

## II - VI 족 화합물 반도체 (HgCdTe, CdZnTe, Se)의 현황과 응용



홍진기

(고려대학교 공과대학 전기공학과 계약교수)



김선웅

(고려대학교 자연과학대학 물리학과 교수)

### 1. 서론

그 동안 Si 이나 III-VI 화합물 반도체인 GaAs 계열의 그늘에 가려져 잘 알려져 있지 않았던 HgCdTe 나 CdZnTe, Se 계열의 화합물 반도체들은 국내에서는 그 응용성 등이 별로 부각되지 않았고 일부 소수의 연구원들만이 꾸준히 연구하여 왔다. 그러나 선진국에서는 1970년대부터 이들의 연구를 부단히 하여 상당한 수준에 있으며, 현재 연구의 응용성과 그 상업적 부가가치는 매우 높은 반면 일부선진국들만의 독보적인 기술로 알려져 왔다.

이러한 화합물 중 HgCdTe는 중 적외선(3~5  $\mu\text{m}$ ) 및 원적외선 (8~14  $\mu\text{m}$ ) 탐지소자로 물체 자체에서 나오는 빛을 감지한다. HgCdTe는 각종 전투기, 개인화기, 공용화기의 사격통계 장비로 사용되어, 국내에서는 현재 수억 불을 들여 수입하고 있으며, 산업용으로는 물체의 온도분포를 읽어내어 물체표면에서의 결함을 찾아내고, 의료용으로도 신체의 온도분포를 알아내는 진단기법의 하나로 사용되고 있다. 이러한 응용성에도 불구하고 이에 대한 연구는 일부 군에서만 미미하게 연구해 왔고 민간기업에서는 전무한 상태이다. 또한 CdZnTe, Se 계열의 반도체들은 일찍이 의료용으로는 응용성이 대두되어 디지털 X-선 및  $\gamma$ -선 탐지소자로 각광을 받기 시작하여 이미 선진국에서는 이 반도체들을 이용한 각종 제품들이 세계시장에서 수십만 불에서 수백만 불에 판매되고

있는 실정이다. CdZnTe를 이용한  $\gamma$ -선 디지털 카메라는 기존의 광 증폭 관을 대체하여 가격은 기존의 것에 비하여 1/3 ~ 1/6 로 저렴하며, 무게도 1/50 -1/100 로 줄어들었고, 성능도 약 10여배나 우수한 것으로 평가되어 향후 의료시장의 혁명으로 받아들여지고 있고, CdZnTe 및 비정질 Se를 이용한 X-선 디지털 패널 탐지소자는 이미 생산되기 시작하여, 의료용 X-선도 본격적으로 저 선량(low dose) 디지털 시대로 접어들어 수십만 달러에 판매되고 있지만 공급이 부족한 실정이다.

본 논고에서는 적외선 및 방사선 탐지 소자에 사용되는 II-VI 반도체인 HgCdTe, CdZnTe 및 비정질 Se의 응용과 국내의 기술 현황에 대하여 기술 하고자 한다.

### 2. 적외선 탐지 소자 : HgCdTe

#### 2.1 HgCdTe를 이용한 적외선 탐지 소자의 발달 배경

2차 대전 초기부터 적외선 탐지 소자의 필요성은 절대적이라고 생각되어, 그 당시부터 연구가 시작되었다. 그러나, 당시의 적외선 기술은 아주 초기 단계로서 빛을 투사하여 반사된 빛을 감지하는 active infrared image converter 나, 달빛 또는 별빛과 같이 야간의 미약한 자연광을 영상증폭관으로 증폭하여 영상 면에 가시광선으로 나타나게 하는 정도의 1~2  $\mu\text{m}$  범위의 빛을 감지하는 passive infrared image

converter 가 고작이었다. 그 후, 물체 자체에서 직접 발산하는 열선을 탐지하는 것이 보다 바람직하다고 판단되었다. 즉 passive 형의 thermal imaging system 이 필요하였다. 이와 같은 필요를 충족하려면 온도 범위가 약 +90℃ 부터 -70℃ 정도까지를 감지할 수 있는 즉 8-14 μm 정도의 파장 영역을 탐지할 수 있는 소자의 개발이 요구됐고, 이 같은 필요에 따라 개발된 것이 Ge:Hg와 InSb 이다. Ge:Hg는 8~12 μm 정도에서 작동하려면 동작 온도가 30 K 이어야 하는 어려움이 있었고, InSb는 동작 온도가 77 K 정도이나 동작 파장이 3 μm(693℃)~5 μm(307℃)로 8~14 μm 영역에는 적당치가 않았다. 따라서 파장 범위가 8~14 μm 정도가 되며, 동작 온도가 77 K 정도인 반도체가 필요했다. 이와 같은 필요로 등장하게 된 것이 바로 HgCdTe 이다.

**1959년** 영국 RSRE의 W.D Lawson 등에 의하여 II-VI 족 화합물 반도체인 HgCdTe가 처음으로 보고되었고,<sup>(1)</sup>

**1964년**에는 미국의 Honeywell에서 동작 온도가 77 K, 탐지 파장이 8~14 μm인 HgCdTe 탐지 소자의 개발로 HgCdTe를 이용하는 적외선 탐지 소자의 개발이 본격화되기 시작하였다. 이어서

**1968년**에는 영국에서 고감도의 background limited의 성능을 갖는 HgCdTe가 개발되기에 이르렀고,

**1970년**대에 들어와서 그 동안 연구되어 오던 PbSnTe에 비하여 HgCdTe가 단연 월등한 성능으로 적외선 탐지 소자로서의 주도권을 가지게 되면서 HgCdTe의 개발은 본 궤도에 오르기 시작하였다.

**1980년**대에 들어오면서 HgCdTe의 개발은 서서히 성숙의 단계에 이르러 선진 각국에서는 이미 응용과 경제성 검토에 들어갔고, 소자의 개발에 있어서도 거의 한계치에 이르러서 그의 응용성을 군사적인 면 이외에 각종 산업에 연계시키고 있는 실정이다.

**1990년**대에 이르러는 80년대의 덩어리(bulk)형의 HgCdTe에서 박막(thin film)형의 HgCdTe를 MBE나 MOCVD 등으로 성장시켜 소자로서의 제반 가능성을 조사하고 있다.

## 2.2 적외선 탐지 소자 원리 및 응용

뜨거운 물체가 복사선을 낸다는 것은 잘 알려진 사실이며 우리는 그 복사선을 열로서 느낀다. 물체의 온도가 올라감에 따라 처음에는 어두운 붉은색을 내다가 주황색으로 바뀐 다음 마지막에는 "뜨거운 백색"이 된다. 이러한 전자기파의 복사는 모든 온도 영역에서 가능하며, 플랑크의 복사법칙<sup>(2)</sup>에 의하여 주어진 온도에서 일정한 전자기파의 파장 분포를 갖는다. 이때, 복사된 전자기파의 에너지 밀도가 최고가 되는 파장( $\lambda_{max}$ )과 온도( $T$ ) 사이의 관계는 빈의 변위법칙(Wien's displacement law)<sup>(3)</sup>에 의해 다음과 같다.

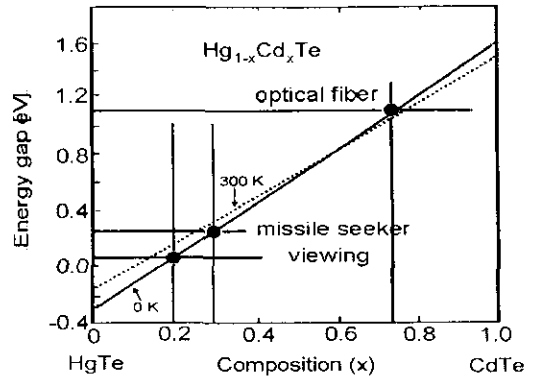


그림 1. Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>의 성분(x)에 따른 띠틈의 변화

$$\lambda_{max} T = 2897.8 \mu\text{mK}$$

위 식에 따르면, 상온( $T = 300 K$ )에서 최대 복사 에너지는 파장이 9.7 μm인 적외선이다. 적외선 탐지 소자는 이러한 전자기파의 복사를 감지하며, 사용하고자하는 대상의 온도 범위에 따라 적당한 반도체 소재를 사용하게 된다. 예를 들어 체온에 해당하는 온도인 36.5℃(310 K) 범위의 열상 장비는 파장이 8~14 μm인 전자기파를 감지 할 수 있는 소재를 사용해야 하고, 미사일추적기(missile seeker)용 소재는 온도가 450℃(724 K) 범위이므로 파장이 3~5 μm인 전자인 전자기파를 감지해야 한다. 그림1에서 보듯이 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te는 Cd 성분(x값)에 따라 띠틈(energy gap 또는 band gap)이 거의 선형적이므로,<sup>(5)</sup> 열상장비, 미사일 추적기, 광통신용 장비 등 다양한 적외선 탐지 소재로 응용할 수 있다.

HgCdTe는 특히 thermal viewer(열상장비)에 응용되고 있는데 본 열상장비는 미국, 영국, 프랑스, 이스라엘, 서독 등의 국가에서 국방성의 연구과제로 채택되어 있고, 이는 각종 소총기(rifle), 공용 화기, 미사일(missile)등은 물론 공중 정찰용 관측 장비인 FLIR(Forward Looking Infrared) 시스템에도 매우 유용하게 쓰이며 더 나아가 인공위성, 독가스 탐지 등 scanner로서도 사용되는 등 그 유용성은 실로 방대하다. 이와 같은 열상장비의 개발은 detector (HgCdTe 등)의 개발과 더불어, detector array의 감소 방법, 그에 따른 주사 방법의 개발, 광학 부품의 정밀 제작, 전자 회로 설계 등이 동시에 연구되어야만 소기의 목적을 달성할 수 있다.

또한, SiO<sub>2</sub>광섬유의 1.3 μm, 1.6 μm, 2~4 μm, 10.6 μm 영역의 탐지 소자 및 광통신에도 매우 유망한 것으로 알려져 있고 medical thermographer, IR분광계, 광물 탐사, 전자 기관(electronic circuit board)의 결합 조사, 공장의 에너지 누출, 경보 장치 등 많은 유용성을 가지고 있다. 한편 이 HgCdTe는 군수 품목으로 되어 있기 때문에 구입에 매우 큰 어려움이 있다.

표 1. 세계 유명 연구실의 HgCdTe 적외선 열영상 센서용 소자 개발 현황

	Laboratory or Company	Pixel No.	Spectral range( $\mu\text{m}$ )	Quality	Remark
Single Band	SOFRADIR (France)	320×256	3.7-4.8 7.7-9.5	D* 6e11 D*1.7e11	LPE
	GEC-Marconi (UK)	2×288 384×288	8-10 3-5	NETD 20 mk	
	Rockwell/Boeing (USA)	2048×2048 (HAWAII-II*2) 1024×1024			heterojunction HgCdTe
	Santabarbara Research Center (USA)	256×256	8.5-11		
Dual Band	Lockheed Martin Vought Systems (USA)	64×64 LWIR, MWIR	3-5, 8-11		MOVPE demonstration
	Santabarbara Research Center (USA)	128×128 MWIR, MWIR	3-5		MBE demonstration

## 2.3 국내외 기술 동향 및 수준

### 2.3.1 국외 기술 동향 및 수준

표 1은 현재 HgCdTe를 이용하여 적외선 개발 중인 외국의 주요 기관을 요약한 것이다. HgCdTe를 이용한 열 영상용 single band FPA(Focal Plane Array)<sup>(5)</sup>에서 가장 앞서있는 곳은 Rockwell/Boeing이다. Rockwell/Boeing에서 제작한 2048×2048(device name : HAWAII-II\*2) FPA는 pixel 숫자에서 세계 최고의 해상도를 자랑한다. 이 이외에 프랑스의 SOFRADIR, 미국의 SBRC(Santa Babara Research Center), Hughes, 영국의 GEC-Marconi 등에서 256×256 정도의 해상도를 갖는 FPA를 생산하여 군수용으로 사용한다. HgCdTe를 사용한 단일밴드용 적외선 소자 기술은 성숙단계에 와 있다고 생각된다. 단일밴드용 소자에 대한 현재의 연구방향은 제조비용을 낮추는 것과 함께 pixel 숫자를 늘이는데 초점이 맞추어져 있다. Pixel 숫자가 많은 소자를 제작하기 위해서는 균일한 조성을 갖는 대면적의 HgCdTe가 필요한데 이러한 대면적 HgCdTe에 대한 기술이 현재 pixel 숫자를 제한하는 가장 큰 요소이다.

현재 차세대 고성능 적외선 감지소자와 관련하여 많은 곳에서 이중밴드 감지소자 개발에 열중하고 있는데 이를 위해서는 다층막의 구조를 가지는 HgCdTe가 필수적이다. 단일밴드 소자제작에 있어서는 LPE 방법을 사용하여 성장한 HgCdTe가 주로 사용되었으나 이중밴드 소자 제작에 필요한 다층막 HgCdTe 제작을 위해서는 MOVPE 혹은 MBE 방법이 사용되어야 한다. 지금까지 MOVPE 혹은 MBE 방법의 문제점은 성장된 HgCdTe의 특성이 LPE 방법으로 성장한 것에 비해 나쁘다는 것이었다. 그러나 Lockheed Mar-

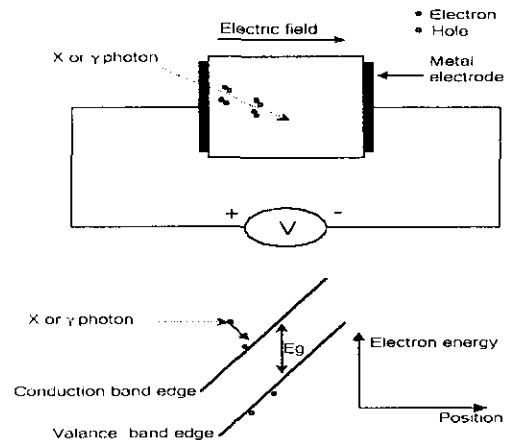


그림 2. CdZnTe나 비정질 Se를 사용한 소자의 방사선과의 상호작용

tin에서는 최근 MOVPE HgCdTe를 사용하여 LPE HgCdTe를 사용하여 제작한 디바이스에 비해 전혀 성능이 떨어지지 않는 64×64 pixel을 가지는 이중밴드(LWIR/MWIR) 소자를 제작하여 발표한 바 있다. 또한 SBRC에서는 MBE HgCdTe를 사용하여 128×128 개의 pixel 숫자를 가지는 MWIR/MWIR 구조의 이중밴드 소자를 prototype으로 개발하였다. Rockwell/Boeing에서도 이중밴드 소자를 개발하고 있으나 아직 연구결과를 발표하지 않고 있어서 구체적인 성능을 알 수는 없다. Lockheed Martin과 SBRC에서 제작하는 이중밴드 소자의 성능을 비교하면 Lockheed Martin에서는 LWIR/MWIR의 구조를

가지는 소자를 제작하며 SBRC에서는 MWIR/MWIR구조의 소자를 제작하는데, LWIR/MWIR의 구조를 가지는 Lockheed Martin의 디바이스가 진정한 의미의 이종밴드 소자라고 생각되며 이들이 제작한 소자의 성능(quantum efficiency, D\* 등)도 SBRC의 것에 비하여 우수하다. Lockheed Martin에서 MOVPE 방법으로 성장하는 다층막 HgCdTe의 특성은 LPE의 것에 비해 거의 비슷한 수준에 도달한 매우 우수한 것으로 생각된다.

### 2.3.2 국내 기술 동향 및 수준

국내에서 적외선 열영상 센서 재료를 연구하는 기관은 고려대학교, 한국과학기술연구원, 동국대학교가 있다. 고려대학교에서는 THM<sup>(6)</sup>과 LPE<sup>(7)</sup>방법으로, 한국과학기술연구원에서는 LPE와 MOVPE<sup>(8)</sup>방법으로, 동국대학교에서는 MBE 방법으로 각각 HgCdTe 반도체의 제조 공정을 개발하였다. 개발된 방법으로 제조된 HgCdTe 재료는 비교적 우수한 특성을 가지고 있다. 한편 적외선 열영상 센서에 대한 연구는 한국과학기술연구원, 한국과학기술원, 국방과학연구소, 한국전자(주), 경북대학교에서 수행하고 있다. 한국과학기술원에서는 최근에 한국전자(주)와 공동으로 MWIR 적외선을 감지하는 128×1 열영상 센서를 개발하였으며 이를 이용하여 열영상을 얻은 바 있다. 그러나 아직 상용화 단계는 아니며 센서 제작을 위한 HgCdTe 재료는 전량 수입에 의존하고 있다.

## 3. 디지털 X선 및 $\gamma$ 선 탐지 소자: CdZnTe, Se, ...

### 3.1 방사선 탐지 소자의 원리 및 소자화 요구 조건

일반적으로 방사선 탐지 소자로 사용되는 모든 반도체 소자는 입사 방사선과 반도체 내부의 어떠한 상호작용을 통하여 발생하는 전하펄스(charge pulse)를 감지하여 작동한다. 이러한 전하펄스는 전자(electron)과 정공(hole)로 이루어졌으며, 외부에서 인가된 전기장에 의하여 전류로서 신호화

된다, 그러므로 소자의 성능은 전하가 생성되는 반도체 내부와 입사하는 방사선과의 상호 작용, 전하가 여기 되는 효율, 여기된 전하가 수집되는 효율, 전하펄스를 신호화하는 회부회로, 소자의 잡음(noise)등에 의해 좌우된다.<sup>(9)</sup>

그림 2는 CdZnTe나 비정질 Se를 사용한 소자의 방사선과의 상호 작용을 나타내는 개략도이다. 입사된 방사선은 반도체 내부에 많은 양의 전자·정공 쌍을 생성하며, 이들은 인가된 전기장에 의하여 급속진극으로 이동하여 신호화된다. 반도체를 이용한 방사선 탐지 소자는 일반적으로 비교적 작은 에너지로도 반도체 내부에 전자·정공 쌍을 형성할 수 있으며, 높은 양자효율(quantum efficiency)<sup>(10)</sup>을 가진다. 방사선 탐지 소재로 사용되는 반도체에 요구되는 물성의 조건을 요약하면 다음과 같다.

- ① 양자 효율을 높이기 위한 큰 원자 번호(Z)
- ② 작은 누설 전류를 위한 큰 비저항 및 큰 띠틈(band gap)
- ③ 높은 전하 수집율을 위한 큰 이동도·운반자 수명 곱( $\mu \tau$  product)
- ④ 입사한 방사선에 대하여 많은 전자·정공 쌍을 생성시키기 위한 작은 전자·정공 쌍 생성 에너지(electron·hole pair creation energy)
- ⑤ 소자에 요구되는 두께와 면적을 같은 고순도, 높은 균질성 및 결함이 없는 반도체

표 2와 표 3은 이러한 요구 조건과 방사선 탐지소재의 물성을 정리한 것이다.

### 3.2 방사선 탐지 소자의 응용

#### 3.2.1 진단용 의료기기 분야

진단용 의료기기의 최근 동향을 살펴보면 X선 및 감마선을 이용한 실시간(real-time) 동영상 촬영장비의 개발이 활기를 띠고 있다. X선 촬영장비의 경우 film형에서 NaI 혹은 CsI를 대표로 하는 scintillator로 발전하였고 차세대 감지물질

표 2. X선과  $\gamma$ 선 탐지소재에 요구되는 물리적 성질

Parameter	Requirements	Related functions
Atomic number(Z)	$Z > 40$	high stopping power high sensitivity low energy detection
Energy gap( $E_g$ )	$1.4 < E_g[\text{eV}] < 2.2$	low dark current
Resistivity( $\rho$ )	$\rho > 10^{9-11} \Omega \text{cm}$	low leakage current
Mobility( $\mu$ ) & lifetime( $\tau$ )	$\mu\tau > 1 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{V}$	high charge collection high energy resolution
Trap density( $N_T$ )	$N_T < 5 \times 10^8 \text{cm}^{-3}$	high lifetime charge collection

표 3. X선과  $\gamma$ 선 탐지소자에 사용되는 재료의 물리적 성질. 여기서  $E_{\text{pair}}$ 는 전자 정공쌍 생성 에너지

Material	Atomic number	Band gap(eV)	$E_{\text{pair}}$ (eV)	Resistivity ( $\rho$ cm)	$\mu\rho$ ( $\text{cm}^2/\text{V}$ )
HgI <sub>2</sub>	80,53	2.13	4.2	$10^{13}$	$1.0 \times 10^{-4}$
Ge	32	0.67	3.0	50	1
Si	14	1.1	3.6	$10^4$	$2.7 \times 10^{-2}$
비정질 Si	14	1.8	4.8	$10^{8-10}$	$1.0 \times 10^{-7}$
비정질 Se	34	2.2	50.0	$10^{12-16}$	$2.0 \times 10^{-7}$
PbI <sub>2</sub>	82, 53	2.3	4.8	$10^{12}$	$1 \times 10^{-6}$ ('98)
CdZnTe	48,30,52	1.5~2.2	5.0	$10^{11-12}$	$1.0 \times 10^{-4}$

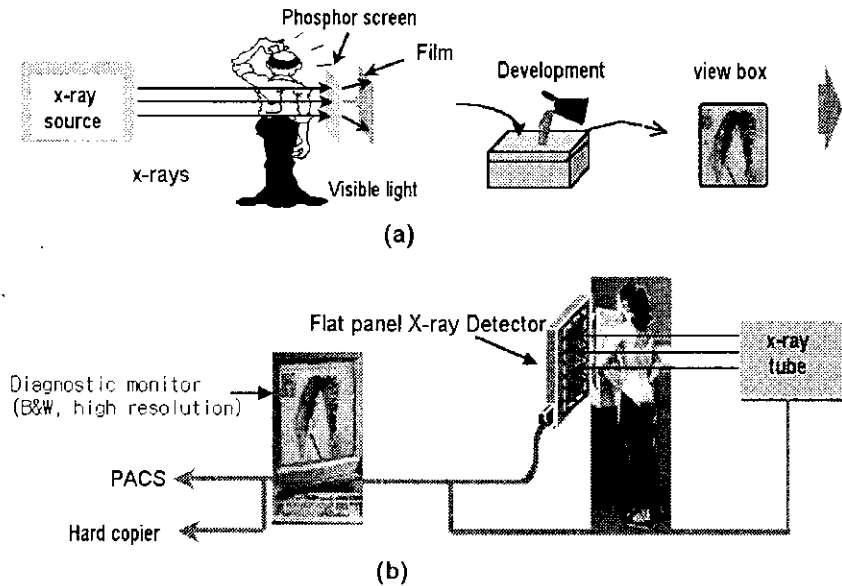


그림 3. (a) Film형 X선 촬영 장비와 (b) CdZnTe, 비정질 Se, PbI<sub>2</sub> 등을 이용한 flat panel 형 X선 촬영장비의 개략도

로서 Si, Ge, HgI<sub>2</sub> 등의 발전과정을 거친 후 최근 들어 상당히 우수한 물질로 평가 받는 CdZnTe, 비정질 Se, PbI<sub>2</sub> 등으로 연구 개발의 방향이 발전하고 있는 중이다. 그림 3는 film형 X선 촬영 장비와 CdZnTe, 비정질 Se, PbI<sub>2</sub> 등을 이용한 flat panel형 X선 촬영 장비의 비교를 위한 개략도이다.

진단 장비중에서 유방 X선 조영상 (digital mammography)에 의한 유방암의 조기 진단을 위한 연구 개발이 활발히 진행되고 있으며, 심장 혹은 뇌와 같은 장기의 단층촬영은 일반적으로 MRI (magnetic resonance imaging)가 보편적으로 사용되고 있으나, 이 방법은 단지 물질의 구조에 관한 정보만을 얻을 수 있다. 이와 같은 응용에 사용되는 장비로 dental X-ray imager, bone densitometry, CT (computerized tomography), PET (positron emission tomography) 및 SPECT (single-photon emission computed tomography) 등에서도 지난 시대의 scintillator를 이용한

장비보다 공간분해능 및 전하수집효율 등이 우수하고 상온에서 작동이 가능한 물질 개발로의 전환 시기에 직면하였다.

새로운 물질의 개발이 요구되자 TiBr, PbI<sub>2</sub>, CdTe, CdZnTe, 비정질 Se 등의 물질에 대한 연구가 보다 활발히 진행되고 있으며, 이러한 물질 가운데 기존의 scintillator를 이용하여 얻을 수 있던 디지털 이미지보다 뛰어난 공간 분해능 및 에너지 분해능 등에 의해 보다 세밀하고 안전한 디지털 이미지를 얻을 수 있는 물질로서 CdZnTe 및 비정질 Se의 우수성이 인정되었고 이의 개발에 관심이 집중되고 있다. 또한 동영상을 얻을 수 있고 3차원 화상(image) 및 단순한 조직(tissue)의 구조에 관한 정보뿐만 아니라 조직 혹은 장기(뇌, 심장 등)의 기능(function)을 관찰할 수 있기 때문에 새로운 차원의 진단 능력을 확보할 수 있다.

감지소자를 이용한 진단장비의 발전과 더불어 반드시 요구되는 것이 방사선 피폭량 (radiation dosimetry)을 측정하

표 4. 현재 CdZnTe 및 PbI<sub>2</sub>를 이용하여 방사선 탐지기를 개발 중인 외국의 기관

Material	Laboratory or Company Digirad (USA)	Remark γ-ray detector 개발 중
CdZnTe (Bulk)	Cardiac Mariners with eV Product (USA)	Digital Angiography
	Lunar Corp. (USA)	Bone Densitometry 완료
	National Panasonic (Japan)	Bone Densitometry 완료
	Hamamatsu (Japan)	개발중
CdZnTe (Film)	Spire Corp(USA) + Norranda (Canada) + Univesity of Toronto (Canada)	개발중
	National Panasonic (Japan)	개발중
	Hamamatsu(Japan)	개발중
	Toshiba(Japan)	
PbI <sub>2</sub> (Film)	Xerox Co.(USA)	개발중

는 것이다.<sup>[11]</sup> 현재 각 병원 등에서는 환자에게 방사선을 노출시킬 경우에 환자의 환부 등의 중요한 부위로의 방사선 피폭량을 측정하기 위한 검출기(radiation dosimeter)을 사용하는 경우는 상당히 드물다. 이는 기존의 검출기들을 통해 높은 해상도를 얻기 위해서는 많은 량의 방사선을 환자에 조사(exposure)해야 한다. 하지만 CdZnTe등을 이용한 검출기의 제작이 실용화될 경우에 환자에게 조사하는 피폭선량을 1/5 ~ 1/10 이하로 줄일 수 있게되며 과도한 노출에 의해 환자에게 발생할 부작용을 피할 수 있게된다. 이러한 경우에 환자에게 조사하는 방사선량을 측정하는 것은 필수적인 문제가 된다. 환자의 환부에 따라서 구성조직(tissue)이 상이하므로 조사량도 달라져야 하며 이를 조절하기 위해서는 반드시 피폭량 검출기를 이용해야한다. 이와 같이 CdZnTe 및 비정질 Se를 이용한 방사선 검출기의 제작은 다양한 의료 진단 장비에 응용될 수 있고, 향후 많은 의료 진단 장비를 대체할 물질로 세계적으로 인정 받고 있다.

### 3.2.2 원자력 발전소 및 방사광 가속기 분야

현재 세계적으로 원자력 발전소의 건조가 상당히 많이 진행 중에 있다. 이는 원자력의 높은 에너지 효율을 이용하여 과거 석회연료를 사용한 경우보다 여러 가지 면에서 장점을 갖기 때문에 각광을 받고 있는 것이다. 그러나 원자력 발전소는 높은 유용성에 대조적으로 방사능 누출과 같은 위험이 내재되어 있다. 과거 구 소련의 체르노빌과 같은 원자력 발전소에서의 방사능 누출은 인간에게 막대한 피해를 입혔으며, 발전소에 근무하는 직원들에게는 항시 이와 유사한 위험이 도사리고 있다.

최근 새롭게 등장하는 고출력 X선원(High intensity X-ray sources)에 의한 광선속 (photon fluxes)을 이용하는

가속기인 European Synchrotron Radiation Facility, ANL에 소재 하는 Advanced Photon Source (APS), 그리고 일본에 소재 하는 Spring-8 과 같은 매우 밝은 광원 (photon sources)의 사용과 함께 이러한 문제는 더욱 민감하게 되었다. 따라서 당면한 문제 중에서 가장 시급한 것이 고에너지 방사선을 효과적으로 감지할 수 있는 물질의 개발이다. 이러한 고에너지 방사선의 감지 분야에 빠른 감지 속도, 높은 정지력 (high stopping power)을 갖고, 상온에서 작동이 가능한 CdZnTe<sup>[12]</sup> 및 비정질 Se가 응용될 수 있다.

### 3.2.3 군사 분야

원자력 발전의 발전과 더불어 원자폭탄이 군사적 용도로 개발되어 왔다. 이러한 대량 살상 무기는 매우 위험하며 폭발과 함께 발생하는 다량의 방사능으로 인하여 인명에 막대한 피해를 입히게 된다. 따라서 원자폭탄의 폭발을 빠른 시간에 감지하고, 피폭지역의 방사선량을 관찰하기 위해서는 방사선 계수기가 필수적으로 요구된다. 특히 전쟁지역 등에서는 병사들이 휴대용으로 운반이 용이하고 크기가 작아야 하며, 감지 특성이 우수해야 한다. 이러한 분야에 높은 정지력 및 전하수집효율(charge collection efficiency)이 뛰어난 CdZnTe 및 비정질 Se가 응용될 수 있다.

## 3.3 국내외 기술 동향 및 시장성

### 3.3.1 국외 기술 동향

근래의 세계적인 동향을 보면 고에너지 X선원 (X-ray sources)의 개발과 함께 이를 감지할 수 있는 새로운 물질이 필요하게 되었다. 이에 따라 최근 CdZnTe, 비정질 Se, PbI<sub>2</sub>에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 예를 들어 1995년부터 1997년 10월 말 미국에서 개최된 적외선 감지소자

HgCdTe에 관련한 workshop 에서 X선 및 선 감지소자에 대한 연구보고가 한 분야로 설정되어진 것을 볼 수 있다. 특히 미국의 Santa Barbara 연구소 및 Rockwell, Texas Instrument 등은 오래 전부터 HgCdTe에 관해 많은 연구결과를 발표한 곳으로서 HgCdTe를 연구하던 이점을 기반으로 방사선 탐지소자 분야에 대한 연구를 활발히 진행하고 있다. 프랑스의 CNRS의 PHASE 실험실은 예전부터 CdZnTe에 대해 20년이상을 연구해오고 있는 곳으로 상당한 연구 성과를 보이고 있는 곳이다. 이밖에도 수십년동안 HgCdTe에 관해 연구하는 이스라엘과 일본 등이 새로운 물질로 부각되는 CdZnTe, 비정질 Se 및  $PbI_2$  방사선 탐지기에 많은 연구를 진행하고 있다. 뿐만 아니라 1998년 10월에 열렸던 U. S. II-VI semiconductor workshop을 보면 적외선 감지소자와 더불어 X선 및 선 감지소자도 workshop의 주제로 채택되어 방사선 탐지 소자용 물질 개발에 대해 많은 연구결과가 발표되고 있으며, 이외에도 SPIE, MRS 등과 같은 학회를 통해 많은 연구 결과가 발표되고 있음을 볼 수 있다. 이러한 국제학회의 동향을 살펴보면, 최근 들어 이 분야에 대한 선진각국의 연구노력이 더욱 활성화되고 있음을 알 수 있다. 표4는 현재 CdZnTe 및  $PbI_2$ 를 이용하여 방사선 탐지기를 개발 중인 외국의 경우를 정리한 것이다. 비정질 Se의 경우, DRC, Toshiba, Kodak, Sharp, Shimadzu 등에서는 비정질 Se flat panel x-ray detector를 개발 중이고, 그 외에도 GE, Canon, Trixell, Swiss-ray, Wuestec, Cares 등의 회사에서 이미 상품화 하였거나, 개발 중에 있다.

### 3.3.2 국내 기술 동향

국내에서도 많은 기관에서 의료용 진단 장비를 개발하기 위해서 노력하고 있으며 최근 그 연구 활동이 활발해짐을 알 수 있다. 이 중에서 방사선 탐지 소자 개발 분야를 살펴보면 과거 선진국가에서 개발을 완료하고 상품화하여 판매 중에 있는 scintillation을 이용한 물질의 연구 단계에 머물고 있다. 그러나 선진국에서 몇몇 국가에 한정되어 개발하고 있는 CdZnTe, 비정질 Se 및  $PbI_2$  탐지기는 아직 시작단계에서 개발단계로 넘어가는 중이므로 국내에서 이에 대한 연구 개발을 시작한다면 지금이 최적기라 판단된다.

국내에서 X선 탐지 소자에 대해서는 많이 연구되고 있지 않은 실정이며, 선진국에서는 이미 몇몇 대학이나 연구기관에서 현재 개발 완료된 비정질 Si 혹은 비정질 Se에 대한 초기 연구를 수행하고 있는 것으로 알려지고 있다. 하지만 이는 선진 외국 연구기관에 비해 그 시작이 약 10 여년 뒤쳐져 있다. 21세기를 주도할 물질로서 주목을 받는 CdZnTe,  $PbI_2$ 의 경우 국내에서 연구하고 있는 곳은 없는 상태이다. 디지털 X선 유발 조영상 시스템을 구축하기 위한 반도체 물질로서의

대면적 CdZnTe thick film은 아직 발표된 바가 거의 없으며 일부 선진국가에서도 연구가 진행중인 것으로 알려졌다.

### 3.3.3 CdZnTe 및 비정질 Se를 이용한 디지털 X선 및 $\gamma$ 선 탐지 소자의 시장성

현재 국내 의료분야에서 디지털 X선 탐지기를 장착한 의료기기는 전량 외국에서 수입하고 있으며, 수십 만불에서 수백 만불의 높은 가격을 주고 구입하고 있다. 제품의 수명은 5~10년 정도이고 전국의 종합병원의 개수를 고려해볼 때 만일 디지털 X선 탐지기를 이용한 의료기기를 국산화한다면, 수입대체 효과를 통하여 많은 외화를 절약할 수 있을 것이다. 1999년 현재 X선을 이용한 세계 의료기기 시장이 1.5 Billion Dollars에 이르고 있으며, 원자력 발전소 및 방사선 가속기 장치에서의 수요, 그리고 군사적 측면에서의 요구에 이르기까지 다양한 분야를 고려하면 엄청난 부가가치를 지니고 있음을 예측할 수 있다.

또한 CdZnTe 및 비정질 Se를 이용한 21세기 차세대 기술은 일부 선진국가에서도 개발을 시작하는 단계에 있으므로 이러한 기술의 국내 기술 확보는 상대적 수입대체 효과를 얻을 수 있을 것이다. 그리고 CdZnTe를 이용한 방사선 계수기의 시급한 개발은 곧 엄청난 수요의 세계시장을 선도할 수 있는 기술로서 수출을 통한 국가 경제 기여도는 메모리 반도체를 수출하여 얻는 이익을 능가할 것으로 예측된다. 또한 연계 산업계의 발전 및 활성화에 기여하게 될 것이다.

## 4. 향후 전망

현재 고감도 산업용 및 군사용 적외선 열영상 시스템에서는 HgCdTe나 InSb 반도체를 이용한 적외선 센서가 독점적으로 사용되고 있다. 앞으로 고품위(높은 해상도, 여러 파장대의 적외선을 동시에 검출하는 이중밴드 감지소자)의 열영상 시스템 제작을 위해서는 양질의 다층막 HgCdTe 제조기술, 다층막 구조의 반도체를 이용한 적외선 센서구조의 설계 및 제작 기술이 필요하다. 국내에서는 이러한 열 영상 시스템을 제작하기 위해서 적외선 열 영상 센서를 이스라엘이나, 프랑스의 SOFRADIR 등에서 구입하고 있다. 적외선 열 영상 센서의 전 세계의 시장 규모는 연간 50 억불 정도이고 우리 나라는 이보다 훨씬 적은 약 1 억불 정도로 예상된다.

향후 적외선 센서 기술개발은 IR 센서의 집적화를 증가시키고 생산 단가를 낮추는 방향으로 전개 될 것이고, 이에 따라 IR 센서의 분해능이 증가하고 선명한 화상을 얻게 될 것이고 가격이 저렴해짐에 따라 군사용뿐만 아니라 의료기 산업, 전자산업, 제강 공업 등의 일반 산업 분야에서의 응용도 확대될 것이다. 그리고 이 기술과 밀접히 관련 있는 적외선 영상 시스템 또는 부품의 5년 후의 세계시장 및 국내시장 구

모는 100 억불 정도로 예상된다.

CdZnTe 및 비정질 Se를 이용한 방사선 검출기의 제작은 다양한 의료 진단 장비에 응용될 수 있다. 즉, 유방암의 조기 진단을 위한 유방 X선 조영상 (digital mammography), dental X-ray imager, bone densitometry, X-ray CT (computerized tomography), PET(positron emission tomography) 및 SPECT (single-photon emission computed tomography) 등에서 기존의 scintillator를 이용한 장비보다 공간분해능 및 전하수집효율 등이 탁월하고 상온에서 작동이 가능하며, 향후 대다수의 의료 진단 장비를 대체할 물질로 세계적으로 인정 받고 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] W. D. Lawson, S. Nielsen, E. H. Putley and A. S. Young, "Preparation and Properties of HgTe and Mixed Crystal of HgTe-CdTe", *J. Phys. Chem. Solids*, 9, pp.325, 1959.
- [2] E. . Dereniak and G. D. Boreman, *Infrared Detectors and System*, John Wiley & Sons, INC. p. 55-72, 1996.
- [3] J. L. Powell and B. Crasemann, *Quantum Mechanics*, Addison-Wesley Publishing Company, p. 1-10, 1985.
- [4] G. L. Hansen, J. L. Schmit and T. N. Casselman, "Energy Gap Versus Alloy Composition and Temperature in Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te", *J. Appl. Phys.* 53(10), pp. 7099, 1982
- [5] V. Dhar , R. K. Bhan and R. Ashokan, "A New 2-D Model for Operating Point Shift in Large LWIR HgCdTe FPAS", *IEEE Transactions on Electron Devices*, 45(2), pp. 487-493, 1998.
- [6] 김봉진, "THM에 의한 HgCdTe 단결정 성장과 결정 성장 모의 실험 연구", 박사 학위 논문, 고려대학교, 1993.
- [7] 심정철, "LPE 방법에 의한 HgCdTe 박막 단결정의 단일/이중접합 구조 성장", 박사 학위 논문, 고려대학교, 2000.
- [8] 송종형, "MOVPE 방법에서의 in-situ 도핑된 다층 구조 HgCdTe 성장과 photodiode 제작", 박사 학위 논문, 고려대학교, 1999.
- [9] T. E. Schlesinger and R. James, *Semiconductors for Room Temperature Nuclear Detector Applications (Semiconductors and Semimetals Vol. 43)*, Academic Press, p.336-378, 1995
- [10] J. Singh, *Semiconductor Optoelectronics*, McGraw-Hill, Inc. p. 336-344, 1995.
- [11] O. H. Suleiman, S. H. Stern and D. C. Spelic, "Patient Dosimetry Activities in the United States: The Nationwide Evaluation of X-ray trends (NEXT) and Tissue Dose Handbooks", *Applied Radiation & Isotopes*, 50(1), pp. 247-259, 1999.
- [12] S. H. Lee, I. J. Kim, Y. J. Choi, Y. W. Jun, J. K. Hong, H. K. Lee, S. U. Kim and M. J. Park, "The Comparison on the Performance as a  $\gamma$ -ray Spectrometer with the Variation of Pt(Au)/CdZnTe/Pt(Au) Interface", *J. Crystal Growth*, to be published.