

2.5Gbps 광통신용 InGaAs Separate Absorption Grading Multiplication (SAGM) Avalanche Photodiode의 제작 및 특성분석*

유 지 범

성균관대학교 재료공학과

박찬용 · 박경현 · 강승구 · 송민규 · 오대곤 · 박종대 · 김홍만 · 황인덕 · 박형무

한국전자통신연구소 화합물반도체연구부

윤태열 · 이창희 · 심창섭

한국전자통신연구소 광통신연구실

곽 병 화

한국전자통신연구소 물성분석연구실

(1993년 12월 30일 받음)

2.5 Gbps 광통신시스템용 수광소자로서 charge plate층을 갖는 링구조의 separate absorption grading multiplication Avalanche photodiode를 제작하고 그 특성을 조사 분석하였다. Avalanche Photodiode의 제작은 Metal-Organic Chemical Vapor Deposition과 Liquid Phase Epitaxy법을 이용한 에피성장과, Br: Methanol을 이용한 채널식각 방법을 사용하였고, passivation과 평탄화는 photosensitive polyimide를 이용하였다. 제작된 APD는 10 nA 이하의 작은 누설전류를 나타내었고, -38~39 V의 항복전압을 나타내었다. 제작된 APD를 GaAs FET hybrid 전치증폭기와 결합하여 2.5 Gbps 속도에서 2²³-1의 길이를 갖는 입력 광신호에 대해 10⁻¹⁰ Bit Error Rate에서 -31.0 dBm의 수신감도를 얻었다.

I. 서 론

광수신기는 광통신 시스템의 성능에 큰 영향을 미치는 중요한 요소로서 광섬유를 통하여 전송되어 온 광 신호를 전기신호로 바꾸는 역할을 한다. 광수신기는 광검출기와 전치증폭기로 구성되는데, 전송속도가 Giga bit rate에 이르는 고속 전송시스템에서는 광검출기로 PIN 광검출기보다는 자체 증폭 기능을 가지고 있는 avalanche photodiode(APD)가 유리하다.^[1]

APD는 입력 광신호가 광여기 현상에 의해 전자-정공 쌍을 생성하는 흡수층(absorption layer)과 생성된 반송자가 인가된 전압에 의해 충분한 에너지를 받아 가전대의 전자와 충돌하여 새로운 전자-정공 쌍을 생성하는 증폭

(애벌랜치 증폭)에 의한 신호의 증폭이 이루어지는 증폭층(multiplication layer)과, 광여기된 반송자를 증폭층으로 원활하게 이동시키기 위해 흡수층과 증폭층 사이에 위치시키는 천이층(grading layer)으로 구성된다. 흡수층으로는 입력광 신호 파장(1.3 μm 혹은 1.55 μm)에 따라 광통신용소자에서는 In_{0.53}Ga_{0.47}As가 사용되며, 증폭층으로는 InP가, 천이층으로는 다른 밴드갭을 갖는 InGaAsP 2~3층이 사용된다. 이와같이 흡수층과 증폭층이 분리되어 있으며, 흡수층과 증폭층 사이에 천이층이 첨가된 구조를 SAGM (Separate Absorption Grading and Multiplication)구조라 한다. 최근에 광통신용 InGaAs SAGM구조의 APD에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다.^[2,24]

APD 설계에 있어서는 흡수층이 완전히 공핍되어 입력 광신호의 손실이 없도록 하여야 하며, 증폭층에 충분한 큰 전계가 인가되어 반송자에 의한 증폭이 일어날 수

* 본 연구는 1993년도 한국통신의 출연금에 의해 수행되었음.

있도록 하여야 한다. 이때 증폭층에 비해 상대적으로 밴드갭이 작은 흡수층과 천이층에 높은 전계가 인가될 경우 터널링에 의한 누설전류가 생기게 되어 소자의 성능을 크게 저하시키므로, 각 층의 두께와 도핑농도를 조절하여 흡수층과 천이층에 큰 전계가 인가되지 않도록 하여야 한다. 최근에는 증폭층과 천이층 사이에 charge sheet층(혹은 delta doped 층)을 넣어 흡수층과 천이층에 필요 이상의 높은 전계가 인가되는 것을 방지한 구조에 대한 연구가 보고되었으며,^[2,6-10,17,21-24] 이와 같은 구조를 SAGCM (Separate Absorption, Grading, Charge and Multiplication)구조라고 한다. 또한 APD는 항복전압 (breakdown voltage) 근처의 높은 전압 영역에서 동작하는 소자이므로 pn 접합 모서리나, 이중 접합계면 부근에 전계가 집중되어 증폭층에서 광여기된 반송자에 의한 애벌랜치 증폭이 일어나기 전에 터널링이 심각히 발생하여 소자의 조기항복(pre-mature breakdown)이 나타나는 것을 방지하기 위하여 가드링을 사용한다. 일반적으로 가드링은 Cd 확산 Be 이온주입에 의해 만드는데, 최근에는 가드링 대신 charge plate층을 증폭층의 중앙에 삽입시켜, 증폭층의 중앙부분에 pn 접합 모서리나, 이중접합 계면보다 상대적으로 높은 전계가 인가되도록 하여 가드링의 역할을 하도록 하는 새로운 구조가 보고되고 있다.^[6-10]

본 연구에서는 가드링대신에 charge plate층을 이용하는 SAGM 구조를 이용하고, 주변과 소자를 격리시키기 위하여 소자주변에 채널을 형성하고, 폴리이미드로 채널을 채워 평탄화함과 동시에 식각계면을 passivation하는 링형태의 구조를 선택하여 소자를 제작하고, 특성을 분석하였다. 본 연구에서 사용한 구조는 가드링을 사용하지 않아도 되므로 제작 공정이 간단하고, 제작공정에서 감광성 폴리이미드를 사용하여 제작공정을 간단히 하였

다는 특징을 갖는다. 본 연구에서 제작한 APD칩을 GaAs FET 전치증폭기와 결합한 수신 모듈을 제작하여 광수신기의 동작 특성을 측정하였다.

II. Avalanche photodiode의 제작

그림 1에 본 연구에서 제작한 APD의 단면도가 나타나 있다. 각 층의 두께 및 도핑농도는 표 1에 요약되어 있으며, 표 2에 제작공정 흐름도가 나타나 있다. Charge plate층까지 MOCVD(Metal-Organic-Chemical-Vapor-Deposition)법에 의해 1차 에피성장을 한 후 charge plate층을 식각하고, MOCVD와 LPE법에 의해 재성장

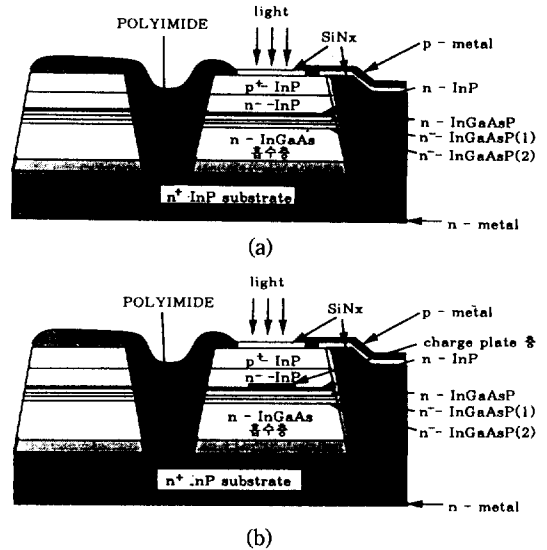
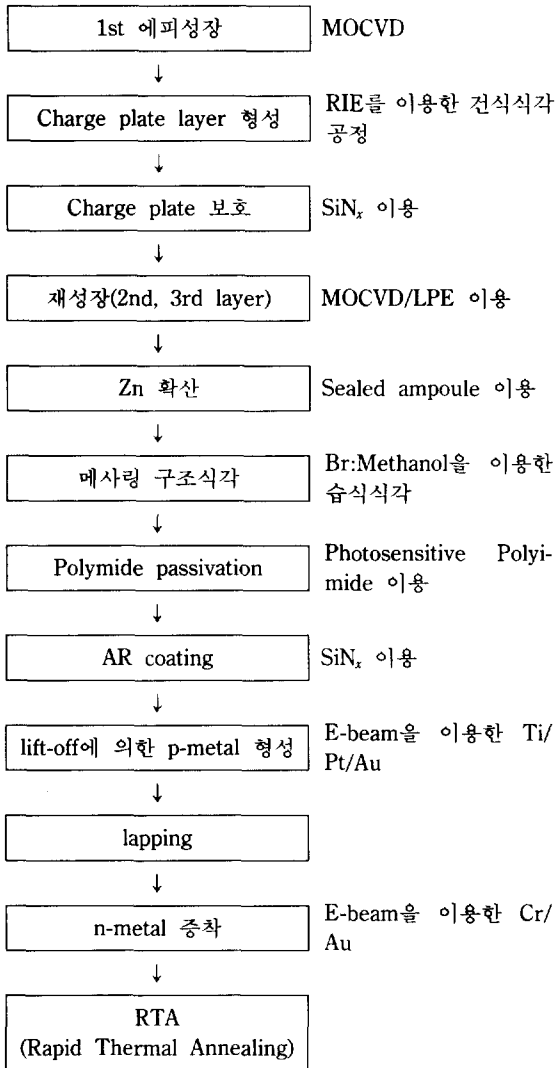


그림 1. SAGM InGaAs APD 구조도: (a) charge plate 층이 없는 구조, (b) charge plate층이 있는 구조.

표 1. Avalanche Photodiode 각 층의 두께 및 도핑농도

Layer	특 징	Carrier density(cm ⁻³)	두께(μm)
10	p ⁺ -Inp	<2×10 ¹⁸	1.1
9	n ⁻ -Inp	<2×10 ¹⁵	0.4
8	n-InP	2×10 ¹⁷	0.08
7	n-InP	2×10 ¹⁷	0.08
6	n-InGaAsP	2×10 ¹⁷	0.07
5	n ⁻ -InGaAsP	<5×10 ¹⁵	0.05
4	n ⁻ -InGaAsP	<5×10 ¹⁵	0.05
3	n ⁻ -InGaAs	<2×10 ¹⁵	1.5
2	n ⁺ -InP buffer	>2×10 ¹⁸	0.5
1	n ⁺ -InP	>2×10 ¹⁸	

표 2. Avalanche Photodiode 제작 공정 흐름표



하였다. Charge plate 층은 polyimide 사이의 계면에 높은 전계가 인가되어 애벌랜치 증폭 전에 소자가 조기항복 (premature breakdown)을 나타내는 것을 방지하기 위해 사용하는 층으로 가드링을 사용하는 것과 같은 효과를 갖게 된다. Charge plate층의 크기는 APD의 크기에 따라 달라지도록 설계하였는데, 본 연구에서는 직경이 7.5 μm (소자의 직경이 30 μm일 때)에서 30 μm (소자의 직경이 70 μm일 때)까지 변화하도록 설계하였다. 본 연구에서 목표로 하는 charge plate층의 두께는 약 600~800 Å 정도로 charge plate층의 두께는 APD의 성능에 큰 영향을 미치므로, 식각시 두께의 정확한 조절이 요구된다.

Charge plate층의 형성을 위해서 reactive ion etching (RIE)을 이용한 건식식각법을 이용하였다. RIE를 이용한 건식식각의 경우 정확한 두께를 재현성 있게 얻을 수 있다는 장점이 있으나, 건식식각에 의한 damage의 제거가 매우 중요한 문제로 대두된다. 특히 charge plate 층은 높은 전계가 인가되는 부분이므로 건식식각에 의한 damage의 제거는 매우 중요한 문제가 된다. 본 연구에서는 charge plate층의 형성 후, MOCVD에 의한 InP의 재성장이 thermal cleaning 과정과, 650°C에서 1시간 동안 이루어지도록 하였으므로, 재성장 과정을 통해 자연스럽게 건식식각에 의한 damage의 제거가 이루어지게 하였다. RIE에 의한 건식식각은 40 mTorr의 압력과, CH₄/H₂=10/40 sccm의 유량에서 50 W의 출력으로 10~15 분간 수행하였으며, 건식식각에 따른 식각면과 마스크로 사용한 SiN_x 위에 생성된 polymer형태의 잔류물은 산소 플라즈마를 이용하여 제거하였다.

Charge plate층 형성 후, 재성장 계면의 보호와 건식식각에 의한 damage 제거를 위해서 MOCVD를 이용하여 약 1 μm의 undoped InP를 1차 재성장하고, charge plate층에 의한 단차를 평탄화하기 위하여 LPE(Liquid Phase Epitaxy)법을 이용하여 0.5 μm의 undoped InP를 재성장하였다. MOCVD와 LPE 성장 계면은 후속 Zn 확산 공정을 통하여 p-InP로 변환시켰으므로 큰 문제가 없을 것으로 예상된다.

pn 접합 형성을 위하여 Zn 확산 공정을 수행하였다. Zn 확산은 sealed ampoule방법을 이용하였는데, Zn 확산원으로는 Zn₃P₂와 다결정 InP를 사용하였으며, 530°C의 확산온도에서 10~15분간 수행하였다. SIMS(secondary ion mass spectrometry)을 이용하여 pn 접합의 깊이가 1.0~1.2 μm임을 확인하였으며, 제작된 소자의 특성 분석시 활용하였다. SIMS 분석은 이온주입된 Zn를 표준시료로 이용하였으며, CAMECA 4f를 이용하였다.

APD 주변에 채널 형성을 위하여 습식식각법을 사용하였다. 습식식각법은 재현성과 정밀도에서 구현상 어려운 점이 있지만 식각에 의한 다른 damage 문제가 없다는 장점을 갖는다. 비선택적 식각용액으로는 undercut의 문제가 상대적으로 심각하지 않는 Br:Methanol을 사용하였다. 이때 사용한 Br의 농도는 0.5%였으며, 용액을 충분히 교반하여 균질화시킨 후 식각을 수행하였다. Br:Methanol을 사용하여 InGaAs 흡수층의 일부까지 식각을 한 후, H₂SO₄ 계통의 식각용액을 이용하여 잔류 In_{0.53}Ga_{0.47}As를 식각하였으며, bonding pad의 정전용량에 의한 소자의 속도 제한을 방지하기 위해 bonding pad 아래 부분도 채널식각시 함께 식각하였다.

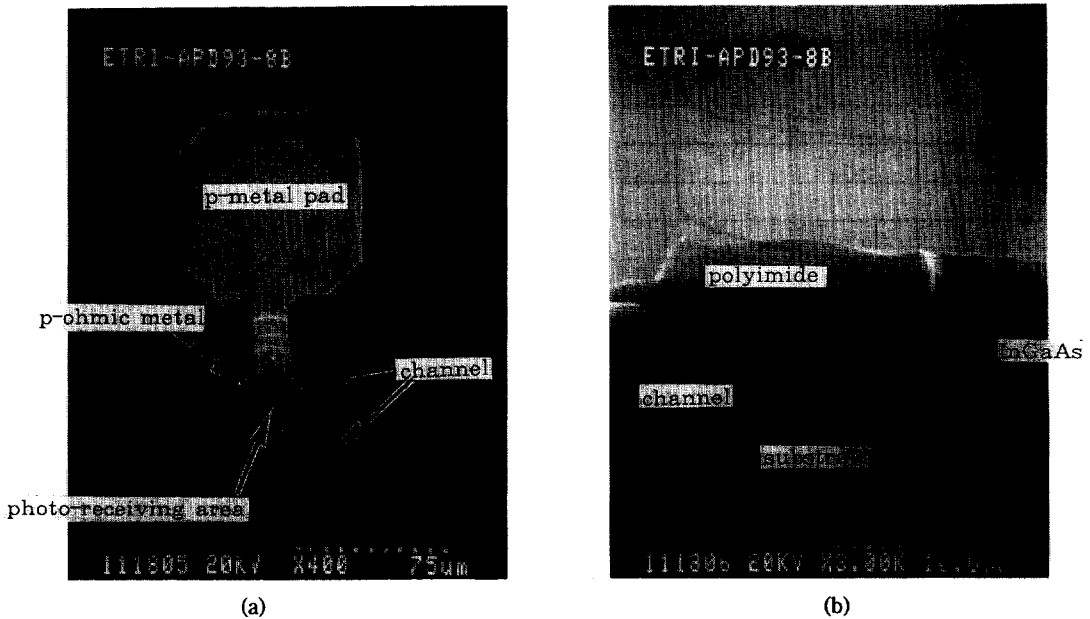


그림 2. 제작된 Avalanche photodiode의 표면사진(a)과 단면사진(b).

식각계면의 passivation과 평탄화를 위하여 polyimide를 사용하였다. 본 연구에서는 공정의 단순화를 위하여 photosensitive polyimid를 사용하였으며, 채널과 더불어 pad 아래 부분도 polyimid로 채웠다. 링구조를 이용할 경우, 채널 형성을 위하여 식각한 깊이가 4 μm 정도 이었음에도 불구하고, 한번의 코팅으로 소자의 active 부분이 충분히 passivation 되었으며, 평탄화도 쉽게 이루어졌다. Polyimid의 immidization은 오븐을 사용하여 질소 분위기 하에서 350°C에서 1시간 수행하였다.

p-InP ohmic metal로는 Ti(300A)/Pt(300A)/Au(4500A)를 n-InP ohmic metal로는 Cr(300A)/Au(3000A)을 Electron beam 증착기를 이용하여 증착하였다. p-metal 증착을 lift-off법을 이용하여 수행하는데, 공정의 용이성을 위해 Photo Resist의 두께를 두겹게하여 사용하였다. Ohmic 특성의 향상을 위하여 ohmic metal의 증착후 RTA(Rapid Thermal Annealing)를 이용하여 forming 가스 분위기 하에서 425°C에서 30초간 처리하였다.

그림 2에 제작된 APD의 평면 사진(a)과 단면 사진(b)이 나타나있다. 그림 (a)에 나타난 APD는 주변과 소자의 격리(isolation)를 위하여 이중 채널을 사용한 경우로 pn접합의 직경이 70 μm이고, 전극안의 수광면적 직경이 34 μm이다. 그림 (b)의 단면에서 볼 수 있듯이 격리를 위한 채널이 폴리미이드로 완전히 채워졌으며, 채널이

기관까지 형성되었음을 볼 수 있다. 그림 2에서 볼 수 있는 바와 같이 에피층의 아래는 흡수층으로 사용한 In_{0.53}Ga_{0.47}As로 두께는 1.5 μm이며, 위에 보이는 층은 InP로서, 증폭층인 n-InP와 p-InP층이 함께 나타나 있으며, 총 두께는 약 1.5 μm이다. SEM 단면 사진과 SIMS 분석 결과로부터 p-InP층과 증폭층의 두께가 각각 1.1~1.2 μm과 0.3~0.4 μm임을 알 수 있다.

III. Avalanche photodiode의 특성 분석 및 토의

제작된 InGaAs APD의 역바이어스에 따른 log전류(I)-전압(V) 특성이 그림 3에 나타나 있다. 측정된 APD의 pn 접합부 직경은 40 μm이었고 표면 수광면적은 직경이 28 μm이었다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 암전류가 10 nA 이하의 매우 작은 값을 나타내었는데 이는 성장된 에피특성이 매우 우수하며, charge plate 층의 형성시 건식식각에 의한 damage가 MOCVD를 이용한 재성장 과정 중 완벽하게 제거되었으며, 평탄화를 위한 LPE 재성장 계면이 Zn 확산에 의해 p-InP로 전환되어 다른 문제를 발생시키지 않았음을 나타낸다. 또한 채널형성을 식각한 반도체 계면의 polyimide passivation효과가 매우 우수함을 나타내준다. 제작된 APD는 항복전압이 -38~39 volt로 제작된

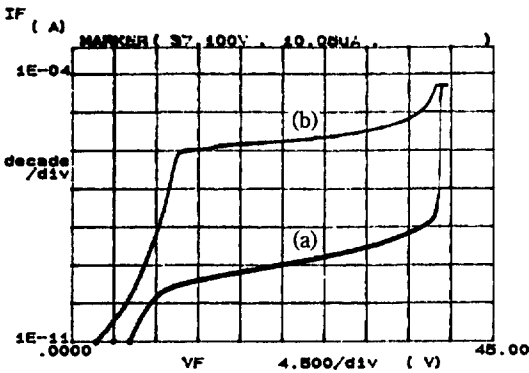


그림 3. 제작된 APD의 log (전류)-역바이어스 전압 특성: (a) 암전류 특성, (b) 추력이 2.9 μW의 파장이 1.55 μm인 반도체레이저를 조사했을 때 특성.

소자 전체에 걸쳐 매우 균일한 값을 보여주었다. 이로부터 성장된 에피층이 매우 균일하며, 소자 제작 공정이 안정되었음을 확인할 수 있었다.

그림 3의 light log (I)-V 특성은 1.55 μm 반도체 레이저를 광원으로 이용하였으며, 이때 입사 광출력은 2.9 μW였다. 초기에 광전류(photocurrent)가 나타나지 않는 것은 입사광이 흡수층에서 흡수되어 광여기에 의한 전자-정공이 생성되더라도, 인가된 전압이 증폭층과 천이층의 공핍에 사용되어 실제적으로 흡수층에는 내부 전계가 형성되지 못하여 생성된 전자-정공이 전류에 기여하지 못했기 때문이다. 따라서, 광전류가 측정되기 시작하는 -8~9 V는 charge plate층 이외의 부분(charge plate 층 주변)의 증폭층과 천이층이 완전히 공핍된 상황을 나타내며, 이후 인가전압에 따른 광전류의 증가는 흡수층의 공핍영역이 증가하여 광여기된 전자와 정공이 내부 전계에 의해 collection되는 양의 증가에 기인하는 것으로 생각된다. -10~12 Volt 근처에서 보이는 shoulder는 광여기에 의해 생성된 전자-정공 쌍이 모두 collect 되었을 때의 값으로, charge plate층 이외 부분에서는 이득이 1이나, charge plate층이 있는 증폭층에서는 이득이 1 이상인 상태에서 제작된 APD로부터 얻어지는 광전류 값으로 생각된다. -12~14 V에서 부터 광전류가 인가전압에 따라 증가하는 것은 광여기된 반송자가 인가된 전계에 의해 증폭층에서 증폭되는 것에 의한 것으로, 초기에는 그 증가정도가 작다가 항복 전압(VB) 근처에서 급격히 증가함을 보여준다. -38.4 V의 항복전압을 보인 측정된 APD는 -36 V에서, 약 10배 정도로 증폭된 광전류를 나타냈다.

제작된 직경 40 μm의 APD의 정전용량은 -20 V의 인가전압 하에서 0.25 pF이었으며, submount에 APD 칩을 die bonding하고 wire bonding 한 상태에서는 0.35 pF이었다. 이와같이 작은 정전용량은 2.5 Gbps 광통신용 APD의 요구규격인 0.6 pF보다 작으므로, RC 시정수(time constant)가 응답속도에 제한을 주지 않을 것으로 생각된다.

APD의 중요한 특성인 이득과 대역폭의 곱을 light-wave component analyzer를 이용하여 측정하였다. APD에 인가되는 전압을 이득이 1인 14 V부터 항복 전압 전까지 증가시키면서 APD의 상대적 이득을 측정하였다. 그러나, 본 연구에서 사용한 lightwave component analyzer의 대역폭이 3 GHz이었기 때문에 항복전압 근처에서도 제작된 APD의 3 dB 차단주파수(cut-off frequency)를 발견할 수 없었다. 따라서 이득 × 대역폭의 정확한 측정을 위해서는 대역폭이 10 GHz 이상인 lightwave component analyzer의 사용이 요구된다. 측정결과를 이용한 계산에 의하면 제작된 APD는 40 GHz 이상의 gain × bandwidth product를 나타낼 것으로 예상된다.

제작된 APD를 submount에 장착한 후, GaAs FET로 구성되는 hybrid 형태의 전치 증폭기와 연결하여 2.5 Gbps 시스템에서 수신감도를 측정하였다. 수신감도의 측정방법은 다른 논문에서 자세히 상술되어 있다.^[25] APD + FET 수신기는 2²³-1 길이의 random 입력 광신호에 대해 10⁻¹⁰ BER(bit error rate)에서 -31.0 dBm의 수신감도를 나타내었다. 2.5 Gbps 광통신용 시스템의 요구 규격이 상온에서 -30 dBm임을 고려할 때, 본 연구에서 제작한 APD는 상용 FET 전치 증폭기와 결합하여 2.5 Gbps 광통신 시스템용 광수신기로서 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

IV. 결 론

Charge plate층을 갖는 링구조의 InGaAs SAGM APD를 제작하고 그 특성을 조사 분석하였다. 에피성장은 MOCVD와 LPE를 병용하였으며, 채널식각은 습식식각 방법을 사용하였고, passivation과 평탄화는 photosensitive polyimide를 이용하였다. 제작된 APD는 10 nA 이하의 매우 작은 누설전류를 나타내었고, 37~38 V의 항복 전압을 나타내었다. 제작된 APD는 GaAs FET hybrid 전치증폭기와 결합하여 2.5 Gbps의 속도의 입력 광신호에 대해 10⁻¹⁰ BER에서 -31.0 dBm의 수신감도를 나타내었다.

참 고 문 헌

- [1] J. C. Campbell, "Photodetectors for long-wavelength lightwave system", Ch 14 in *Optoelectronic technology and lightwave communication system*, edited by Chinlon Lin (Van Norstrand Reinhold, New York, 1989).
- [2] R. Kuchibhotla, J. C. Campbell, C. Tsai, W. T. Tsang, and F. S. Choa, *Electron. Lett.*, **27**, 1361 (1991).
- [3] S. R. Forrest, R. G. Smith and O. K. Kim *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-18**, 2040(1982).
- [4] F. Capasso, K. Mohammed, K. Alvai, A. Y. Cho, and P. W. Foy, *Appl. Phys. Lett.*, **45**, 968(1984).
- [5] F. Capasso, B. Kasper, K. Alavi, A. Y. Cho, and J. M. Parsey, *Appl. Phys. Lett.*, **44**, 1027(1984).
- [6] M. Ito, T. Mikawa, and O. Wada, *IEEE J. Lightwave Technol.*, **8**, 1046(1990).
- [7] L. E. Tarof, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **2**, 643 (1990).
- [8] L. E. Tarof, D. G. Knight, K. E. Fox, C. J. Miller, N. Puetz, and H. B. Kim., *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 670(1990).
- [9] L. E. Tarof, *Electron. Lett.*, **27**, 34(1991).
- [10] L. E. Tarof, *OFC'91 Technic. Digest. ThO-3*, 187 (1991).
- [11] L. E. Tarof, J. Yu. R. Bruce, D. G. Knight, T. Baird, and B. Osterbrink, *Photon. Technol. Lett.*, **5**, 672(1993).
- [12] H. Nakamura, S. Hanatani, T. Nozu, S. Tanaka, S. Otoshi, K. Ishida, and N. Chinine, *Proc. ECOC 90*, 261(1990).
- [13] H. Nakamura, S. Hanatani, S. Tanaka, H. Nakano, and K. Ishida, *Proc. ECOC 91, TuC-5*, 261(1991).
- [14] H. Nakamura, S. Hanatani, C. Notsu, Y. Matsuoka, and K. Ishida, *Proc. ECOC 92* (1992).
- [15] S. Hanatani, H. Nakamura, S. Tanaka, and C. Notsu, *OFC/IOOC '93, Technical Digest, ThG-3*, 187, San Jose (1993).
- [16] K. Yasuda, Y. Kish, T. Shirai, S. Yamazaki, and T. Kaneda, *Electron. Lett.*, **20**, 158(1984).
- [17] T. Mikawa, H. Kuwatsuka, Y. Ito, T. Kumai, M. Makiuchi, S. Yamajaki, O. Wada, and T. Shirai, *Proc. OFC91, ThO2*, 486(1991).
- [18] M. Ito, T. Mikawa, and O. Wada, *IEEE J. Lightwave Technol.*, **8**, 1046(1990).
- [19] N. Kobayashi, S. Yamazaki, and T. Kaneda, *Appl. Phys. Lett.*, **45**, 7, 759(1984).
- [20] H. Kuwatsuka, Y. Ito, T. Uchida, and T. Mikawa, *Proc. ECOC 91, TuC5-1*, 249 (1992).
- [21] T. Kagawa, Y. Kawamura, and Y. Iwamura, *OFC/IOOC'93, Technical Digest, ThG-2* 186, San Jose (1993).
- [22] T. Kagawa, Y. Kawamura, and Y. Iwamura, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-28**, 1419(1992).
- [23] T. Kagawa, H. Asai, and Y. Iwamura, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **3**, 815(1991).
- [24] T. Kagawa, Y. Kawamura, H. Asai, and M. Nagamura, *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 1895(1990).
- [25] 박찬용, 박경현, 유지범, 강승구, 윤태열, 김홍만, 심창섭, 박형무, *고속광통신용 PIN-FET 수광모듈 제작 및 특성측정*, 한국광학회에 투고중 (1994).

**Fabrication and characterization of InGaAs Separate Absorption
Grading Multiplication Avalanche Photodiodes for 2.5 Gbps
Optical Fiber Communication System**

J. B. Yoo

Sung Kyun Kwan University, Dept. of Materials Eng. Suwon 440-746, Korea

C. Y. Park, K. H. Park, S. K. Kang, M. K. Song, D. K. Oh, J. D. Park,
H. M. Kim, I. D. Hwang, and H. M. Park

*Electronics and Telecommunications Research Institute, Dept. of Compound Semiconductors,
Taejon 305-600, Korea*

T. Y. Yoon, C. H. Lee and C. S. Shim

*Electronics and Telecommunications Research Institute, Dept. of Optical Communication,
Taejon 305-600, Korea*

B. H. Koak

*Electronics and Telecommunications Research Institute, Dept. of Materials Characterization,
Taejon 305-600, Korea*

(Received: December 30, 1993)

We fabricated and characterized the InGaAs separate absorption, grading and multiplication (SAGM) Avalanche photodiode (APD) with a charge plate layer. Channel was employed for the isolation of the active area of APD. Metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD) and liquid phase epitaxy (LPE) were used for the epitaxial growth. Channel was formed using wet etching technique. Photo-sensitive polyimide was used for the passivation and planarization of the device. APD shows very low leakage current smaller than 10 nA and $-38\sim-39$ V of breakdown voltage. Optical receiver consisting of APD and GaAs FET pre-amplifier shows the sensitivity of -31.0 dBm at 10^{-10} BER (Bit Error Rate) and 2.5 Gbps optical random signal of $2^{23}-1$ in length.