

광검출기(Photodetector) 최근 연구 동향



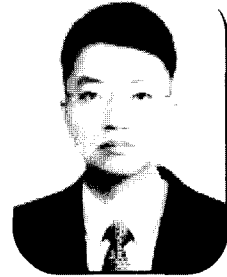
이봉웅
연세대
전기전자공학과 석사과정



주한성
연세대
전기전자공학과 석사과정



고영돈
연세대
전기전자공학과 박사과정



윤일구
연세대
전기전자공학과 교수

1. 서론

21세기 정보 통신 기술의 발달에 힘입어 사회, 문화 및 경제 분야의 발전이 고도화 되어감에 따라 유통되는 정보는 더욱 다양화대용량화 되어지고 있는 실정이다. 이러한 정보 중에서 신뢰성 있는 정보만을 통신 수요자에게 신속하고 정확하게 분류하여 전송하거나 획득할 수 있도록 하는 정보 처리능력이 국가의 국제 경쟁력을 높이는 첩경이 되고 있다. 인터넷 이용자의 폭발적 증가와 서비스의 대용량화에 따라 인터넷을 통한 정보량이 급속도로 팽창하고 있으며, 이로 인해 네트워크의 정보 처리능력을 압박하게 되고 백본(backbone) 통신망의 용량이 위협받고 있는 실정이다. 또한 개인 이동 통신 기기의 급격한 성장도 기간 통신망의 데이터 처리 용량 및 속도에 많은 부담을 가중시키고 있다. 이를 극복하기 위하여 초고속 광 대역 광 전송시스템(broadband optical communication system)에 사용되어지는 고속 광소자(high-speed optical device) 부품에 대한 개발 필요성이 크게 증대되어지고 있는 실정이다. 광통신의 전송용량을 증가시키는 방법의 한 가지로 전송 속도의 증대에 관한 연구개발이 진행되고 있다. 광소자 분야에서 이용되어지는 III-V족 화합물 반도체는 1.2-1.55 파장 영역에서 매우 낮은 손실과 높은 대역폭을 갖는 특성을 나타냄으로 인하여

디지털 광통신/광검출 시스템에 널리 이용되어지고 있다 [1]. III-V족 화합물 반도체 개발이 상당히 진척되고 반도체 공정기술이 발달함에 따라 광검출기(photodiode: PD)소자에 대한 연구방향은 GaAs 계 또는 InP 계의 화합물 반도체를 이용하여 밴드갭공학(bandgap engineering)과 구조의 최적화를 통한 기존의 성능향상을 하는 방향으로 진행되고 있다. 광통신 시스템의 전송속도가 증가하여 Gbps급 이상이 되면 수신부(receiver stage)의 전치 증폭 잡음(pre-amplification noise)이 급격히 증가하게 된다. 이러한 수신부의 단점을 극복하기 위하여 내부이득을 갖는 에벌랜치 광검출기(avalanche photodiode: APD)를 수광 소자로 사용하고자 하는 연구 및 개발이 활발히 진행되어지고 있다. Tarof et al.은 InP/InGaAs를 기반으로 한 separated absorption, grading, charge, and multiplication (SAGCM) 구조 [2]를 가진 APD의 동작성능에 대해서 연구를 하였으며, Kuchibholta et al.은 APD 소자 구조 내에 얇게 도핑 되어진 층(δ -doped layer)을 삽입하고 이 층이 소자 성능에 미치는 영향[3]에 대하여 조사하였다. 이러한 APD 소자는 공정에 따라 평판형과 mesa 형 두 가지로 크게 나누어지게 된다. 평판형 APD는 mesa형 APD 보다 높은 신뢰성을 제공하나 소자의 구조 변수의 변위에 소자 성능이 상당히 영향을 많이 받는다. 따라서 공정상의 변위가 소자의



성능에 미치는 영향에 대한 연구도 활발히 진행되어졌다. Hyun et al.은 p-i-n 증폭층 구조를 가진 InP/InGaAs APD 소자의 항복 특성 (breakdown characteristics)에 대하여 연구를 진행하였으며, 또한 APD 구조 내의 유효 증폭층에 대하여 소자의 성능을 최적화 할 수 있는 두께를 계산하였다 [4]. P. Yuan et al. 은 APD 소자의 증폭층의 폭과 그 때 발생하게 되는 충돌이온화 (impact ionization) 특성에 대한 연구를 보고하였다 [5].

본고에서는 국내외적으로 활발히 진행되고 있는 고속 광통신 시스템용 광검출기 소자 개발 동향을 간략히 소개하고 현재 상업화가 진행 중인 애벌랜치 광검출기 (avalanche photodetector : APD), 도파로형 광검출기 (waveguide photodetector : WGPD)를 중심으로 이론적 고찰과 개략적인 연구 성과 사례 등을 소개할 것이다.

2. 국내외 개발 환경 및 연구 동향

APD 소자에 대하여 관련 업계들의 동향을 살펴보면 전송속도가 10 Gbps 정도의 고속 동작의 경우 일본의 NEC 사는 InAlAs/InGaAlAs 초격자(super-lattice)를 증폭층으로 하는 초격자 APD를 10여 년간 연구해 왔으며 이득-대역폭 곱 (Gain-Bandwidth Product: GBP)이 100 GHz에 이르는 것으로 발표되고 있다. Fujitsu는 평면형 bulk InP-APD를 개발해 왔으나 문헌상 발표는 거의 없는 상태이며 이득-대역폭 곱이 60-80 GHz 정도인 것으로 추정하고 있다. 이는 Fujitsu가 2.5 Gbps 용 APD에 사용한 종래의 가드링 구조를 10 Gbps용 APD에 확장함으로써 높은 GBP를 얻지 못한 것으로 분석된다. 한편, AT&T 및 Lucent는 10 Gbps APD 개발을 소홀히 하였다가 NEC에 주도권을 완전히 넘겨준 상태로 현재 bulk 및 초격자 APD 모두를 연구개발하고 있으며 발표 문헌이 없어 성능파악을 할 수 없는 상태이다. 또한 캐나다의 Nortel 사에서는 bulk InP를 증폭층으로 하되 가드링 (guard ring) 구조가 독특한 APD를 개발하고 있으나, 이득이 작아 상용화는 불투명한 것으로 파악되고 있다. 국내 연구 동향으로는 한국 전자 통신 연구원에서 가드링이 있는 평판형 APD에 관하여 연구하고 있으며, 10 Gbps 급 APD는 상용화 단계에 있으나 충분한 수율(yield)을 확보하고 있지는 못한 상태이다. 이러

한 APD 소자는 광통신 시스템의 수신 단에서 전치 증폭 잡음을 크게 감소시킬 수 있는 장점으로 인하여 많이 이용되어지고 있으나, 소자 내부에 존재하는 진성영역(intrinsic layer)에 의하여 발생되어지는 저항-캐패시턴스 상수 (resistance-capacitance time constant) 및 캐리어 천이시간 (carrier transit time)에 의하여 소자의 GBP 성능이 제한되어진다. APD 소자 내부의 진성영역의 두께가 두꺼워 질수록 소자에서 얻어지는 양자효율 (Quantum efficiency: QE)은 증가되어지나, 이 경우 진성영역이 완전히 공핍되지 않을 경우 광 여기된 자유 정공이 확산에 의해 공핍층으로 들어가게 되며 이는 소자의 동작 속도를 수백 MHz 대역 이하로 제한하기 때문에 큰 문제를 야기한다. 이로 인하여 GBP가 상당히 감소하게 되는 trade-off 현상을 나타내게 된다. 따라서 QE의 손실을 줄이면서 대용량 정보전송 능력을 갖춘 새로운 광소자에 대한 요구가 증대되어지게 되었다. 이러한 요구에 부응하여 새롭게 광도파로(optical waveguide) 구조를 가진 새로운 도파로형 광검출기 (waveguide photodiode: WGPD)가 개발되어졌다. WGPD에 대한 연구 동향을 살펴보면 Kato et al.은 다중모드 (multi mode)를 이용하여 입력 광섬유와 WGPD 소자 사이의 결합 효율(coupling efficiency)을 높이는 새로운 WGPD 구조를 개발하였으며, Otsuji et al.은 WGPD 소자를 이용하여 고속 전자소자의 대신 응답 시험을 위하여 광신호를 전기신호로 변환 시켜주는 프로브(probe)를 개발하였고, Iwasaki et al.은 고속 WGPD 소자와 패키징의 관계에 대하여 연구를 하였다[6-8]. 위에 나열되어진 연구결과들은 주로 해외에서 이루어진 성과물들인 반면, 국내에서는 2003년도에 한국 전자통신 연구원에서 40 Gbps급 광검출기 기술 개발을 위하여 WGPD 소자 및 모듈을 개발한 연구결과를 제외하면 WGPD 소자에 대한 체계적인 연구는 아직 보고되어져 있지 않은 실정이다.

3. 광검출기의 동작원리 및 종류

3.1 광검출기의 동작원리

광검출기는 광전압효과(접합부가 빛에 노출될 경우 반도체의 p-n 접합부에서 전압이 생기는 현상)를 이용하는 소자이다. 이러한 광검출기는 작동 및 구조에 따라서 p-n 광검출기, p-i-n 광검출기,

schottky형 광검출기, 충돌 이온화를 이용하는 avalanche 광검출기, 도파로형 광검출기 등으로 구분되며, 메사(mesa)형, 평판(planar)형이 있다. 이것의 특징을 살펴보면 먼저 메사형은 구조가 간단하며 태양전지나 광전스위치 등에 이용되는 것이 많다. 평판형 p-n 접합부의 Si결정표면의 노출부분이 산화막으로 보호되어 있으며, 암전류를 작게 하는 구조로 되어있다. 그래서 미약한 광검출, 넓은 동작영역, 여러 개의 포토다이오드를 집적할 경우 사용된다. p-i-n형은 p와 n형 반도체 사이에 고저항의 진성 반도체 층을 삽입한 것으로 캐패시턴스가 작아 고주파수의 광검출에 대해서도 고속응답이 가능하여 광통신의 수광기에 사용되고 있다. 광검출기의 특징으로는 낮은 잡음, 넓은 파장감응도, 기계적 안정도, 가볍고 간단함, 그리고 긴 수명 등이 있는데, 가장 중요한 특징으로는 동작속도가 매우 빠른 것이다. 그렇기 때문에 고도의 광전자용 수광 소자에 적합하다. 또한 광의 강도와 소자에서 흐르는 전류의 강도가 비례하고 있기 때문에 조도계 등에도 사용된다.

광검출기의 일반적인 동작원리를 살펴보면 다음과 같다. p-n으로 이루어진 광검출기의 기본적인 동작원리에 대하여 알아보면 다음과 같다. 광검출기에 빛이 입사하면, 회로가 개방될 경우, 개방 전압 V_{oc} 가 발생하고, 단락될 경우는 단락 전류 I_{sc} 가 흐른다. V_{oc} 는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_s} + 1\right)$$

단, $\frac{I_L}{I_s} \gg 1$ 일 때는 $V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_L}{I_s}$

- k : 볼츠만 상수
- T : 절대온도
- q : 전자의 전하
- I_L : 광전류
- I_s : 포토다이오드의 포화전류

로 된다. 위 식에서 알 수 있듯이, V_{oc} 는 I_L 이 자연로그로 스케일 되어진 특성이 된다. 단락 전류 I_{sc} 는, 입사 광량 L 에 비례하지만, 실제로는 부하 저항 R_L 이 있으면 변한다. R_L 이 클수록 출력 전압 V_{out} 의 포화가 빨리 일어남을 알 수 있다. 또, 역방향 전압 E_b 를 걸면, 부하선이 $-E_b$ 만큼 전압축을 따라 이동

하기 때문에, V_{out} 의 포화는 일어나기 어렵게 되고, R_L 과 V_{out} 의 직선 영역이 넓어진다. p형 반도체와 n형 반도체를 접합하면 p형의 정공이 n형으로 확산해 들어가고 n형의 전자가 p형으로 확산한다. 확산해 들어온 전자와 정공은 접합부근에서 만나 결합함으로써 소멸되어 버리고 접합부근 p형에는 - 전하를 띤 엑셉터 이온이, n형에는 + 전하를 띤 도너 이온이 남게 된다. 접합부에는 이 전하의 존재로 인해 전계가 존재하게 되고 이 전계 때문에 더 이상의 확산현상은 일어나지 않게 된다. 이렇게 전자와 정공은 존재하지 않고 고정전하만 존재하는 p-n 접합부근의 영역을 공핍영역, 혹은 전이영역이라 한다. 빛이 조사되면 빛에너지를 받아 전자-정공쌍이 발생한다. 공핍영역에서 발생된 전자-정공 쌍은 전계의 영향으로 바로 전자는 n형 중성영역으로, 정공은 p형 중성영역으로 흘러간다. 한편 공핍영역 끝으로부터 확산거리 내에 발생된 p형의 전자나 n형의 정공은 확산해서 공핍영역 내로 들어갈 수 있는데 이들 역시 전기장에 의해 바로 n형이나 p형의 중성영역으로 흘러가게 된다. 이 결과로 p형 쪽에는 정공이, n형 쪽에는 전자가 축적되게 되어 접합의 전극에는 기전력이 발생하게 되고 외부 회로에 전류를 흘릴 수 있게 된다. 이러한 빛 조사에 의한 기전력의 발생을 광기전력 효과라 한다. 빛을 조사하지 않을 때의 전류-전압 특성은 다음의 식과 같이 표시된다.

$$I = I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right)$$

- 여기서, I_0 : 포화전류
- k : 볼츠만 상수

광을 조사하면 광전류(photo current: I_L)가 발생하게 되는데 이때 접합을 흐르는 전류는 아래의 식과 같다.

$$I = I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) - I_L$$

따라서 전류-전압 특성은 광을 조사하지 않을 때의 특성을 전류축에 평행하게 I_L 만큼 이동시킨 것이 된다. 광조사시의 전류-전압 특성에서 전류 축과의 교점을 단락 광전류 I_{sc} , 전압축과의 교점을 개방전압 V_{oc} 라 부른다. V_{oc} 는 식(2-3)에서 $I=0$



으로 됨으로써 구할 수 있다.

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(1 + \frac{I_L}{I_0}\right)$$

빛 조사에 의하여 얻어지는 있는 전력 P 는 다음의 식으로 표시된다.

$$P = IV = (I_0 \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1) - I_L \times V$$

최대 전력은 $dP/dV=0$ 으로 정해지는데 그 때의 전류를 I_m , 전압을 V_m 이라 하면 최대 전력 P_m 은 다음과 같이 주어진다.

$$P_m = I_m V_m = I_{sc} V_{oc} F_F$$

F_F 는 곡선인자라 하는데 센서의 구조와 밀접한 관계가 있다. F_F 가 클수록 검출 효율이 커지게 되므로 바람직하다. 단락 광전류가 광감도 (photosensitivity)에 비례하는 것에 비해 개방 전압은 식에서 알 수 있듯이 광감도에 대수적으로 변화한다. 광센서로서는 입력에 대해 출력이 선형적인 것이 바람직하므로 전류를 측정하는 모드로 사용하는 때가 많다. 한편 p-n접합을 이용해 광을 측정하는 경우 외부인가 전압 없이 동작시켜 I_{sc} 를 측정하는 방법과 외부에서 접합에 역방향 바이어스를 가해 그 역방향 전류를 측정하는 방법은 두 가지가 있다. 광검출기의 응답시간은 캐리어 확산시간, 공핍영역시간, 접합 캐패시턴스 등이 있는데, 이중 접합 캐패시턴스에 의한 특성을 보자면, 직렬저항을 R_s , 부하저항을 R_L 이라고 하면 그 응답속도는 $C_j(R_s + R_L)$ 에 의해 제한을 받아 응답속도를 개선시키기 위해 C_j 를 작게 할 필요가 있다.

3.2 애벌랜치 광검출기

(Avalanche Photodetector : APD)

APD는 여러 광검출기 소자들 중에서 내부 이득을 가지는 유일한 소자이다. APD는 인가되어지는 높은 역방향 전압이 생성하는 큰 내부 전기장에 의하여 발생하는 캐리어 증폭현상에 의하여 이득을 가지게 된다. APD에 대한 동작원리를 살펴보면 다음과 같다. 반도체 p-n 접합 내에 높은 전기장이 인가되어 전자 (혹은 정공)를 충분히 가속시킬 수

있고, 충분한 가속에너지를 얻은 전자나 정공이 가전대(가전대)의 전자와 충돌하는 것에 의하여 새로운 전자-정공 쌍 (electron-hole pair : EHPs)을 생성할 수 있게 된다. 이를 2차 전자(secondary electron) 또는 2차 정공(secondary hole)이라고 부르는데, 이러한 현상을 충돌이온화 (impact ionization)현상이라고 부른다. 이러한 2차 EHPs는 서로 반대 방향으로 가속되고 가전대의 전자와의 충돌에 의해 또 다른 2차 EHPs를 생성할 수 있다. 이를 통하여 캐리어 증폭이 일어나게 되고, 전기장을 증가시키면 증폭은 점차 증가하게 될 것이며, 결국은 무한대의 전류가 흐르게 되는 이른바 사태항복(avalanche breakdown)이 일어나게 된다. 이때의 전압을 항복 전압(breakdown voltage : V_b)이라고 부른다. 역방향 전압을 증가시킬수록 공핍층의 부피가 증가하여 공핍층 내에서 발생하는 생성과 재결합에 의한 전류가 암전류 (dark current)에 주로 기여하게 되고, 광전류의 경우 V_b 근처에서 갑자기 크게 증가함을 볼 수 있는데 이는 공핍층으로 입사된 빛에 의하여 생성되어진 EHPs 들과 공핍층 내에서 발생하는 캐리어에 의해 avalanche 증폭이 일어나기 때문이다.

3.3 도파로형 광검출기

(Waveguide Photodetector : WGPD)

도파로형 광검출기는 외부로부터 입력되어지는 광신호를 빛의 굴절률이 좋은 재료로 만들어진 광도파로 구조를 이용하여 신호를 인도하여 광검출기의 흡수층에 전달하는 방식을 이용한다. 이 구조는 밴드폭과 양자효율이 흡수층의 두께에 의하여 결정되어지지 않고 단지 광도파로의 길이에 의하여 결정되기 때문에 밴드폭과 양자효율이 서로 독립적이다. 따라서 이러한 방식의 장점으로서는 매우 얇은 광도파로 구조를 채택함으로써 기존 광검출기 구조의 진성 영역에서 발생되어지는 저항-캐패시턴스 상수 와 캐리어 천이시간에 의하여 제한되어지는 손실을 최소화시킬 수 있음으로 인하여 소자의 이득-대역폭을 수십 GHz 이상으로 향상시킬 수 있다. 그러나 도파로형 광검출기는 입력 광신호를 소자에 결합시키는데 있어 결합효율이 떨어지는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 더블코어 (double core) 다중모드 도파로 구조가 제안되어졌다.

4. APD 및 WGPD 소자의 연구 성과 사례

전술한 바와 같이 우리나라의 경우 고속 애벌랜치 광검출기 및 도파로형 광검출기의 개발은 주로 국가 출연 기관과 대기업 연구소에서 괄목할 만한 성과를 보이고 있다. 특히 한국 전자 통신 연구원과 삼성 전자에서는 고속 애벌랜치 광검출기의 경우 2.5Gbps 와 10 Gbps에 대한 개발을 완료하고 상용화 단계에 접어들었으나 아직까지는 충분한 수율을 얻지 못하고 있는 실정이다.

그에 비하여 국내외의 경우, JDS Uniphase사, XL Photonics사 등 여러 기업들은 이미 애벌랜치 광검출기 분야에서 상용화 제품을 출시한 상태이다. 그림 1에서 보여 지고 있는 광검출기는 1000 nm에서 1600 nm까지의 파장대역을 가진 10 Gbps급 고속 애벌랜치 광검출기이다. XL Photonics에서 생산되어 지고 있는 광검출기들은 BER (bit error rate)이 10^{-10} 이하의 좋은 잡음 성능 및 높은 이득 특성을 나타내고 있는 것으로 알려져 있다.



그림 1. 한국 XL Photonics사의 10Gbps 애벌랜치 광검출기 모듈.

도파로형 광검출기의 경우 우리나라에서는 한국 전자 통신 연구원에서 개발하고 있는 40Gbps 시험 광검출기 모듈 구조 개발 이외에는 여타 기업 연구소 및 대학에서의 개발 실적은 전무한 상황이다. 이러한 우리의 연구 개발 실적과는 달리 일본의 경우에는 다양한 기업체 연구소에서 도파로형 광검출기 소자에 대한 연구를 활발히 진행하고 있다. 그림 2

는 메사구조 도파로형 광검출기 소자의 개략도를 보여주고 있다.

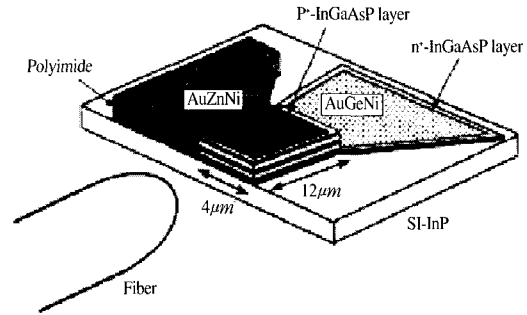


그림 2. 도파로형 광검출기 소자의 개략도[6].

새로운 고성능의 광검출기 소자들이 개발됨에 따라, 이런 소자들에 대한 신뢰성 연구도 동시에 진행되고 있다. 소자들의 수명은 그 구조에 따라 많은 차이를 보이는데, 일반적으로 애벌랜치 광검출기에서 평판구조인 경우에는 10^6 시간, 메사구조인 경우에는 10^8 시간의 수명을 갖는 것으로 알려져 있다. 또한, 도파로형 광검출기는 현재 신뢰성에 대해 다양한 연구가 진행중이며, 보통 메사구조경우에는 10^6 시간, 그리고 평판구조인 경우는 그 이상의 수명을 갖는 것으로 알려져 있다. 이러한 연구를 바탕으로 앞서 개발된 광검출기 소자들은 높은 신뢰성을 가지고 다양한 분야에 이용될 수가 있다.

5. 결론

본고에서는 고속 광통신 시스템에서 입력되어지는 수신하기 위하여 사용되어지는 광검출기에 대한 이론적인 배경에 대하여 개략적으로 기술하였고, 이에 대한 연구 성과 등을 사례를 중심으로 소개하여 보았다. 고 이득 저 잡음 특성의 광검출기 소자를 이용한 광통신 시스템의 확충은 빠르게 증가하고 있는 정보를 효율적으로 수요자들에게 전달함에 있어 큰 역할을 담당하고 있다. 그러나 이러한 광통신 시스템에 사용되어지는 광검출기들에 대한 수요는 현재 대부분 외국의 수입에 의하여 국내 수요를



충당하고 있는 실정이다. 따라서 이러한 현실을 타개하기 위하여 광검출기 소자에 대한 활발한 연구 및 상용화에 대한 노력이 절실히 요구되어지고 있다고 할 수 있겠다.

참고 문헌

- [1] Michael C. Brain, "Comparison of available detectors for digital optical fiber systems for the 1.2-1.55 μm wavelength range", IEEE J. Quantum Electronics, Vol. QE-18, No.2, 1982.
- [2] L. E. Tarof, D. G. Knight, K. E. Fox, C. J. Miner, N. Puetz, and H. B. Kim, "Planar InP/InGaAs avalanche photodetectors with partial charge sheet in device periphery", Appl. Phys. Lett., Vol. 57, No. 7, p. 670, 1990.
- [3] R. Kuchibhotla, J. C. Campbell, C. Tsai, W. T. Tsang, and F. S. Choa, "Delta-doped SAGM avalanche photodiodes", IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. 38, No. 12, p. 2705, 1991.
- [4] Kyung-Sook Hyun and Chan-Yong Park, "Breakdown characteristics in InP/InGaAs avalanche photodiode with p-i-n multiplication layer structure", J. Appl. Phys., Vol. 81, No. 2, p. 974, 1997.
- [5] P. Yuan, C. C. Hansing, K. A. Anselm, C. V. Lenox, H. Nie, A. L. Holmes, Jr., B. G. Streetman, and J. C. Campbell, "Impact ionization characteristics of III-V semiconductors for an wide range of multiplication region thickness", IEEE J. Quantum Electronics, Vol. 36, No. 2, p. 198, 2000.
- [6] Kazutoshi Kato, Susumu Hata, Kenji Kawano, Junich Yoshida, and Atsuo Kozen, "A high-efficiency 50 GHz InGaAs multimode waveguide photodetector", IEEE J. Quantum Electronics, Vol. 28, No. 12, p. 2728, 1992.
- [7] Taiichi Otsuji, Kazutoshi Kato, Shunji Kimura, and Tadao Nagatsuma, "Wide-band high-efficiency optical-to-electrical conversion stimulus probe heads for testing large-signal response of high-speed electronic devices", IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques,

Vol. 47, No. 5, 1999.

- [8] Noboru Iwasaki, Mitsuaki Yanagibashi, Hideki Tsunetsugu, Kazutoshi Kato, Fuminori Ishitsuka, Masakaze Hosoya, and Hiroyuki Kikuchi, "Packaging technology for 40-Gb/s optical receiver module with an MU-connector interface", IEEE Trans. on Advanced Packaging, Vol. 24, No. 4, p. 429, 2001.

· 저 · 자 · 약 · 력 ·

성명 : 이봉용

◆ 학력

- 2002년 연세대 전기전자공학과 공학사
- 2002년-현재 연세대 전기전자공학과 석사과정

성명 : 주한성

◆ 학력

- 2003년 연세대 전기전자공학과 공학사
- 2003년-현재 연세대 전기전자공학과 석사과정

성명 : 고영돈

◆ 학력

- 2001년 연세대 통계학과 이학사
- 2001년-2003년 연세대 전기전자공학과 공학석사
- 2003년-현재 연세대 전기전자공학과 박사과정

성명 : 윤일구

◆ 학력

- 1990년 연세대 전기공학과 공학사
- 1995년 Georgia Institute of Technology 공학석사
- 1997년 Georgia Institute of Technology 공학박사

◆ 경력

- 1997년-1999년
미국 Microelectronics Research Center,
Research Fellow
- 1999년-2000년
한국전자통신연구원 원천기술연구본부 광송수신
소자팀 선임연구원
- 2000년-현재 연세대 전기전자공학부 교수