



양자형 반도체 기반 적외선 검출 소재 기술

글 _ 이상준
한국표준과학연구원

1. 서론

지구상의 모든 물체는 일정한 온도 또는 온도분포를 가지고 있고, 물체를 구성하고 있는 물질의 방사율(emissivity)과 온도 분포에 따라 특정한 적외선(IR)을 방사한다. 적외선 검출 기술은 물체에서 방사하는 복사열(적외선)을 검출하여 물체의 온도를 측정하거나 방사 또는 흡수 스펙트럼 분석을 통해 물질의 구성 성분을 판별하고, 또한 가시광선이 전혀 없는 환경에서 물체의 형태를 식별하여 영상화 하는 등의 기술을 의미한다. 현재 적외선 검출기술은 인공위성 지상관측, 유도미사일 추적장치, 무인기 감시정찰 장치 등과 같은 군사용부터 누열/누전 감식센서, 잔불 감시장치, 의료용 체열진단기, 비분산 적외선 가스센서, 기상관측 등 민수용에까지 그 응용분야가 폭넓게 확대되고 있다.

Fig. 1에서 보듯이 적외선은 파장으로는 740 nm (주파수 430THz)에서 1 mm (주파수 300 GHz)에, 광에너지(photon energy)로는 1.24 meV에서 1.7 eV에 해당되는 넓은 대역의 전자기파로 파장 대역에 따라 근적외선(Near-infrared, NIR, 0.7-1.4 μm), 단파장적외선(short-wavelength infrared, SWIR, 1.4-3 μm), 중파장 적외선(mid-wavelength infrared, MWIR, 3-5 μm), 장파장 적외선(long-wavelength infrared, LWIR, 8-14 μm), 그리고 원적외선(far-infrared, FIR, 15-1000 μm)으로 구분된다. 온도를 가지고 있는 물체가 방사하는 적외선 또는 결합 분자가 흡수하는 적외선은 파장 대역 분류 중 단파

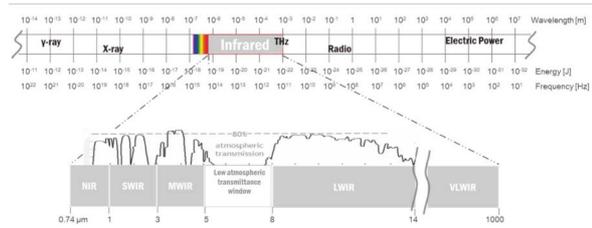


Fig. 1. Infrared in relation to electromagnetic spectrum.

장, 중파장, 장파장에 해당되며 앞서 기술한 응용 분야의 적외선 검출은 바로 1.4-15 μm 대역의 적외선, 즉 80-900 meV의 광에너지를 검출하는 기술을 의미한다.

적외선을 감지하는 방법은 검출하는 물리량에 따라 크게 열형(thermal type)과 양자형(quantum type)으로 구분된다. 이 중 양자형은 동작 방식에 따라 다시 광전도형(photoconductive type, PC)과 광전압형(photovoltaic type, PV)으로 구분된다. 일반적으로 상용화된 적외선 검출기를 구분할 때 검출기의 동작온도에 따라 비냉각형과 냉각형으로 분류하기도 하는데 상온에서 동작시키는 열형 검출기를 비냉각형, 냉각기를 사용하여 저온에서 동작시키는 양자형 검출기를 냉각형으로 보면 된다. Table 1은 현재 단/중/장 파장 적외선 각 대역에서 사용되는 대표적인 열형, 양자형 적외선 검출기의 종류를 나타낸다.

Table 1. Classification of Infrared Detector

동작원리	단/중/장 파장 적외선 검출기 종류	
열형 (비냉각형)	Thermopile, Bolometer, Pyroelectric, Golay cell	
양자형 (냉각형)	광전압형	HgCdTe, InSb, T2SL, InAs, InAsSb, Extended-InGaAs
	광전도형	HgCdTe, InSb, QWIP, QDIP, PbS, PbSe

열형 적외선 검출기의 동작은 적외선 흡수에 의한 소재의 열적 효과, 즉 온도변화를 기반으로 한다. 강유전체가 상변이점인 큐리온도 부근에서 전기분극의 변화가 커지는 초전형 적외선 검출기, 초미세가공으로 박막의 저항체를 형성하고 온도변화에 따른 전기저항의 변화를 측정하는 마이크로볼로미터, 두 가지 금속을 고리모양으로 접합하여 접점 사이의 온도 차이로 발생하는 열기전력 측정하는 열전쌍 등이 이에 해당된다. 열형 검출기의 대표적 특성은 넓은 파장대역에 걸쳐 감도가 있으며 냉각이 불필요하다는 장점이 있다. 반면에 온도 변화를 기반으로 하기 때문에 반응속도가 느리고 검출능력이 상대적으로 낮은 단점이 있다.

양자형 적외선 검출기의 동작은 적외선 광자와 반도체 물질 사이의 상호작용에 의하여 발생하는 전류 또는 전압의 변화를 기반으로 한다. 조성의 변화를 통해 반도체 밴드갭 에너지를 조절하여 반응 파장 영역을 제어할 수 있는 II-VI 족 화합물인 HgCdTe (mercury cadmium telluride, MCT), 단/중 파장 대역의 에너지 밴드갭을 가지고 있는 III/V 족 화합물 반도체 박막인 InGaAs, InAs, InSb 등이 있으며, 이중 화합물 반도체소재로 형성한 양자우물 (quantum well), 양자점 (quantum dot), 초격자 (superlattice)와 같은 양자 구조에서 적외선 에너지에 해당하는 양자 준위를 형성하여 입사광에 따라 광전류를 발생시키는 QWIP (quantum well infrared photodetector), QDIP (quantum dot infrared photodetector), T2SL (Type II superlattice) 등이 최근 상용화되어 사용되고 있는 대표적인 양자형 적외선 검출기에 해당한다. 양자형 적외선 검출기는 열적 잡음에 민감하여 대부분 동작 온도를 낮춰야 하는 단점이 있지만 광자에 의해 반응하므로 열형에 비해 반응속도가 매우 빠르며 검출능력도 매우 높아 고속, 고감도를 요구하는 군수용 시스템에는 대부분 양자형 검출기가 사용되고 있다.¹⁻⁵⁾

본 글에서는 양자형 적외선 검출기의 연구개발 동향을 살펴보고 양자형 적외선 검출 소재 중 비교적 최근에 연구가 시작되어 현재도 선진국에서 성능향상을 위해 활발히 연구가 진행 중인 양자우물 적외선 검출기 (QWIP)와 양자점 적외선 검출기 (QDIP), 그리고 제 2형 초격자 검

출기 (T2SL)를 중심으로 양자형 검출소재의 동작원리 및 특성을 소개하고, 적외선 검출소재에 대한 앞으로의 연구동향에 대해 간단히 언급한다.

2. 양자형 적외선 검출기 연구개발 동향

최초의 실용적인 양자형 검출소재는 1821년 Seebeck 이 반도체성을 입증한 PbS (lead sulfide) 반도체로 실현되었다. 1933년 베를린 대학의 Kutzscher는 PbS가 광전도성 (PC)을 가지고 있고 3 μm 영역까지 반응할 수 있음을 발견하였으며, 이를 기초로 개발된 PbS 셀은 2차 세계대전 중 다양한 장비에 실장되었다. 1940-50년대에는 PbS보다도 더 넓은 파장영역에서 반응하고 3~5 μm 에서 민감하게 반응하는 PbSe, PbTe, InSb 등이 개발되었으며, extrinsic PC 감응에 의해 8~14 μm 와 14~30 μm 의 LWIR에서 동작하는 Co, Zn, Au 등의 불순물이 첨가된 Ge 검출소재가 출현하였다. 1950년 말 영국의 Lawson 은 반도체의 밴드갭 에너지를 (bandgap energy)를 조절할 수 있는 물질로서 II-VI족 화합물인 HgCdTe (MCT) 물질을 소개하였는데, MCT는 현재 사용중인 장파장 적외선 검출소재 중 검출률 (detectivity, D^*)이 가장 높은 물질로 알려져 있다.⁶⁾

1950년대의 적외선 검출소재는 트랜지스터 (transistor)의 집적화에 따른 묘화기술 (lithography)의 발달과 더불어 1960년대부터는 1차원 (1D) 선형 배열의 적외선 검출소재 소자를 제작하고자 하는 노력이 시작되었으며, PbS, PbSe, InSb에 가장 먼저 적용되었다.⁷⁻⁹⁾ 특히, 90 meV의 활성화 에너지를 가지는 extrinsic Hg-doped Ge 을 이용한 1D 적외선 검출소재는 LWIR 영역에서 동작하는 최초의 열상소재로서 그 당시로는 획기적인 발명이었다.¹⁰⁾ 비록 Ge:Hg이 extrinsic 검출기로서 25 K의 2개의 냉각장치를 필요로 하는 단점이 지니고 있었지만, 최초의 새로운 차원의 검출기였다는 점에서 매우 중요한 의미를 갖고 있다. 1970년 전후에는 intrinsic MCT를 이용한 선형배열의 PC형 검출기가 개발되었는데, 이것은 소형이고 에너지 소모가 매우 적으며, 검출기를 하나의 냉각장치로 80 K에서 동작시킬 수가 있어서, 선형배열



LWIR 적외선 검출소자 개발을 가속화시키는 중요한 전기가 되었다. 특히, 선형 배열 MCT는 지금까지 20여 년 동안 LWIR 영역의 열상장비 발전을 주도하여 왔으며, 미사일 추적장치, 기상관측 위성 등에 탑재되어 다양한 응용분야를 창출해 내는데 큰 기여를 하였다. 1세대 선형 배열 적외선 열상장비는 전단에 증폭기 (amplifier)를 부착하여 사용하였는데, 이 구조는 배열을 구성하는 각각의 화소 (pixel)에 냉각장치를 통하여 신호선을 하나씩 공급하여야 하므로, 배열을 구성하는 화소수가 약 200개 이하로 제한될 수밖에 없는 단점을 지니고 있다. 영국에서 개발된 SPRITE 검출기는 filament of bars라고 불리는 길고 얇은 10개 정도의 배열 MCT를 사용하였는데, 단일 검출기 화소 내에서 신호의 시간 지연 (delay)과 누적 (integration)을 결합하는 방식으로 전기적 신호의 전달속도와 열상장비의 신호를 일치시키는 기술을 적용함으로써 신호선의 수를 줄일 수가 있었다.

1970년대에 개발된 CCD는 검출기의 수많은 배열로부터 나오는 신호를 multiplexing하는 초점면 아날로그 전기신호 독해장치 (on-focal-plane electric analog signal readout)에 채용됨으로써 소형의 2세대 검출기 제작을 가능하게 해 주었다.¹¹⁾ 높은 임피던스의 검출소자는 독해 회로 (ROIC) multiplexer의 FET 입력단과 연결할 때 임피던스 결합특성이 좋기 때문에, PtSi Schottky barrier, InSb, MCT와 같은 광기전력 (PV)형 검출기나 PbSe, PbS, extrinsic Si와 같이 높은 임피던스를 가지는 PC형 검출기에만 사용될 수가 있었다. PC형의 MCT는 임피던스가 낮아서 에너지 소모가 크고 독해회로와의 결합특성이 좋지 않기 때문에, 1980년도 전후에는 ROIC와의 결합특성이 우수한 높은 임피던스의 PV형 MCT 소자에 관한 연구개발이 집중적으로 이루어져, [640 × 480] hybrid MCT 초점면 배열소자 (FPA)와 같은 고해상도의 2세대 적외선 검출소자 개발이 1990년대에 이루어지게 된다.

FPA 검출기에서는 보통 scan할 때 상당히 복잡한 시간 지연 후 누적 (TDI) 방식이 사용된다. 이 방식은 신호 세기는 소자의 개수 (n)에 비례하고 잡음은 검출소자 수의 제곱근 ($n^{1/2}$)에 비례하기 때문에 감도와 분해능을 높일 수 있다는 장점이 있으나, 많은 균질의 소자를 하나의

기판 위에 제작해야 하기 때문에 생산성이 낮고 초점면이 넓어지는 약점을 지니고 있다. FPA에서 발생하는 이와 같은 단점을 보완하기 위한 ROIC와 적외선 검출소자를 집적하는 기술이 1990년도에 완성되게 되는데, CCD가 나온 후 거의 20년이 소요되었다. 수십 만개의 검출소자와 전자회로들이 불과 수 cm^2 기판에 집적되어 있는 2세대 검출기는 한 개의 검출소자와 부대 전자회로가 수 cm^2 의 면적을 차지하는 1세대 검출기와 비교해 보면, 엄청난 기술적 발전이 이루어졌음을 알 수가 있다. 현재 집적화 FPA 검출소자는 PbS, PbSe, InSb, extrinsic Si, PtSi, MCT, QWIP, QDIP, T2SLIP 등에 적용되어 열상장비에 사용되고 있다.

MCT 에피의 불안정성 및 대면적 배열의 난점을 보완한 새로운 소자로, 파장변조가 자유로운 고효율의 양자우물 (QW)을 활성층으로 이용하는 QW 적외선 검출소자 (QWIP)에 대한 연구가 지난 1990년도부터 급속히 이루어져 왔다.^{12,13)} GaAs/AlGaAs 등 III-V족 화합물에 기초한 QWIP는 기판 성장법과 소자 공정기술이 Si 다음으로 잘 확립되어 있는 안정한 물질계로, 기판의 균일성이 매우 좋기 때문에 2~4 inch 기판 공정이 용이할 뿐만 아니라, 양자구조의 원리적 고효율성 때문에 MCT와 비교되는 우수한 검출률을 가지고 있는 등 많은 장점을 지니고 있다. 2000년대에 들어 NASA-JPL과 Indigo에서 각각 발표한 [256 × 256] 및 [640 × 512] QWIP FPA와 이를 탑재한 적외선 Video Camera는 이미 상용화되어 군수용뿐만 아니라 민수용으로도 활용되고 있다. 하지만 QWIP의 경우에도 MCT와 마찬가지로 동작온도가 올라갈수록 열적 여기로 인한 암전류가 크게 발생하여 고온동작에는 한계를 가지고 있다.

1990년대 3차원 양자구조인 InAs 양자점(QD) 형성기술이 개발되면서 QWIP의 활성층을 QD으로 대체한 고온 동작이 가능한 InGaAs/GaAs QDIP의 연구가 Northwestern 대학 (NWU), Southern California 대학 (USC), New Mexico 주립대학 (UNM)을 중심으로 활발하게 전개되었다.^{14,15)} 지난 2004년 USC에서는 QDIP 단일소자가 QWIP 보다 우수한 $D^* = 3 \times 10^{11} \text{ cm}^2 \text{ Hz}^{1/2} / \text{W}$ (77K)의 검출률을 가짐을 보고 한 바 있으며, 같은 해 NWU에서

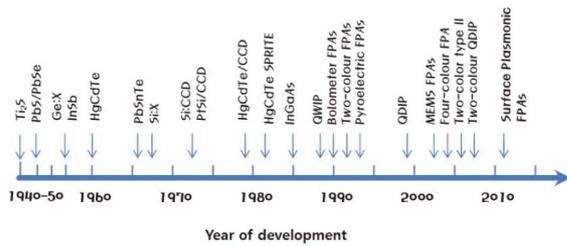


Fig. 2. History of the development of infrared detector.

는 $D^* = 3.6 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ (95K)인 QDIP [256 × 256] FPA의 제작을 발표함으로써, 상온에서 동작이 가능한 QDIP가 QWIP의 특성을 증가하고 있음을 보여 주었다. 이후 UNM과 JPL에서는 새로운 dot-in-a-well (DWELL) 구조를 도입하여 하나의 센서로 다른 두 파장 대역을 동시에 검출할 수 있는 two-color [320x256] FPA QDIP (4/10 μm)를 개발하여 검출률이 저온 (78 K)에서 $D^* = 7.1/2.6 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 이고, 이를 탑재한 열영상 카메라가 15 mK의 온도 분해능을 가지는 결과를 보고한 바 있다.

제 2형 초격자 (T2SL)는 2000년대에 들어 가장 주목을 받고 있는 적외선 검출 소재이다. 분자선 에피택시 (MBE) 장치를 이용한 안티모니 (antimony, Sb) 계열의 화합물 반도체 초격자 성장기술이 확보됨에 따라 수백 주기에 이르는 고품위 초격자 에피 기판이 제작이 가능하게 되어 미국 (NWU, UNM, NASA), 독일 (IZM) 등 대학과 연구소를 중심으로 T2SL 소재를 이용한 적외선 검출소자의 연구가 시작되었으며 이후 프랑스, 한국, 일본, 중국, 스웨덴에서도 대학, 연구소, 방산 업체를 중심으로 연구 개발이 진행 중이다. 2000대 중반, 양자형 적외선 검출기 중에서는 최초로 상온에서 동작특성을 보이는 T2SL 적외선 검출소자가 보고되었고, 이후 n-i-p, nBn, pBp, p-π-M-n형 등 개선된 에피 구조에 따른 향상된 특성을 보이는 새로운 구조의 T2SL 소자 개발이 시도되었으며, 2007년 T2SL 소재를 이용한 back-to-back 다이오드 형의 MW/LW 이중 대역 동시 검출 소자가 개발되었다. 2011년, 최고해상도를 갖는 SXGA (1K×1K)급 T2SL 시제품 (QmagiQ, 미국) 제작에 성공하여 영상을 시험하였으며 10여년이라는 짧은 연구기술 개발기간 만에 2012년,

IRnova (스웨덴)에서 MWIR 용 320 × 256 FPA, 640 × 512 FPA T2SL 상용카메라를 출시하였고 현재에도 고해상도, 고온동작, 이중대역 동시검출 등의 기존의 성능을 뛰어넘는 적외선 센서를 개발하기 위해 경쟁적으로 기술개발에 투자를 하고 있다.

3. 양자형 적외선 검출기 성능 지표

양자형 적외선 검출소자를 성능을 나타내는 특성값 (figures of merits)은 크게, 반응도 (responsivity, R), 검출률 (detectivity, D^*), 잡음등가출력 (noise equivalent power, NEP), 무전압 저항-면접촉 (R_0A) 등 4가지를 들 수가 있는데, D^* 는 배경 한계 적외선검출소자 (background limited infrared photodetector, BLIP)와 Johnson 잡음 한계 적외선 검출소자 (Johnson noise limited infrared photo detector)의 2가지로 나누어진다. 이외에도 동작 온도, 반응 파장대역, 신호 선형성, 균일도, 동작률 등은 실용성과 관련된 주요 소자의 특성 값이다. 특히 광전도도의 변화를 측정하는 PC형의 경우는 D^* , p-n 접합의 다이오드 구조인 PV형의 경우는 R_0A 값이 소자의 성능을 결정하는 지표로 사용하는 것이 일반적이다.

일반적으로 양자형 적외선 검출소자의 반응도 R 은

$$R_V = \frac{V_s}{P_0} \quad \text{or} \quad R_I = \frac{I_s}{P_0} \quad (1)$$

로 주어지는데, 여기서 V_s 는 출력전압, I_s 는 출력 전류, P_0 는 입사 광의 세기이다.

적외선 검출소자의 출력 전류 I_s 는 주로 광전류 (photocurrent, I_{ph})로

$$I_{ph} = \eta q A_d \phi g_{ph} \quad (2)$$

로 주어지는데, 여기서 g_{ph} 는 광전도 이득 (photoconductive gain)이며, η 는 양자효율, A_d 검출기의 유효면적이다. 따라서 식 (1)은 다음과 같이 표현된다.

$$R_I = \frac{q\lambda}{hc} \eta g_{ph} \quad (3)$$

양자형 적외선 검출소자의 성능을 좌우하는 또 다른 요인은 잡음 (noise)으로, 주된 네 종류의 잡음으로는



Johnson noise, shot noise, G-R (generation-recombinationnoise), $1/f$ noise가 있다. 이 잡음의 크기는 반응도 및 검출률에 결정적인 영향을 끼친다. 적외선 반응 신호에 대한 잡음의 비 (signal-to-noise ratio, SNR)는 다음과 같다.

$$SNR = \frac{R_I P}{i_n} \quad (5)$$

여기서 P는 입력 광의 세기이며, i_n 은 잡음 전류이다. 잡음 대 신호비 (SNR)가 1이 되는 최소 검출 가능 출력으로 정의되는 잡음등가출력 (noise equivalent power, NEP)은

$$NEP = \frac{i_n}{R_I} \quad (6)$$

로 주어진다. 여기서 잡음 전류는 다음과 같이 주어진다.

$$I_n = (4k_B T) \frac{\Delta f}{R_S} \quad \text{for Johnson noise} \quad (7)$$

$$I_n = [4e(\Delta f)G(I_D)I_D]^{1/2} \quad \text{for G-R noise} \quad (8)$$

$$I_n = \frac{\alpha I_D^\beta}{f^{1/2}} \quad \text{for } 1/f \text{ noise} \quad (9)$$

잡음 전류는 주파수 대역 및 소자의 구조에 따라 영향을 받는다. 일반적으로, 저주파수 영역에서는 주파수에 역비례하는 $1/f$ 잡음이, 중주파수 영역에서는 G-R 잡음이, 고주파에서는 비교적 값이 낮은 일정한 크기의 Johnson 잡음이 지배적으로 알려져 있다.¹⁶⁾

양자형 적외선 검출소자의 또 다른 성능지표인 검출률 D^* 는

$$D^* = \frac{\sqrt{A_d B}}{NEP} = \frac{\sqrt{A_d B R_I}}{i_n} = \frac{R \sqrt{A_d \Delta f}}{i_n} \quad (7)$$

로 주어지는데, 여기서 B는 전기 대역폭 (electrical bandwidth)이다. 단위는 $cm \cdot Hz^{1/2}/W$ 이며, 반응도와 마찬가지로 검출률도 인가전압, 반응온도, 주파수 및 반응과장에 따라 그 값이 달라진다.

4. 적외선 검출용 화합물 반도체 에피 기판 성장 기술

적외선 검출소자 제작을 위한 III-V족 화합물 반도체 결정 성장 방법은 분자선 에피택시법 (molecular beam epitaxy, MBE)과 유기금속 화학기상증착법 (metal organ-

ic chemical vapor deposition, MOCVD)이 대표적이다. 그 밖에 액상성장법 (liquid phase epitaxy, LPE), 기상성장법 (vapor phase epitaxy, VPE), 물리기상증착 (physical vapor deposition), 원자층증착 (atomic layer deposition) 등이 화합물 반도체 박막 성장 방법으로 사용되고 있지만, 대부분 상용화된 양자형 화합물 반도체 적외선 소자는 구성물질과 구조에 따라 MBE (QWIP, QDIP, T2SL, InSb, MCT)와 MOCVD (InSb, InGaAs) 장치로 성장된 에피 기판 소재가 주류를 이루고 있다. Fig. 3, 4는 MBE와 MOCVD의 성장 장치의 구조를 보여준다.

MBE는 10^{-10} torr 이하의 초고진공 중에 기판을 두고 이것을 수 $100^\circ C$ 로 가열이 된 상태에서 성장하고자 하는 물질을 각각 다른 도가니 (crucible) 상의 용기 (cell)에 넣어 가열하여 증기승화에 의해 기상으로 기판 위로 공급하여 결정을 성장하는 방법이다. 화합물 반도체 적외선 검출 소재의 경우 물질을 구성하는 각각의 물질을 담은 cell이 독립적으로 필요한데 QWIP의 경우 Ga, In, Al, As 셀과 도핑을 위한 물질인 Si, Be 등으로 구성된다. 고품위의 박막질 성장을 위해 필요에 따라 성장 도중 다른 세기의 분자선을 공급하여야 하기 때문에 적외선 에피 기판 성장의 경우 Ga, In 셀의 경우는 한 장치에 2개가 장착되어야 하고 As cell의 경우 As_4 를 As_2 로 분해하여 공급할 수 있는 크래커 (cracker) 셀의 장착이 요구된다.

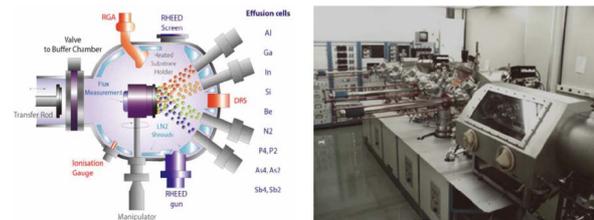


Fig. 3. Schematic of molecular beam epitaxy (MBE).



Fig. 4. Schematic of metal organic chemical vapor deposition (MOCVD).



T2SL 에피 소재 성장의 경우 In, Ga, Al, Sb, As 셀과 도핑 물질인 GaTe과 Be 셀이 요구되며 특히 Sb 셀의 경우 성장중 분자선의 세기를 바꿔줘야 하기 때문에 밸브 크래커 셀 (valved cracker cell)이 필요하다. 적외선 검출 소재로서 필요한 좋은 화합물 에피 기관은, 암전류를 억제할 수 있는 최적화된 양자구조를 설계하는 기술과 동시에 얼마나 결함이 적은 에피 기관을 성장할 수 있는지가 관건이 된다. 따라서 고품위의 에피 기관 제작을 위해서는 온도, 성장속도, 조성비율 등의 수 많은 성장조건 도출 및 서터 시퀀스의 최적화가 필수적이라 할 수 있다.

MOCVD는 MBE가 고체소스를 사용하는 것과 달리 유기금속가스를 가열한 기관 상에 흘러 열 분해시켜 박막을 성장시키는 방법이다. III족인 알킬 (alkyl) 화합물 가스 (TMGa, TMAI, TMIIn)와 V족인 수소 (hydride) 화합물가스 (AsH₃, PH₃)가 분해 가능한 온도 이상에서 열 분해 반응을 일으켜 화합물 반도체는 기관에 부착되어 박막을 형성하고 메탄은 가스상태로 배기가 된다.

지금까지 반도체 레이저나 GaAs 태양전지, HEMT, 초고속 트랜지스터 등 MBE에서 시작된 화합물 에피 기관의 상용화는 대부분 MOCVD 장치로 이뤄지는 경향을 보여왔다. 그 이유는 먼저 MBE에 비해 대면적 성장이 가능하여 양산성이 뛰어나다는데 있다. 에피 박막의 구조가 수 십에서 수 백층에 이르는 QWIP, QDIP, T2SL 에피는 MBE, MOCVD 모두 성장기술 개발이 시도되었지만 아직까지 MBE로 성장된 기관만이 상용화에 성공하였고 비교적 에피 구조가 간단한 InGaAs, InSb 에피는 MOCVD로 성장된 기관이 상용화에 이용되고 있다.

5. 양자우물 적외선 검출소자 (QWIP)

QWIP는 1980년 중반에 단위 소자의 특성이 최초로 보고된 이후, 미국 NASA를 중심으로 인공위성용 카메라 개발을 목적으로 급격히 개발이 진행되었다. 비교적 안정적인 GaAs 기관을 기반으로 하기 때문에 기존의 II-VI족 반도체인 MCT가 가지는 기관 (LPE 기관)의 불안전성을 극복하여 대면적이 가능하다는 점과 물리적인 양자 구조로 인한 고온 동작이 가능할 것으로 기대되었다.

비교적 짧은 10여년의 연구기간 동안 에피기관 성능이 향상되어 NASA-JPL에서 256 × 256 QWIP 다초점배열 (focal plane array, FPA)을 이용하여 첫 적외선 영상을 선보인 데 이어 640 × 512 QWIP FPA 제작에 성공하였고 인공위성에 탑재하여 영상을 구현하였다. 현재 미국에 FLIR사에서 QWIP 카메라 상용화에 성공하여 60-80K에서 동작하는 장파장 검출용 640 × 512 QWIP 민수용 카메라를 판매하고 있다.

QWIP 적외선 검출소자의 특성을 살펴보면, QWIP 소자는 양자우물 (QW) 내에 형성된 부준위 사이의 밴드내 천이를 이용하는데, 부준위 간격의 에너지에 해당하는 적외선이 입사되면 기저상태의 전자가 여기준위로 천이함으로써 광전류가 형성된다. Fig. 5에서와 같이, 흡수천이는 관계된 부준위의 위치에 따라 구속-구속 (bound-to-bound), 구속-준구속 (bound-to-quasibound), 그리고 구속-연속 (bound-to-continuum) 등 3가지 방식이 가능하며, 구속-준구속 천이에서 암전류가 가장 낮다고 알려져있다. PC형 QWIP에서는 보통 기저준위에 전자 (n형인 경우)가 존재하도록 QW 내 또는 장벽에 도핑을 하고, 광전류를 높이기 위하여 활성층에는 보통 수 십층의 QW를 수직으로 적층한 다중 양자우물 (multi quantum well, MQW)을 도입한다. 이때 MQW 양단에 전기장을 인가하면 각각의 QW에서 생성된 광전자들이 발생하게 된다.

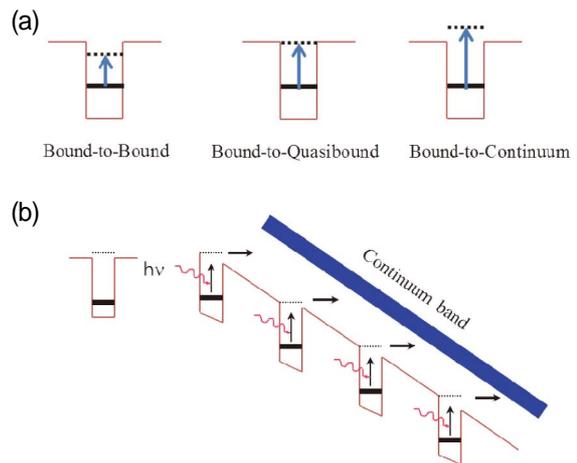


Fig. 5. (a) Three kind of intraband transition (b) Photocurrent generated in MQW structure.



물질계나 우물폭을 변화시켜 부준위의 에너지 위치를 변조시킴으로써 검출소자의 반응 파장대역을 제어할 수가 있는데 QW의 표준 물질계인 AlGaAs/GaAs QW에서의 부준위 사이의 에너지 차이는 수 10-200 meV로서 MW에서 LW까지의 적외선 검출이 선택적으로 가능하다.

QWIP 소자 제작은 메사 (mesa) 구조 제작 공정, 전극 (electrode) 형성 공정, 표면보호막 (surface passivation) 증착 공정, 광산란을 위한 격자 (grating) 형성 공정이 요구된다. 메사구조 제작에는 전형적인 집축식 광묘화 (photolithography) 및 유도결합 플라즈마 장치를 이용한 건식 식각공정이 이용되며, Au-Ge/Ni/Au 금속이 n형 GaAs의 ohmic 금속으로 사용된다. 표면보호막은 메사 구조에서 들어나는 표면에 따라 흐르는 표면누설전류 억제에 필요하며 GaAs/AlGaAs QWIP에서는 Si₃N₄, SiO₂ 박막이 사용되고 있다. 입사된 적외선 흡수를 위해 QW 구조의 밴드 내 및 밴드간 천이에는 선택률 (selection rule)을 적용받는다. QW 구조가 흡수에 대하여 반응을 나타내기 위해서는 입사광은 QW 층에 대하여 평행한 성분을 가져야 하므로 수직으로 입사한 적외선은 직접적으로 천이를 일으키지 못해 QWIP는 입사된 및 산란시켜 수평 방향의 성분으로 변환 시키기 위한 격자 구조가 필요하다. 선형 또는 2차원 격자 구조, 광 간극 (cavity)을 가지는 격자, 랜덤 산란 반사층 (random scatter reflector) 등의 결합 구조가 도입되었으며 랜덤 산란 반사층이 공정상 용이하고 최대흡수 효율을 나타내어 상용화 제품에 사용되는 것으로 알려져 있다. 현재까지 개발된 QWIP는 대면적과 동작수를 측면에서는 우수하나 동작온도가 77 K가 넘어가면 검출능력이 급격히 저하되는 한계가 있어 현재는 주로 MW 용보다는 고해상도 LW 적외선 검출 소자로 활용이 되고 있다.

6. 양자점 적외선 검출소자 (QDIP)

앞서 언급한 바와 같이 QWIP는 열여기에 기인한 낮은 동작온도, 짧은 전하수명시간 및 수직 입사광에 반응하지 않는 한계가 있다. 이러한 QWIP의 한계를 극복할 수 있는 새로운 구조로서 QDIP가 제안되어 1990년대

후반부터 활발한 연구가 진행되었다. QDIP의 동작원리는 QWIP와 유사하나, Fig. 6에서 보여지는 바와 같이 3차원 구속 시스템인 양자점을 활용하며 적외선의 흡수는 바닥 상태 (ground state)에서 전도대의 다양한 여기 상태 (excited state)로 부 밴드 천이 (intersubband transition)에 기인한다. 이러한 강한 구속력의 양자점의 특성을 활용하기 때문에 수직 입사빔에 대한 적외선 흡수가 일어나고, 열여기 감소로 고온동작이 가능하며, QWIP 보다 10~100배 긴 전하수명시간으로 인한 암 전류 (dark current)의 감소를 기대할 수 있다. 양자점 에피기판은 MBE와 MOCVD 두 성장 장치로 가능하나 적외선 검출소자 특성은 MBE로 성장된 기판만이 우수한 특성을 보이는 것으로 알려져 있다. 양자점의 형성은 주로 InAs 물질계를 사용한다. InAs와 GaAs 격자 상수 차이로 인해 GaAs 기판 위에 InAs를 뿌려주면 일정 두께이상에서 2차원 박막이 3차원 형태의 양자점으로 형성되게 되는데 이를 자발형성 양자점 (self-assembled quantum dot, SAQD)라 한다. InAs QD에 밴드갭이 큰 (Al)GaAs가 덮혀져 장벽

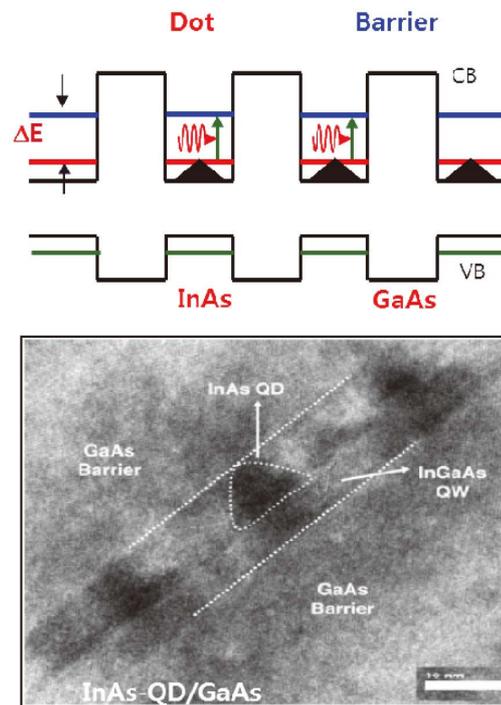


Fig. 6. Intersubband transition in QD structure and TEM Image of InAs QD.



이 되고 QD내에 부 준위가 생겨 이 부준위 간의 천이가 적외선 검출에 이용되게 된다. 반응과장 대역의 변조는 QWIP와 동일하게 부준위 간의 간격을 조절하면 되는데 QDIP에서는 QD의 크기를 조절하거나 QD를 덮고 있는 장벽층의 물질 조성을 변화시켜 밴드갭 에너지를 조절하는 방식이 사용된다.

QDIP 적외선 검출소자의 성능을 좌우하는 핵심요소인 SAQD는 Stranski-Krastanov (SK), atomic layer epitaxy (ALE) 및 droplet epitaxy 등 다양한 성장 모드로 형성될 수 있다

개발초기에는 QDIP의 기본 물질인 (In,Ga)As QD/(Al,Ga)As 구조에서 성장 조건의 변화로 QD의 크기를 조절하려는 시도가 이어졌다. SAQD가 형성되는 바닥 박막 물질의 조성 변화로 응력의 변화를 주거나 덮개층으로 사용되는 (Al,Ga)As의 조성을 변화시켜 QD의 형상을 바꿔주는 연구들이 진행되었는데, 성장 조건의 제약으로부터 발생하는 물리적 한계가 있어 높은 양자효율을 갖는 LW 대역의 QDIP 개발에는 어려움이 있었다. 이러한 취약점을 극복하기 위하여 양자우물을 삽입한 QDIP (dot-in-a-well, DWELL) 구조가 Krishna¹⁷⁾ 등에 의하여 제안되어 검출 파장변조 및 양자점의 광학적 특성 향상과 암전류 감소로 인한 적외선 검출 소자 성능 향상을 보고하였다. 이뿐만 아니라 다양한 형태의 구조적 변화 (quantum dots in double well: DDWELL, quantum dot in-a-well with confinement enhancing barrier: CE DWELL, resonant tunneling heterostructure)를 통해 소자 특성 향상에 관한 연구들이 진행되어 우수한 결과들이 보고되었다. 최근에는 새로운 양자점의 형성 방법인 sub-monolayer QD 형성 기술이 개발되었다. 기존의 QD와 비교하여 sub-monolayer QD의 장점으로는 크기가 5~10 nm 정도로 작아 더욱 강한 구속효과 (quantum confinement)를 가지며, QD의 밀도는 $\sim 5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 로 높아 더 많은 입사광을 흡수 할 수 있고, QD의 높이 조절이 가능하며 젖음층 (wetting layer, 적외선 흡수에 관여하지 않는다)이 존재하지 않는 것이다. Fig. 7은 SML-QDIP 소자의 구조 개략도이다. 0.3 ML InAs sub-monolayer 양자점을 단계적으로 InGaAs 양자우물 안에 성장

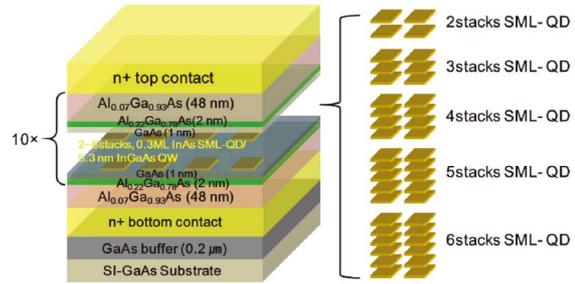


Fig. 7. Heterostructure schematic of multiple stacked SML-QD. 0.3 ML InAs SML-QDs with 2-6 stacks embedded in a 5.3 nm $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$.

을 하게 된다. 이와 같은 방식으로 성장을 하게 되면 두께 조절이 용이할 뿐 아니라 수직방향으로의 QD 높이가 커지기 때문에 보다 강한 3D-구속효과를 가지며 또한 크기가 SK-QD보다 상대적으로 작기 때문에 양자점 안에 하나의 부밴드만 존재하게 되어 반응대역이 좁은 반응스펙트럼을 쉽게 조절할 수 있는 장점이 있다. QDIP 소자 제작은 QWIP와 성장 물질이 거의 유사하기 때문에 동일한 공정기술을 이용된다. 메사 (mesa) 구조 제작 공정, 전극 (electrode) 형성 공정, 표면보호막 (surface passivation) 증착 공정이 필요하여 수직입사에 대한 반응이 가능하여 따로 격자 (grating) 형성 공정은 필요하지 않다. QDIP 카메라의 경우, 2009년에 NASA-JPL에서 SML-QD를 이용하여 80K에서 1024×1024 픽셀의 영상을 구현하는데 성공하였다.

7. 제 2형 초격자 적외선 검출기 (T2SL-IP)

제 2형 InAs/(In,Ga)Sb 초격자 (T2SL) 소재는 1980년대에 이론적으로 적외선 검출소재로서의 가능성이 제시 되었으며,¹⁸⁻²⁰⁾ 2000년 대 들어 고품위의 GaSb 기판이 공급되고 안티몬 (Sb) 계열의 성장기술이 발전함에 따라 MCT, InSb, QWIP, QDIP를 대체하는 적외선 검출 소자로 부상한 소재이다. 제1형 초격자 (SL) 구조를 활성층에 채용한 적외선 검출소자의 경우에는, SL 내에 형성된 부준위 미니밴드 (miniband)를 통한 전자투과 현상을 이용하며 천이방식은 부띠 (subband) 간의 천이를 이용하는 QWIP와 기본적으로 비슷하다. Fig. 8(a)는 대표적

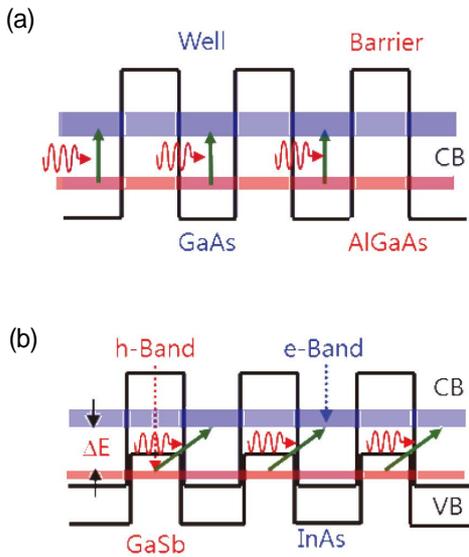


Fig. 8. Intraband transition in (a) type-I superlattice (b) type-II superlattice.

인 제1형 SL인 (AlGa)As/GaAs계의 에너지밴드 구조이다. 다른 양자구조 검출소자인 QWIP나 QDIP가 인가 전압을 필요로 하는 PC형인 것과는 달리 SLIP는 전자투과에 의한 PV형에 속하여, D^* 는 다소 작으나 동작 전압이 낮은 장점을 가지고 있다. SL 구조의 두께와 장벽 높이로서 스펙트럼 선폴과 암전류를 쉽게 조절할 수 있는 원리적인 장점을 지니고 있으나, 물질계의 제한과 다층 SL 구조의 균일성 등 성장상의 실질적인 어려움 때문에 많은 기초 연구가 이루어졌음에도 불구하고 상용화에는 이르지 못하였다. QWIP와 마찬가지로, 제1형 SLIP가 지니고 있는 입사각과 동작온도의 한계를 해결하기 위한 방법으로, InAs와 GaSb 계열의 이종접합을 이용하여 밴

드간 간접천이형의 제2형 SL를 활성층에 도입한 것이 T2SL 적외선 검출소자이다. Fig. 8(b)는 대표적인 제2형 SL 구조인 InAs/GaSb 계의 에너지밴드 모형이다. InAs 전도대 (conduction band, CB)와 GaSb 가전대 (valence band, VB) 사이의 간접천이 방식을 따르는 제2형 SL은 QW와는 달리 수직입사에서도 천이확률이 존재하고 온도 증가에 따른 열여기를 획기적으로 감소시킬 수 있어서, 상온 동작 가능성이 아주 높은 구조로 알려져 있다. 또한, InAs CB 전자의 유효질량이 $m^* = 0.023m_0$ 로 충분히 작기 때문에 이동도와 확산거리가 크고 적분시간이 짧아서, 이를 이용한 T2SL은 고속 동영상 구현에 아주 적합하다. InAs/GaSb 계의 유효 밴드갭 에너지는 InAs CB에 형성된 SL 미니밴드와 GaSb VB의 부준위 사이의 에너지 차이로 정의되는데, 물질계의 조성이나 층두께를 변화시켜 밴드갭 에너지를 조절할 수가 있기 때문에, 넓은 대역에서 흡수 파장을 제어할 수 있는 장점을 가지고 있다. 밴드갭 에너지가 168 meV인 4/4 nm의 (InAs)9/(GaSb)4 SL의 흡수 파장은 7-8 μm 로서, InGaSb 3원 화합물을 도입하고 층구조를 적절히 설계하면 MWIR에서 LWIR의 전 영역에 걸쳐 흡수파장 변조가 가능도 가능하다. 최근에는 T2SL 소자 성능을 향상시키기 위하여 전류 장벽층의 도입으로 암전류 및 투과 전자의 확률을 감소시키는 구조로 nBn, pBiBn, M-structure, W-structure, CBIRD 및 N-structure 등 여러 형태의 구조가 연구되고 있다.

Fig. 9는 대표적 T2SL 적외선 에피 기판의 구조들이다. 기판과 완충층 (buffer layer)은 불순물을 첨가하지 않은 p형 GaSb를 사용하고 있으며, 활성층은 수 단층

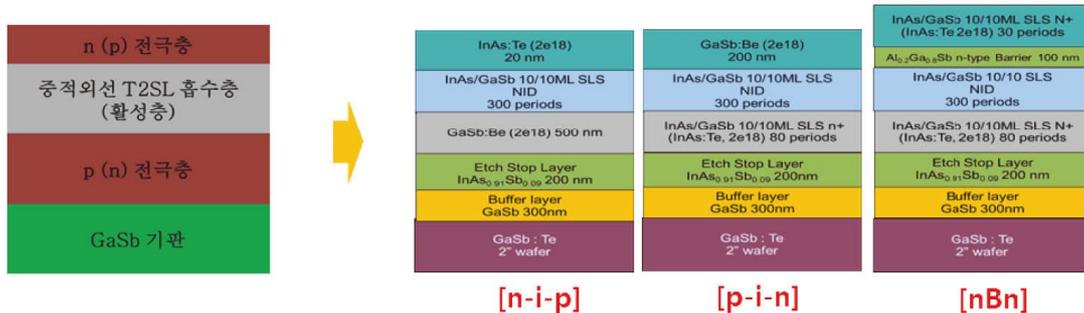


Fig. 9 Heterostructure of InAs/(In,Ga)Sb T2SL-IP for nin/pin/nBn type.



(monolayer, ML)의 InAs 우물과 GaSb 장벽이 교대로 적층된 수 300주기의 SL으로 구성된다. nip 형의 경우, p/n 전극층은 각각 Be과 Te을 도핑한 p-GaSb와 n-InAs 층이 사용되는 반면 pin 형과 nBn 형의 경우 하부 전극층으로 격자 불일치로 일정 두께 이상의 InAs 박막 성장이 불가능하기 때문에 도핑된 SL층을 전극층으로 사용하게 된다.

T2SL 에피 기판에 성능을 좌우하는 가장 핵심적인 기술은 수백층의 SL 활성층 최적화 기술이다. 활성층을 구성하는 InAs와 GaSb 층간에는 0.62%의 격자부적합이 있기 때문에 수 백층의 InAs/GaSb SL에는 응력이 존재하게 된다. 이 응력을 최소화 하는 성장 조건 도출이 최적의 활성층을 형성하는 핵심이되는데 sub-monolayer의 InSb 중간층을 주입하거나 계폐기 (shutter) 조절 기법을 이용하여 계면의 구조를 변화시켜 응력을 조절하는 방법이 사용되고 있다. 또한 물질 조성에 따라 성장온도, 성장률, V/III 비, 성장멈춤시간 (growth interruption time) 등에 대한 성장조건이 다소 다르기 때문에, 층구조의 설계 및 성장에는 장비의 특성을 고려한 적절한 타협과 최적화 과정이 요구된다.

T2SL 소자 제작은 기본적으로 QWIP, QDIP 소자공정과 유사하게 진행된다. 다만 메사 공정 후 드러난 Sb 계열의 표면이 상대적으로 As 계열의 표면보다 쉽게 산화가 되어 시간이 지나면 소자의 성능이 저하되는 특성을 보이고 있다. 따라서 T2SL 검출소자는 표면의 산화에 의해 표면누설전류 역제를 위한 메사 후처리 공정이나 표면보호막 공정기술이 아직 중요한 이슈로 남아 있다.

8. 결론

본 글에서는 양자형 반도체를 기반으로 한 적외선 검출 소재의 최근 연구 동향을 소개하였고, 현재 활발한 연구가 진행중인 양자우물 적외선 검출기, 양자점 적외선 검출기, 그리고 제 2형 초격자 검출기를 중심으로 양자형 검출소자의 동작원리 및 각각의 특성을 소개하였다. 아직까지 고성능이 요구되는 양자형 검출소자에서 SW 대역은 InGaAs 기판, MW 영역은 InSb bulk 기판, LW

영역은 MCT 벌크 기판이 대표적으로 사용되고 있다. 하지만 향후 차세대 적외선 검출 및 영상 기술은 초고해상도, 고온 동작, 다중대역 동시검출 같은 향상된 성능을 요구하고 있고 기존의 bulk 기판은 이런 성능을 충족하기 어려운 물리적 한계에 와 있다. 본 글에서 소개한 양자구조 에피 기판을 이용한 적외선 검출 소자들이 이러한 한계를 뛰어 넘을 수 있는 차세대 적외선 검출 소재이며 기술 선진국에 경쟁적으로 연구 개발에 투자를 하고 있는 이유이다.

참고문헌

1. E. S. Barr, "The Infrared Pioneers - III. Samuel Pierpont Langley," *Infrared Phys.*, **3** 195-206 (1963).
2. H. Yuan, G. Apgar, J. Kim, J. Laquindanum, V. Nalavade, P. Beer, J. Kimchi, and T. Wong, "FPA Development: from InGaAs, InSb, to HgCdTe," *Proc. of SPIE*, **V**, **6940** 69403C1-11(2008).
3. P. Norton, J. Campbell III, S. Horn, and D. Reago, "Third Generation Infrared Imagers," *Proc. SPIE*, **4130** 226-36 (2000).
4. S. Horn, P. Norton, T. Cincotta, A. J. Stoltz, Jr., J.D. Benson, P. Perconti, and J. Campbell III, "Challenges for Third-generation Cooled Imagers," *Proc. SPIE*, **5074** 44-51(2003).
5. W. A. Radford, E. A. Patten, D. F. King, G. K. Pierce, J. Vodicka, P. Goetz, G. Venzor, E. P. Smith, R. Graham, S. M. Johnson, J. Roth, B. Nosho, and J. Jensen, "Third Generation FPA Development Status at Raytheon Vision Systems," *Proc. SPIE*, **5783** 325-30 (2005).
6. A. Rogalski, "Infrared Detectors: Status and Trends," *Prog. Quantum Electron.*, **27** 59-210 (2003).
7. H. Zogg, A. Fach, J. John, P. M. Uller, C. Paglino, and A. N. Tiwari, "PbSnSe-on-Si: Material and IR Device Properties," *Proc. SPIE*, **3182** 26-29 (1997).
8. J. John and H. Zogg, "Infrared p-n-junction Diodes in Epitaxial Narrow Gap PbTe Layers on Si Substrates," *Appl. Phys. Lett.*, **85** 3364-66 (1999).
9. A. M. Fowler and J. B. Heynssens, "Evaluation of the SBRC 256x256 InSb Focal Plane Array and Preliminary Specifications for the 1024x1024 InSb Focal Plane Array," *Proc. SPIE*, **1946** 25-32 (1993).
10. N. Sclar, "Properties of Doped Silicon and Germanium Infrared Detectors," *Prog. Quantum Electron.*, **9** 149-257 (1984).



11. W. S. Boyle and G. E. Smith, "Charge-coupled Semiconductor Devices," *Bell Syst. Tech. J.*, **49** 587-93 (1970).
12. L. J. Kozlowski, "Background Limited 128x128 GaAs/AlGaAs Multiple Quantum Well Infrared Focal Plane Arrays, in: H. C. Liu, B. F. Levine, J. Y. Anderson (Eds.), "Quantum Well Intersubband and Transition Physics and Devices," Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 43-54, 1994.
13. S. D. Gunapala and K. M. S. V. Bandara, "Recent Development in Quantum-Well Infrared Photodetectors," *Thin Films*, **21** 113-237 (1995).
14. A. D. Stiff, S. Krishna, P. Bhattacharya, and S. W. Kennerly, "Normal-incidence, High-temperature, Midinfrared InAs-GaAs Vertical Quantum-dot Infrared Photodetector," *IEEE J. Quantum Electron.*, **37** 1412-19 (2001).
15. A. V. Barve, S. J. Lee, S. K. Noh, and S. Krishna, "Review of Current Progress in Quantum Dot Infrared Photodetectors," *Laser & Photonics Rev.*, **4** 738-7503 (2010).
16. S. K. Noh, S. J. Lee, Y. H. Ryu, S. M. Choi, and S. H. Park, "Fabrication and Characteristics of Quantum-structure-based Semiconductor Infrared Photodetectors (in Korean)," *Sae Mulli*, **54** 4983-512 (2007).
17. S. Krishan, "Quantum Dots-in-a-well Infrared Photodetectors," *Infrared Phys. Technol.*, **47** 153-63 (2005).
18. G. A. Sai-Halasz, R. Tsu, and L. Esaki, "A New Semiconductor Superlattice," *Appl. Phys. Lett.*, **30** 651-53 (1977).
19. L. Esaki, "InAs-GaSb superlattices-synthesized Semiconductors and Semimetals," *J. Cryst. Growth*, **52** 227-40 (1981).
20. D. L. Smith and C. Mailhot, "Proposal for Strained Type II Superlattice Infrared Detectors," *J. Appl. Phys.*, **62** 2545-48 (1987).

●● 이상준



- 2004년 경희대학교 물리학과 박사
- 2005년 미국 University of New Mexico 방문연구원
- 2004년-현재 한국표준과학연구원 책임연구원