에 가장 많은 연구를 하고 있는 분야는 MBE법이다[21]. 이 방법은 성장 온도가 가장 낮으며, 초격자 구조 및 복잡한 불순물 분포를 가진 구조를 가진 박막을 성장시킬 수 있는 장점

은 있으나 장비가격과 유지비용이 매우 비싸다는 단점이 있다. 그러나 HgCdTe 박막 성장에 있어서 MBE법의 가장 큰 장점은 다른 박막 성장법에 비해 Si 기판 위에 CdTe 비퍼층과 HgCdTe 박막을 연속해서 성장시킬 수 있다는 것과 HgTe-CdTe 초격자 구조의 구현이 가능하다는 것이다. n형의 불순물로는 In이, p형으로는 As이 가장 많이 사용되고 있다. 현재 미국에서 MBE법으로 Si 기판 위에 성장시킨 대면적 HgCdTe 박막을 이용하여 512×512 초점면 배열 검출기가 성공적으로 구현되었으며[22], 다중 채널 적외선 탐지용 검출기도 성공적으로 구현되었다고 보고되었다[23].

4. 맺음말

세계적으로 볼 때 적외선 검출기 개발이 본격적으로 시작된 것은 기껏 30년 정도에 불과하다. 이렇게 짧은 역사에도 불구하고 선진국의 발전 추세는 매우 빨리 흐르고 있다. 초창기에는 단일 소자에 광학계를 이용하여 적외선 영상을 구현했다. 이러한 기술이 일차원 배열로 발전하였고, 이제는 256×256, 512×512, 1024×1024 형태의 고선명 이차원 배열을 갖는 검출기가 개발되었다.

이러한 검출기 개발에 필요한 기술은 대면적이면서 특성이 균일한 웨이퍼의 제조 기술과 적외선을 감지하여 전압 또는 전류의 형태로 변환시켜 주는 소자 설계 및 제조 기술이 있어야 한다. 소자 제조 기술은 일반 Si 공정에 비해 재현성 및 수율이 낮아 대량 생산은 불가능하며 숙련된 기술자의 경험에 의해 수율이 좌우될 만큼 어려운 분야이다. 적외선 검출기의 가격이 매우 비싼 주원인은 바로 소자의 낮은 수율과 비싼 웨이퍼 가격 때문이다.

또 다른 기술은 이차원 배열의 소자에서 나온 적외선 신호를 처리해 주는 판독회로의 설계 기술을 들 수 있다. 판독회로는 HgCdTe 검출 소자에서 나온 광신호를 증폭하고, 증폭된 신호가 순차적으로 신호 처리기로 나갈 수 있도록 하는 역할을 하는 것이다. 판독회로에는 수많은 신호 증폭회로가 내장되어 있기 때문에 Si 웨이퍼를 이용하여 판독회로를 구현하고 있다.

그러므로 Si으로 만든 판독회로와 HgCdTe로 만든 소자를 한 몸체로 붙여야 한다. 이렇게 판독회로에 소자를 연결해 주는 방법에는 크게 하이브리드(hybrid) 접합, 일체형(monolithic) 접합 기술로 나눌 수 있다. 하이브리드 접합은 Si 쪽과 HgCdTe 소자 쪽에 In 범프를 이용하여 서로 접합시키는 방법

이고, 일체형 접합은 Si 판독회로 위에 HgCdTe 소자를 바로 성장시켜 신호를 연결해 주는 방법이다. 향후 발전 추세로 보면 일체형 접합기술이 조만간 개발될 것으로 전망되며, 이미 일체형의 초기 단계인 비아홀(via hole) 접합 기술은 개발되어 있다.

대부분의 양자형 적외선 탐지기는 주로 액체 질소 온도에서 작동하므로, 소자를 냉각시키기 위한 저온용 진공 용기가 필요하다. 이러한 저온용 진공 용기는 약 10^{-5} torr의 초고진공을 10년 정도 유지할 수 있도록 재료 및 접착제들로 이루어져 있다. 그러므로 소자를 저온 용기에 조립하는 기술도 매우 어려운 기술 중의 하나이다. 이렇게 소자가 저온 용기에 조립된 상태를 검출기라 부른다. 이러한 대표적인 검출기 사진을 그림 4-1에 나타내었다.

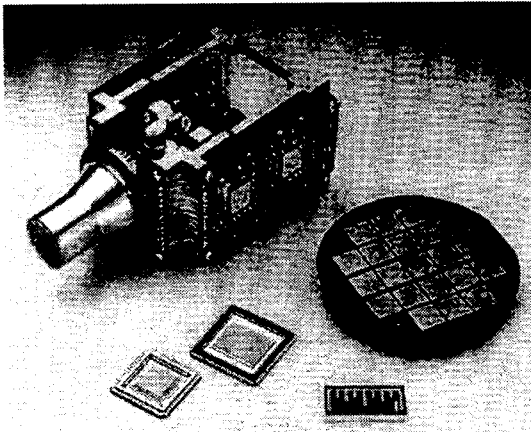


그림 4-1. Boeing사에 HgCdTe 반도체를 이용하여 개발한 256×256, 320×240, 640×480 FPA, 저온용 진공용기 및 신호처리부의 사진.

그리고 이 검출기의 온도를 내리기 위한 냉각기 기술 또한 빼 놓을 수 없는 기술 중의 하나이다. 적외선 검광기에 사용되는 냉각기는 응용에 따라 열전기 냉각기(thermoelectric cooler), J-T 냉각기(Joule-Thomson cooler), 스테어링-엔진 냉각기(Stirling-Engine cooler) 등이 있다. 예전에는 검출기와 냉각기가 따로 독립되어 있는 형태로 개발되었지만, 최근에는 검출기와 냉각기가 붙은 일체형이 개발되어, 최근의 적외선 검출기는 대부분 일체형으로 되어 있다.

앞에서 언급한 기술들 중 많은 부분들은 기 확보된

기술을 차세대 검출기 기술에 적용할 수 있다. 그러나 적외선 검출기 개발을 주도하고 있는 분야는 전기적, 광학적 특성이 우수하면서 비용이 낮은 대면적 웨이퍼를 만드는 기술이다. 이러한 웨이퍼가 확보되어야만 차세대 검출기 개발 설계가 가능한 것이기 때문이다. 현재 가장 많이 사용되고 있는 재료는 본 논문에서 언급한 HgCdTe가 주종을 이루고 있지만, HgCdTe 웨이퍼 제조의 어려움과 경제적인 문제 때문에, III-V족 양자 우물 구조와 Si 등을 이용한 볼로미터 재료 및 BaTiO₃ 등의 초전체 재료인 비냉각(uncooled) 적외선 재료 개발에 활발한 연구가 진행되고 있다.

현재 이 분야의 선두 주자인 미국에서는 양질의 HgCdTe 웨이퍼를 만들기 위해 노력하고 있으면서도 또 한편으로는 다른 차세대 재료 개발에 노력을 아끼지 않고 있다.

참 고 문 헌

- [1] E. L. Dereniak and G. D. Boreman, *Infrared Detectors and Systems*(John Wiley & Sons, Inc., 1996), Chap. 2.
- [2] R. J. Cushman, *Proc. IRE* **47**, 1471 (1959).
- [3] W. D. Lawson, S. Nielson, E. H. Putley and A. S. Young, *J. Phys. Chem. Solids* **9**, 325 (1959).
- [4] L. J. Kozlowski, R. B. Bailey, S. C. Cabelli, D. E. Cooper, G. McComas, K. Vural and W. E. Tennant, *Proc. SPIE* **1735**, 163 (1992).
- [5] G. L. Hansen, J. L. Schmit and T. N. Caseelman, *J. Appl. Phys.* **53**(10) 7099 (1982).
- [6] E. Finkman and S. E. Schacham, *J. Appl. Phys.* **56**(10), 2896 (1984).
- [7] W. M. Higgins, G. N. Pultz, R. G. Roy, R. A. Lancaster and J. L. Schmit, *J. Vac. Sci. Technol.* **A7**(2), 271 (1989).
- [8] J. R. Lowney, D. G. Seiler, C. L. Littler and I. T. Yoon, *J. Appl. Phys.* **71**, 1253 (1992).
- [9] Antoni Rogalski, "Infrared Photon Detectors", (SPIE Optical Engineering Press, 1995), Chap. 11.
- [10] D. G. Seiler, S. Mayo and J. R. Lowney, *Semicond. Sci. Technol.* **8**, 753-776

- (1993).
- [11] S. L. Price and P. R. Boyd, *Semicond. Sci. Technol.* **8**, 842-859 (1993).
- [12] J. A. Mroczkowski and D. A. Nelson, *J. Appl. Phys.* **54**(4), 2041 (1983).
- [13] C. A. Hougen, *J Appl. Phys.* **66**(8), 3763 (1989).
- [14] Y. Jeoung, T. Lee, H. Kim, J. Kim, M. Han and T. Kang, *Infrared Phys.* **37**, 445 (1996).
- [15] Y. Jeoung, T. Lee, H. Kim, J. Kim, M. Han and T. Kang, *Jpn. J. Appl. Phys.* **35**, 134 (1996).
- [16] M. A. Herman and M. Pessa, *J. Appl. Phys.* **57**(8), 2671 (1985).
- [17] J. C. Brice, *Proc. Cryst. Growth and Charact.* **13**, 39 (1986).
- [18] R. K. Willardson and A. C. Beer, *Semiconductors and Semimetals*, **18**, (Academic Press, New York, 1981), Chap. 2.
- [19] T. Tung, L. V. DeArmond, R. F. Herald, P. E. Hering, M. H. Kalisher, D. A. Olson, R. F. Risser, A. P. Stevens and S. J. Tighe, *J. Electron. Mater.* **22**, 835 (1993).
- [20] S. B. Lee, D. Kim and D. A. Stevenson, *J. Vac. Sci. Technol.* **B9**(3), 1639 (1991).
- [21] O. K. Wu, *Proc. SPIE* **2021**, 79 (1994).
- [22] T. J. Lyon, R. D. Rajavel, J. A. Vigil, W. L. Ahlgren and M. S. Smith, The 1997 US workshop on the Physics and Chemistry of **III-V** Materials, 97 (1997).
- [23] J. E. Jensen, P. D. Brewer, R. D. Rajavel, T. J. Lyon, D. M. Jamba and J. J. Dubray, The 1997 US workshop on the Physics and Chemistry of **III-V** Materials, 15 (1997).