

## 초고속 광통신용 광 검출기 최근 개발 동향



현 경 숙  
(세종대 전자정보통신공학부 조교수)

### 1. 서 론

21 세기 최대의 가치를 창출할 정보산업의 활성화와 통신 인프라 구축은 국가 경쟁력제고와 직결된다 할 만큼 중요한 기술 분야로 대두되고 있다. 특히 광통신은 초고속, 대용량 서비스가 가능하여 적합한 기술 중의 하나로 평가되고 있으며, 이를 이용하는 기간망 및 가입자망의 서비스 속도는 70년대 시작된 국간 서비스를 시작으로 급속한 발전을 거듭하여 이미 수 Tb/s 급 전송 용량까지 각국에서 경쟁삼아 실현하고 있는 현상이다. 정부도 2005년까지 국가 기간망을 Tbps 급으로 가입자망은 20 Mbps 급으로 속도를 올리는 초고속정보통신 고도화 계획을 수립했다. 따라서 피할 수 없게 된 것은 단일 채널 수십 Gbps 대역을 만족하는 통신 시스템에 소요되는 소자들을 개발해야 하는 것이다. 이미 국내에서도 연구소 뿐만 아니라, 광 통신산업 관련 벤처 및 대기업에서도 연구 및 사업화에 배전의 노력을 경주하고 있으며, 학교에서도 학과 개설 및 연구소등을 설립하여 기술 발전에 기여하고 있다. 본 고는 광 통신에서 가장 중요한 부분 중 하나인 광 검출기의 연구 및 발전 동향에 대하여 정리하여 보겠다.

### 2. 본 론

광 검출기는 그 사용 용도 및 속도, 파장대역별 구조, 빛을

흡수하여 전류로 전환하는 방식등에 따라 여러가지로 분류할 수 있다. 여기서는 초고속 특성을 갖는 광 검출기의 구조 및 연구방향에 대하여 간략하게 정리하고자 한다. 초고속 특성을 갖는 광 검출기의 연구방향은 두 가지로 대별할 수 있다. 한가지는 사용 대역폭과 광 변환효율의 곱을 극대화시키는 것이고, 다른 한가지는 높은 임계 전류를 갖는 고속 광 검출기를 만드는 것이다. [1] 초고속으로 연구되고 있는 광 검출기의 형태로는 pin 형태를 갖는 도파로형 광 검출기와 UTC(uni-traveling carrier) 광 검출기, 광-전 집적형 광 수신기 및 내부 이득을 가지는 APD(Avalanche Photo Diode)를 소개하겠다.

일반적으로 광검출기는 수직 입사형 구조(그림 1(a))와 단면 입사형 광 도파로 구조(그림 1(b))로 구별할 수 있다. [2] 수직형 이라 함은 빛의 입사 방향과 전류의 방향이 수평한 경우이고, 단면 입사형 (edge-coupled type) 이라 함은 빛의 방향과 전류의 방향이 수직인 경우로 구별할 수가 있다. 속도가 낮은 경우에는 주로 광 커플링 및 패키징 면에서 유리한 수직 입사형 광 검출기를 사용한다. 그러나 속도가 수십 기가 이상으로 높아지거나 특수한 목적이 있을 경우에는 단면 입사형 도파로 검출기 구조를 사용하게 된다. 2.5 Gb/s, 10 Gb/s 광 통신시스템에서는 주로 수직 입사형 pin-PD 또는 APD 를 광 검출기로 사용하고 있다. APD(avalanche photodiode)는 빛을 흡수할 뿐 아니라 빛에 의해 생성된 전자 또는 정공이 검출

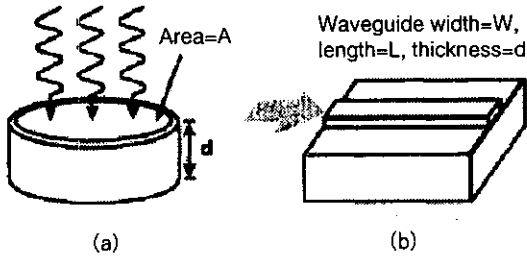


그림 1. 일반적인 광 검출기 구조: (a) 수직입사형: (b) 단면입사형.

기 내부에서 더 많은 수의 전자, 정공을 제공하는 구조를 가지고 있어, 결과적으로는 증폭된 광 전류를 얻게 된다.

### 2.1 수직 구조형의 광 검출기

초고속 광 수신기에서 가장 중요한 성능 지수(figure of merit)는 대역폭-효율의 곱이다. 일반적으로 대역폭과 효율은 서로 상반된 경향을 가지고 있어, 이를 최적화하는 광 검출기를 디자인하는 것이 필요하다. 즉 광 검출기의 흡수층이 두꺼우면 효율은 높아지지만, 생성된 운반자(전자 및 정공)들이 움직이는데 걸리는 시간이 늘어가기 때문이다. 이를 개선하려는 구조로 이중 흡수를 이용하는 구조, 즉 한면에 반사층을 만들어 흡수층의 두께를 두배로 이용하는 구조와 RCE-PD (Resonant Cavity Enhanced- Photodiode)(3)로, 이는 반도체 흡수층 아래/위에 거울 층을 형성하여 입사된 빛이 내부에서 계속 흡수되도록 하는 것으로 효율을 높일 수 있도록 하는 구조로서, 이러한 구조는 pin PD 또는 Schottky 구조 모두에 적용되고 있다. 이 경우 흡수층의 두께가 0.1  $\mu\text{m}$  일 경우라도 이론적으로 거울의 반사율이 99% 이면 90% 이상의 광전 변환 효율을 가질 수 있다. 이때 가능한 광 검출기 대역폭은 140 GHz 에 이른다(4).

### 2.2 단면 입사형 도파로 구조 광 검출기

단면에 입사를 하므로 인해서 빛이 흡수될 수 있는 길이는 수직 구조형에 비하여 수십 배 정도 늘어났지만, 이 구조의 제일 큰 단점은 단면에 입사할 때 얻을 수 있는 광 입사 효율의 감소이다(그림 2(a)). 렌즈 등을 이용하여 만들 수 있는 빛의 크기는 2  $\mu\text{m}$  정도 이나, 실제 제작되는 광 검출기의 단면의 흡수층 두께는 1  $\mu\text{m}$  이하가 보통이다. 이를 개선하기 위하여 제안된 구조는 흡수층을 두 층으로 만들거나 수동 광 도파로를 따로 제작하여, 후에 흡수층에 흡수되도록 하는 것이다(그림2(b)). 이러한 구조로 얻을 수 있는 속도는 20 GHz 이상이고, 80 % 이상의 효율(기존에는 60 % 이하)을 광전 변환 효율을 얻을 수 있었다.(5-7)

이러한 도파로형 광 검출기도 마찬가지로 RC 시상수에 영향을 받으므로, 축전 용량(capacitance)을 줄이고, 저항을 줄이는 방법을 모색하고 있는데 흡수층의 필요한 부분만 남기고 버섯형으로 에칭을 하여 저항도 줄이고 축전 용량도 줄인 구조를 발표하고 있다.

도파로형 검출기에서의 입력광 효율을 높이기 위한 구조로 spot size converting 을 위한 광 도파로를 지나가면서 점차적으로 광 흡수층으로 흡수되도록 하는 구조도 제안되고 있고 이를 사용하여 70GHz 까지 얻을 수 있다(8).

### 2.3 RF 특성을 고려한 도파로 구조의 광 검출기

40 GHz 이상이 되면 변환된 전류 신호는 RF 특성을 고려하여야 한다. 여기서 광신호와 전기신호를 잘 처리하여 효율을 높이는 구조를 두 가지로 제안하고 있다. 첫번째는 광 흡수층 위에 전극이 있어서 전류가 바로 흐르게 되어 있는 구조로서 TW-PD(Traveling-wave PD)라 하고(그림 2(c))(9,10), 두 번째는 빛이 지나가는 광 도파로가 있고 그 위로 광 흡수층이 일정한 간격으로 분산이 되어 있는 구조로서 속도정합 광검출기(VMDP: Velocity-Matched Distributed Photodiode) 라

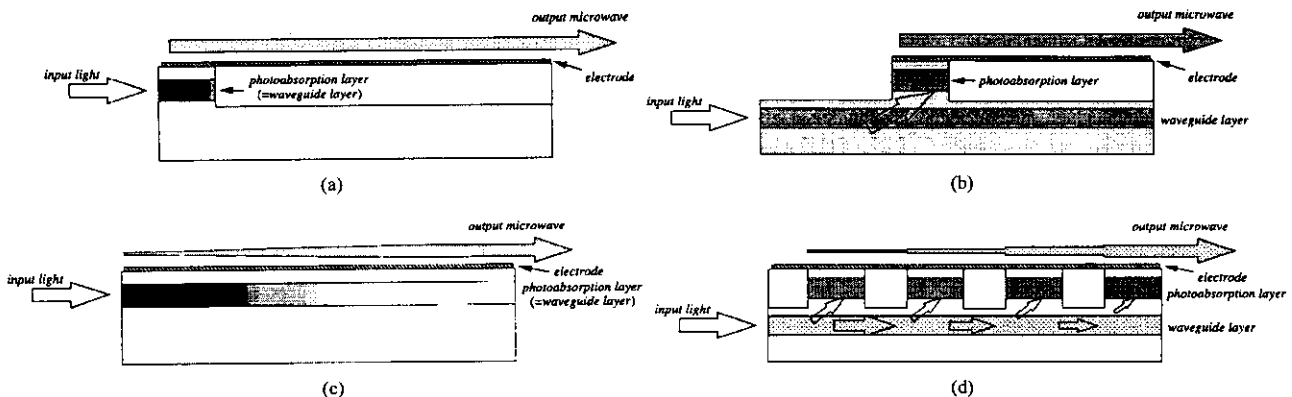


그림 2. 도파로 구조 광 검출기.

고 한다(그림 2(d))(11,12). 두 가지 구조는 광 검출기의 속도를 높이면서 고효율을 낼 수 있고, 전기 신호의 감쇄를 줄일 수 있는 구조로서 최근 초고속 설계로 주목을 받고 있으며, 미국의 UCLA, UCSB 등에서 활발히 연구하고 있다.

VMDP 구조를 이용하여 효율을 50% 이상 달성할 수 있고, 사용 대역폭을 감소 시키지 않고도 임계 전류(saturation current)를 높일 수 있다. 이 구조로 InGaAs-MSM-PD를 제작하여 78GHz(13)를 얻었다. UCLA에서는 속도정합형 구조를 이용한 pin 광 검출기로 35GHz 까지 평탄한 특성을 나타내고, 출력 DC 광 전류가 45 mA 이상이 되는 광 검출기(11)를 개발하였다.

### 2.4 고효율 임계 전류 광 검출기

단일 채널 수십 기가 이상의 광수신기는 아직 표준화 또는 널리 쓰이는 구조가 정해 지지 않은 상태이지만, 초고속 광 신호를 수신기 입력 직전에 광 증폭기를 이용하여 증폭하는 경우도 생기게 된다. 즉 광 검출기가 입사되는 빛의 세기에 대하여 선형적으로 반응하는 영역이 넓어져야 한다는 것이다. 그리고, 수십 기가 이상의 영역에서 RF와 광시스템을 접목하려는 시도가 이미 활발히 이루어지고 있어서 RF-광 검출기에 사용하기 위해 높은 입력 광세기에 대해서도 선형성이 보장되는 구조를 필요로 하고 있다. 일본에서는 이미 1990년대부터 RF-Photonics 분야에 대한 연구를 활발히 전개해 오고 있어, 이 분야의 광 검출기에 대해서도 가장 앞선 연구결과들을 발표하고 있다. 그 중의 대표적인 것으로 UTC(Uni-Traveling Carrier)-PD(14,15)를 들 수 있다.

고출력 임계 전류를 얻는 구조로서 1997년 일본의 Ishibashi 에 의하여 처음으로 제안되었다. 그림 3에 보이는 바와 같이 pin 구조를 하고 있지만 빛을 흡수하는 부분이 i 층이 아니라 p 층에서 흡수하도록 설계되었다. 위 구조의 장점은 임계속도가 정공 보다 5 배 빠른 전자만 광 전류에 기여할 수 있도록 하므로서 광 검출기의 속도를 향상 시켰으며, 출력 전류는 60 mA 이상을 얻을 수 있다.

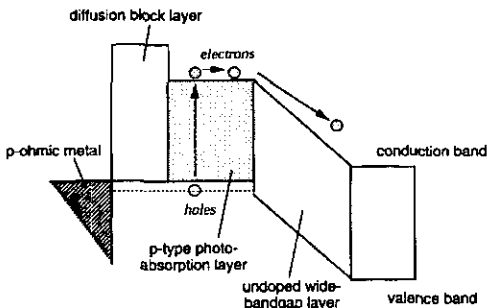


그림 3. 고효율 임계 전류 광 검출기.

### 2.5 전-광 단일 집적형 (Opto -Electric Integrated Circuit) 광 검출기

수신기를 제작하는데 광 검출기와 전치증폭기(preamp.)에 해당하는 전자 소자를 단일 기판위에 집적하는 구조로서 때로는 비용(cost)면에서 유리함을 추구할 때 사용하기도 하고, 특성을 향상시키기 위하여 사용하기도 한다. 그림 4는 도파로형 광 검출기와 InAlAs/InGaAs HEMT 구조를 단일 집적한 예이다. 주로 InP/InGaAs 재료의 HBT, HEMT 를 전자소자로 사용한다. 1998년에는 광도파로 PD와 HEMT를 집적하여 50Gb/s 를 달성하기도 하였다(16,17).

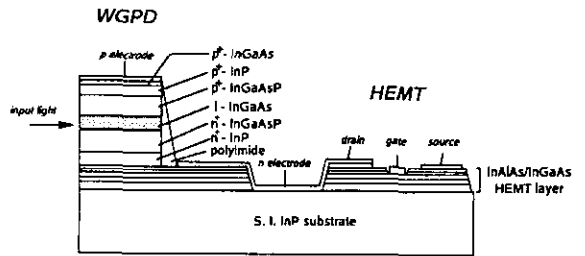


그림 4. OEIC 광 검출기 구조.

### 2.6 APD(Avalanche Photo Diode)

APD 라 함은 흡수한 빛에 의하여 생성된 전자와 정공이 단 순히 전류에 기여하기 보다는 전자와 정공이 일정비율의 또 다른 전자 정공을 생성하므로서, 입사된 빛을 증폭 시키는 역할을 한번 더 수행하여 수신기의 수신감도를 향상시키는 역할을 한다 [18-20]. 속도 및 증폭을 향상시키기 위하여 여러 가지 구조가 제안되고 있는데, 그 중 증폭층과, 흡수층을 분리하고 전자, 정공의 이동을 원활하게 하기 위한 반도체 밴드갭 경사층을 삽입한 SAGCM(separated absorption, Grading, Charge and multiplication) 구조를 대부분 사용하고 있다. 소자의 속도 20 Gbps 이상으로 향상시키기 위하여 공진형 (Resonant Cavity) 구조 및 도파로형 구조도 연구되고 있다.

일반적으로 2.5 Gbps 급에서는 pin -PD에 비하여 10 dBm 정도의 수신감도를 향상시킬 수 있으며, 10 Gbps - APD 는 소자의 신뢰성 및 재현성등을 보장하기 위한 연구가 오랜 동안 진행되고 있고, 최근 JDS-Uniphase(EPITAXX Div.)에서 개발되어 발표를 하였다. 10 Gbps 에서는 6~8 dBm정도의 수신감도를 향상 시킬 수 있으며, 고품질의 통신 서비스가 필요한 시스템 또는 MAN (Metropolitan Area Network) 등의 시스템 구성시 광 증폭기의 사용 개수를 줄이기 위하여 APD 를 적용한다.

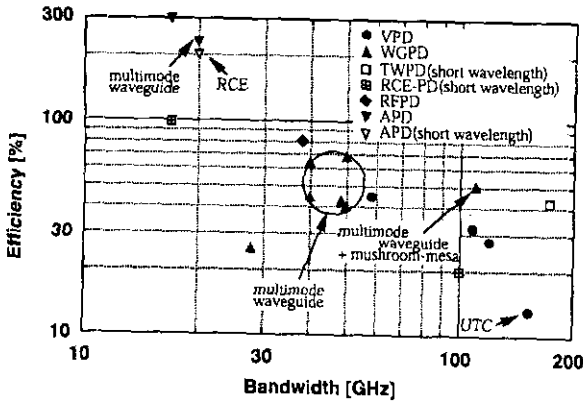


그림 5. 고속 광검출기 구조별 특성.

### 3. 결론

위 그림은 현재까지 연구 발표된 고속 광 검출기를 요약한 그래프(1)이다. 높은 대역폭-효율 면에서는 도파로형의 TW-PD 에서 200 GHz 까지, RFPD 에서 40 GHz 까지, APD 로는 20 GHz까지 필요한 특성을 얻을 수 있었으며 기존의 구조에 공진형 구도를 도입하면 더 좋은 특성을 갖는 구조로 발전시킬 수 있다. 광 시스템과 RF 복합 광 시스템을 구성하는데 필수적인 높은 임계 전류를 갖는 광 검출기는 전기적인 속도와 빛의 속도를 잘 일치 시켜야 하는 기술적인 문제를 가지고 있지만, 여러 개의 TW-PD를 광 도파로를 사용하여 연결한 구조로 높은 전류를 얻을 수 있고, NTT에서 제안한 UTC 라는 회기적인 구조를 제안하여 60 mA 이상의 높은 전류를 얻는데 성공하였다. 아직도 초고속 광 검출기에 대한 연구는 계속 중이며 유-무선 복합 통신 분야에서도 널리 사용이 될 것임을 감안하면, 국내에서도 우수한 연구결과가 나오기를 바라 마지 않는다.

### Reference

[1] K. Kato, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 47,1265-1279 (1999) "Ultrawide-Band/High-Frequency Photodetectors"

[2] Wu, M.C.; Itoh, T.; Chau, T.; Islam, S.; Mathai, S.; Rollinger, A.; Nespola, A., "Recent progresses in high frequency, high power photodetectors", Microwave Photonics, 1998. MWP '98, International Topical Meeting on , 1998, Page(s): 237-239.

[3] K. Kishino, M., Uni, J. Chyi, J. Reed, L. Arsenault, and H. Morko, "Resonant cavity-enhanced (RCE) photodetectors," IEEE J. Quantum Electron., vol. 27, pp. 2025-2034, Aug. 1991.

[4] H. Nie, K. A. Anselm, C. Hu, S. S. Murtaza, B. G. Streetman, and J. C. Campbell, "High-speed resonant-cavity separate absorption and multiplication avalanche photodiodes with 130 GHz gain-bandwidth product," Appl. Phys. Lett., vol. 70, pp. 161-163, 1997.

[5] Demiguel, L. Giraudet, P. Pagnod-Rossiaux, E. Boucheres, C. Jany, L. Carpentier, V. Coupe, S. Fock-Yee, J. Decobert, and F. Devaux, IEE Electronics Letters, 37, 516-518(2001) "Low-cost, polarization independent, tapered photodiodes with bandwidth over 50 GHz"

[6] K. Kato, S. Hata, A. Kozen, and J. Yoshida, "High-efficiency waveguide InGaAs p-i-n photodiode with bandwidth of greater than 40 GHz," in OFC'91, 1991.

[7] D. Wake, T. P. Spooner, S. D. Perrin, and I. D. Henning, "50 GHz InGaAs edge-coupled pin photodetector," Electron. Lett., vol. 27, pp.1073-1075, 1991.

[8] G. Unterborsch, A. Umbach, D. Trommer, and G. G. Mekonnen, "70 GHz long wavelength photodetector," in ECOC'97, vol. 2, 1997, pp. 25-28.

[9] K. Giboney, M. Rodwell, and J. Bowers, "Traveling-wave photodetectors," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 4, pp. 1363-1365, Dec. 1992.

[10] L. Y. Lin, M. C. Wu, T. Itoh, T. A. Vang, R. E. Muller, D. L. Sivco, and A. Y. Cho, "High-power high-speed photodetectors design, analysis, and experimental demonstration," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 45, pp. 1320-1331, Aug. 1997.

[11] Islam, M.S.; Jung, T.; Itoh, T.; Wu, M.C.; Sivco, D.L.; Cho, Y., "Velocity-matched distributed photodetectors with p-i-n photodiodes", Microwave Photonics, 2000. MWP 2000, International Topical Meeting on , 2000 Page(s): 217-220

[12] Islam, M.S.; Tai Chan; Nespola, A.; Mathai, S.; Rollinger, A.R.; Deal, W.R.; Itoh, T.; Wu, M.C.; Sivco, D.L.; Cho, A.Y., "Distributed balanced photodetectors for high-performance RF photonic links" IEEE Photonics Technology Letters, Volume: 11 Issue: 4, April 1999, Page(s): 457-459

[13] E. Droge, E. H. Böttcher, S. Kollakowski, A. Strittmatter, O. Reimann, R. Steingruber, A. Umbach, and D. Bimberg, "Distributed MSM photodetectors for the long-wavelength range," in ECOC'98, vol. 1, 1998, pp. 20-24.

[14] T. Ishibashi, N. Shimizu, S. Kodama, H. Ito, T. Nagatsuma, and T. Furuta, "Uni-traveling-carrier photodiodes," Ultrafast Electron. Optoelectron. '97 Conf., Incline Village, NV, 1997.

[15] Y. Muramoto, K. Kato, M. Mitsuohara, O. Nakajima, Y. Matsuoka, N. Shimizu, and T. Ishibashi, "High-output-voltage, high speed, high efficiency uni-traveling-carrier waveguide photodiode," Electron. Lett. vol. 34, pp. 122-123, 1998.

[16] H.G. Bach, W. Schlaak, G. G. Mekonnen, R. Steingruber, A. Seeger, T. Engel, W. Passenberg, A. Umbach, C. Schramm, and G. Unterborsch "50 Gbit/s InP-based photoreceiver OEIC with gain flattening transfer characteristics", in ECOC'98, vol.1, 1998, pp. 55-56.

[17] K. Takahata, Y. Miyamoto, Y. Muramoto, H. Fukano, and Y. Matsuoka, "50-Gbit/s operation of monolithic WGPD/HEMT receiver OEIC module," in ECOC'98, vol. 3, 1998, pp. 67-68.

[18] C. Cohen-Jonathan, L. Giraudet, A. Bonzo, and J. P. Praseuth, "Wave-guide AllnAs avalanche photodiode with a gain-bandwidth product over 160 GHz," Electron. Lett., vol. 33, pp. 1492-1493, 1997.

[19] R. Kuchibhotla, A. Srinivasan, J. C. Campbell, C. Lei, D. G. Deppe, Y. S. He, and B. G. Streetman, "Low-voltage high-gain resonant-cavity avalanche photodiode," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 3, pp. 354-356, Apr. 1991.

[20] H. Nie, K. A. Anselm, C. Hu, S. S. Murtaza, B. G. Streetman, and J. C. Campbell, "High-speed resonant-cavity separate absorption and multi-

plication avalanche photodiodes with 130 GHz gain-bandwidth product," Appl. Phys. Lett., vol. 70, pp. 161-163, 1997.

## 저 자 약 력

**성명 : 현경숙**

**◆ 학 력**

1987년 2월 서울대학교자연과학대학 물리학과 졸업  
 1989년 2월 한국과학기술원 물리학과 석사  
 1991년 2월 한국과학기술원 물리학과 박사

**◆ 경 력**

1994년 2월-2001년 2월 한국전자통신연구원 선임연구원  
 2001년 3월-현재 세종대학교 전자정보통신공학부  
 광공학과 조교수

**◆ 주 관 심 분 야**

- 광통신용 광 검출기
- 초고속 애벌랜치 광 검출기
- 초고속 광 수신기
- RF-Photonics 용 광 검출기
- 광통신용 파장 필터 및 광 도파로 소자