

고속 광통신 시스템을 위한 다중양자우물구조의 애벌런치 광다이오드의 설계 및 제작

김성준 · 김문정

151-742 서울시 관악구 신림동 산 56-1 서울대학교 전기공학부

D. L. Sivco, A. Y. Cho

Bell Laboratories, Lucent Technologies, Murray Hill, NJ 07974, USA

J. M. M. Rios

Bell Laboratories, Lucent Technologies, Holmdel, NJ 07733, USA

(1996년 8월 9일 받음)

10 Gbps급 이상의 광통신에 적합한 성능을 가지는 InAlAs/InGaAs 다중양자우물 구조(MQW) 애벌런치 광다이오드(APD)를 제작하였다. 본 논문에서는 MBE로 성장된 에피구조에서 높은 농도로 도핑된 field buffer layer의 Be dopant의 다중양자우물 구조로의 indiffusion이 소자의 암전류 특성과 이득 특성에 미치는 영향을 분석하였다. Be의 indiffusion은 작은 양으로도 소자의 특성에 큰 영향을 끼칠 수 있음이 보여졌으며, spacer layer를 삽입함으로써 높은 대역폭(이득 10에서 10 GHz)을 유지하면서 낮은 암전류 특성을 나타내는 소자를 제작함으로써 spacer layer의 삽입이 indiffusion의 영향을 효과적으로 막을 수 있음을 보였다.

I. 서 론

더 높은 이득-대역폭 곱을 얻기 위한 방법으로 다중 양자우물구조를 APD의 이득 영역으로서 사용하는 것을 제한한 이래로^[1,2] APD를 최근의 10 Gbps 광수신 시스템을 포함한 고속 광수신 시스템의 주요 소자로 사용할 수 있도록 하는 여러 가지 material system이 연구되고 있다. 그중에서도 InP에 격자정합되는 InGaAs/InAlAs계 다중양자우물구조는 Hanatani 등에 의해^[3] 연구되었으며, 이득 10에서 1.8 μA 의 암전류와 12 GHz의 대역폭을 얻었다. InAlGaAs나 InGaAsP와 같이 InGaAs보다 좀 더 넓은 밴드갭을 가지는 물질을 이용하여 well로 사용하면 높은 전계에서도 tunneling 전류가 더 적게 흐르므로 암전류특성이 더 개선될 수 있다(각각 이득 10에서 56 nA^[4,5]와 0.6 μA ^[6]). 그러나 새로이 연구되는 소자들(이러테면^[8]에서와 같이)은 InGaAs/InAlAs계 물질을 이용하여 설계 제작되고 있을 정도로, InGaAs/InAlAs계

물질은 가장 간단하고 우수한 다중양자우물 구조를 이루는 물질계로의 장점을 지닌다.

게다가 InGaAs/InAlAs 물질계는 이종접합면에서 상당히 큰 conduction band offset을 가지므로 같은 전계에 대하여 상대적으로 높은 이득을 얻을 수 있으며 다시 말하면 같은 이득을 얻기 위하여 더 낮은 전압에서 동작시킬 수 있다. 또한 10 Gbps 이상의 고속 전송율에서는 최적의 잡음성능을 위한 암전류의 제한조건이 낮은 전송율에서와 같이 심각하지 않다. 따라서 InGaAs/InAlAs 물질계는 암전류특성만 개선될 수 있다면 고속용 APD를 만드는데 매우 적합하다.

본 논문에서는 InGaAs/InAlAs 물질계를 이용한 다중 양자우물을 이득영역으로 사용한 APD를 제작하고 개선된 암전류특성과 높은 이득 대역폭 곱을 얻을 수 있음을 보이고자 한다.

II. 소자 제작 및 특성

그림 1에 실험에 쓰인 에피의 기본적인 구조가 보여져 있다. 본 에피구조는 550°C에서 Sn으로 도핑된 n-InP

본 논문은 서남학술재단과 KAIST OERC의 지원에 의해 이루어졌음을 밝히고자 한다.

p ⁺ - InGaAs	1×10 ¹⁹ cm ⁻³	300 Å
p ⁺ - InAlAs	1×10 ¹⁸ cm ⁻³	1000 Å
u - InGaAs		9000 Å
p ⁺ - InAlAs	1×10 ¹⁸ cm ⁻³	380 Å
u - InAlAs	spacer layer	
u - InAlAs	150 Å	× 10
u - InGaAs	50 Å	
u - InAlAs		150 Å
n ⁺ - InAlAs	1×10 ¹⁸ cm ⁻³	2000 Å
n ⁺ - InP	substrate	

그림 1. InGaAs/InAlAs MQW APD의 에피 구조. Spacer층으로는 500 Å와 250 Å 두께의 undoped InAlAs층을 사용하였다.

기관위에 MBE를 이용하여 길러졌으며, p형 도판트와 n형 도판트로는 각각 Be과 Si이 사용되었다.

본 에피구조는 높은 이득-대역폭 곱을 얻기 위하여 최적화된 구조이다. 이득-대역폭 곱을 결정하는 중요한 변수는 이득영역의 전체 두께(well/barrier의 반복 횟수)와 각 well과 barrier의 두께이다. 즉 대역폭을 높이기 위해서는 이득영역의 전체 두께를 줄여야 하는데 이득층이 얇아지는 경우에 문제가 되는 tunneling 전류의 증가를 막기 위하여 barrier의 두께를 well의 두께보다 상대적으로 늘리는 것이 좋다. 또한 이득영역의 전체 두께를 너무 많이 줄이면 이득층에서 얻을 수 있는 이득이 작아지므로 이득과 대역폭을 동시에 늘릴 수 있도록 최적의 두께를 정해야 한다. 여기서는 이득영역으로 50 Å InGaAs well과 150 Å InAlAs barrier가 10번 반복된(전체 길이=0.2 μm) 다중양자우물 구조(MQW)를 사용하였다.^[3]

흡수층으로는 0.9 μm 두께의 undoped InGaAs층을 사용하였다. MBE로 길러진 undoped InGaAs층은 일반적으로 n-type이며 도핑 농도는 1×10¹⁵ cm⁻³ 정도의 낮은 값으로 추정된다. p-로 도핑된 InGaAs층을 이 구조에 사용하였을 경우에는^[4] 암전류의 급격한 증가로 이득을 관측할 수 없었다.

흡수층과 MQW층의 전제를 분리시키기 위하여 사용된 field buffer층으로는 1×10¹⁸ cm⁻³의 농도로 Be이 도핑된 380 Å의 InAlAs층을 사용했다. InAlAs/InGaAs MQW층에서 전자의 이온화계수(Ionization Rate, α)가 정공의

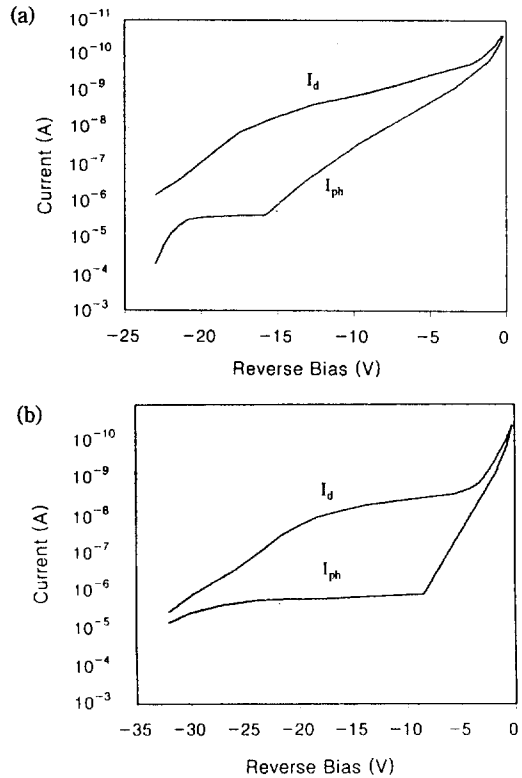


그림 2. 암전류 특성과 광전류 특성(이득=10) : 사용된 spacer층의 두께는 (a) 500 Å, (b) 250 Å 이다.

이온화계수(β) 보다 크다는 것을 감안할때 field buffer층에서도 α가 β보다 큰 경우에 더 좋은 이득 특성을 얻을 수 있다. 따라서 MQW층을 이득층으로 이용하는 경우에는 field buffer층으로서 InAlAs(α>β)를 사용하는 것이 InP(α<β)를 사용하는 것보다 더 유리하다.^[9] 길러진 에피에 습식 식각으로 30 μm 지름을 가지는 메사를 형성하고 각각 n형과 p형 금속을 evaporation 한 후에 PECVD를 이용하여 1000 Å의 SiN_x 막으로 식각된 메사의 옆면을 덮어서 APD를 제작하였다.

그러나, spacer층 없이 그림 1에 보여진 구조대로 APD를 만들었을 때에는 암전류가 지나치게 커서 광응답을 통한 이득을 전혀 얻을 수 없었다. 따라서, 기본적인 구조는 동일하게 하고 단지 500 Å의 spacer층만 p도핑된 field buffer층과 MQW층 사이에 삽입하여 다시 기존 에피를 이용하여 APD를 제작하였다. Capasso 등은^[7] InGaAs/InAlAs bulk형 APD를 제작함에 있어서 비슷한 spacer 층을 사용한 바 있다.

Spacer층을 삽입한 구조에서는 암전류 특성이 현저하게 좋아지는 것을 볼 수 있었다. 그림 2(a)는 바이어스

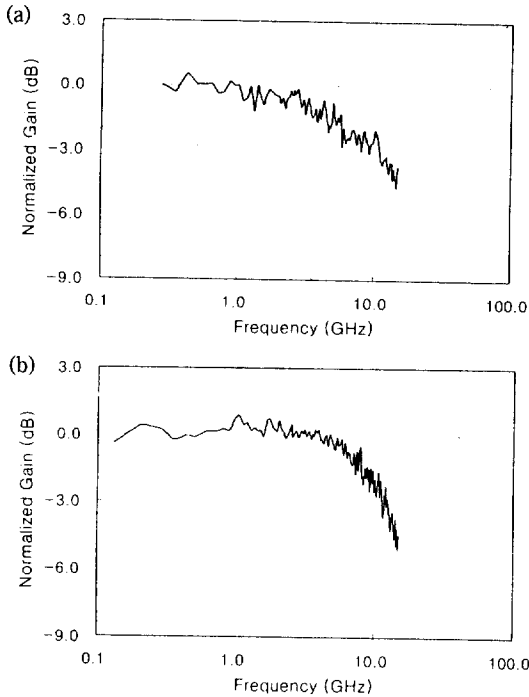


그림 3. 주파수 특성(이득=10) : 사용된 spacer층의 두께는 (a) 500 Å, (b) 250 Å 이다.

전압에 따른 새로이 제작된 APD의 암전류 및 광전류 특성을 보여주고 있다. 광전류 특성은 1.55 μm 레이저 빛을 소자의 위부분에 조사하여 얻었으며, APD에 흐르는 전류는 cascade air-gap probe를 이용하여 측정하였다. 또한 spacer층의 두께를 위의 경우의 반이 되도록 즉 250 Å의 두께를 가지도록 에피를 길러서 소자를 제작하여 암전류 특성의 변화를 살펴보았다. 그림 2(b)에서 볼 수 있듯이 250 Å spacer를 삽입한 경우 암전류의 양이 500 Å spacer의 경우보다 증가하였으며 spacer층이 두꺼울 때에 비하여 동일한 이득을 얻기 위해서는 더 많은 바이어스 전압을 필요로 하였다.

또한 광전류 특성을 살펴보면 (a)의 경우는 16 V에서 (b)의 경우에는 8 V에서 각각 광전류가 꺾이는 점이 나타난다. 이것은 흡수층이 완전히 공핍되면서 일어나는 punch through에 의한 것임을 C-V 측정 결과로부터 알 수 있다.

그림 3에서는 각 APD의 이득이 10이 될 때의 주파수 특성을 보여준다. 주파수 특성 측정에는 optical component analyzer가 달린 HP8510 network analyzer가 사용되었으며 사용한 빛은 역시 파장이 1.55 μm인 레이저 광이다. 그림 3(a)와 (b)에서 볼 수 있듯이 500 Å의 spa-

표 1. 세 가지 종류의 spacer층을 가지는 APD로부터 얻어진 각각의 바이어스 전압, 암전류 및 3 dB 대역폭 특성을 보여준다.(이득=10)

	소자 A	소자 B	소자 C	Hanatani et al. ^[3]
Spacer	없 음	500 Å	250 Å	
바이어스전압	15 V(no gain)	22.5 V	33 V	28.5 V
암전류	30 μA	5.3 μA	1.8 μA	
3 dB 대역폭	-	10 GHz	12 GHz	12 GHz

*모든 데이터는 이득이 10일 때 측정된 값들이다.(소자 A는 제외)

cer층을 가지는 APD의 경우는 3 dB 대역폭이 10 GHz로 얻어졌고 250 Å spacer층의 APD의 경우 12 GHz로 얻어졌다. Spacer층이 250 Å인 경우 spacer층이 500 Å인 경우에 비하여 암전류 특성은 나빠지는 것에 반해 3 dB 대역폭은 약간 좋아짐을 알 수 있다. 표 1에는 본 논문에서 제작한 세 종류의 APD에 대하여 각각 이득이 10이 되도록 한 경우의 바이어스 전압, 암전류 및 3 dB 대역폭을 정리하여 보여주고 있다. 또한 동일한 물질계의 InGaAs/InAlAs MQW 구조를 이용한 Hanatani 등의^[3] 데이터도 함께 보여주고 있다. 본 논문에서 사용한 데이터들은 각각의 구조에 대해 MBE로 2번씩 에피를 키우고 각 에피에 제작된 여러 개의 동일한 소자를 측정하여 얻은 결과로서 거의 모든 소자를 통해 비슷한 값을 얻었음을 밝힌다.

III. Spacer층의 효과

Spacer층의 효과는 p⁺ field buffer층의 Be 도판트의 indiffusion과 깊은 관계가 있을 것으로 예측된다. MBE로 길러진 p⁺층의 도판트로서 Be를 사용할 때 Be의 indiffusion이 그 소자의 동작 혹은 Reliability에 큰 영향을 미친다는 사실은 HBT의 베이스 도판트가 에미터로 확산되었을 때 HBT의 기능이 매우 저하되는 등의^[10] 경우를 통하여 잘 알려져 있다. 본 소자에서도 field buffer층의 indiffusion을 고려하여야 하며, 특히 Be이 MQW 영역으로 확산되는 것이 소자의 동작에 큰 영향을 미치게 된다.

Be의 MQW 영역으로의 indiffusion의 영향은 다음의 두 가지 정도로 요약될 수 있다. 우선 Be의 indiffusion에 의하여 MQW영역의 전계분포가 indiffusion이 없는 이상적인 경우에 의도했던 것과 많이 다른 분포를 가지게 되는 점이다. 본 논문에서는 Be의 indiffusion에 의하여

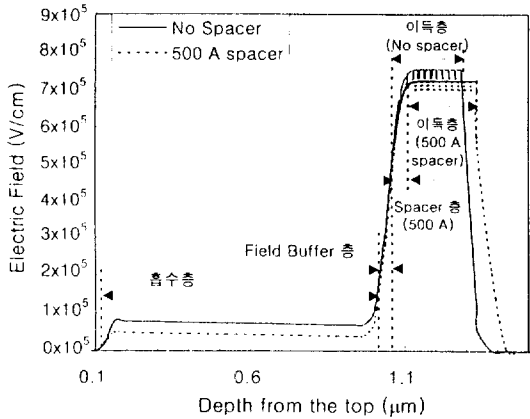


그림 4. 동일한 바이어스 전압(25 V)에 대해서 Be의 indiffusion을 고려한 경우 spacer가 없을 때와 500 Å의 spacer가 있을 때의 전계분포.

MQW영역의 전계분포가 어떻게 변화하는가를 살펴보기 위하여, Be은 에피를 키우는 동안 field buffer층의 양쪽 밖으로 Gaussian 분포를 가지면서 확산되는 것을 가정하였다. 즉 Be의 확산 계수는 InGaAs에서 $D=1.9 \times 10^{-15} \text{ cm}^2/\text{s}$ 라고 가정하고^[11](InAlAs에서도 이와 동일하다고 가정) MBE의 물질성장 속도 $0.8 \mu\text{m}/\text{hr}$ 를 고려하여 총도판트 수가 일정할 때 Be의 분포를 얻은 후, 전체 에피구조에 대하여 1차원 Poisson 방정식과 연속방정식을 풀면 그림 4와 같은 전계분포를 얻을 수 있다. 여기서 MQW 영역을 고려함에 있어서 양자역학적인 영향은 고려하지 않았으며, 이는 충분히 높은 전계에서 동작하는 APD의 경우 높은 에너지로 인하여 양자우물안에 갇혀 있을 확률이 적으므로 실제로 큰 오차를 나타내지 않게 된다. 그림 4에는 동일한 바이어스 전압에 대해서 Be의 indiffusion을 고려한 경우 spacer가 없을 때와 500 Å의 spacer가 있을 때의 전계분포를 보여주고 있다. Be의 indiffusion이 없는 이상적인 경우 흡수층에는 광에 의해 생성된 전자-홀 쌍이 드리프트될 정도의 약한 전계만 걸리고 이득영역인 MQW층에서는 충분한 multiplication이 일어날 정도의 강한 전계가 걸리게 된다. 특히 MQW영역의 전계가 균일해야 하는데 이것은 충분한 이득을 얻으면서 tunneling에 의한 암전류의 증가를 막을 수 있는 가장 최적의 형태이다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 Be의 indiffusion을 고려했을 때에는 MQW층이 Be에 의해 부분적으로 p 도핑이 되며 따라서 spacer가 없는 경우에는 MQW영역의 전계분포가 불균일해지면서 최대 전계값은 증가하게 된다. 즉, Be가 indiffusion되면 MQW영역의 전계의 최대값(peak value)에 지수함수적

으로 비례하는 tunneling 전류의 영향이 두드러지게 나타나게 되어 소자의 암전류 특성이 매우 나빠지게 될 것을 예측할 수 있다. 따라서 500 Å의 spacer를 삽입하게 되면 그림 4에서와 같이 MQW 영역의 전계분포를 균일하고 낮은 값으로 유지할 수 있음을 보여준다.

Be의 indiffusion의 또 하나의 영향은, spacer가 없는 경우 MQW 영역의 이종접합면에서 확산된 Be이 getter되어 deep trap(Schokley-Reed centers)을 형성하게 되는 것이다.^[7] 이렇게 형성된 deep trap은 space charge generation 전류를 발생시킴으로써 암전류특성을 매우 악화시킨다. 이러한 영향은 spacer층이 없을 때 현저하게 암전류특성이 나빠지는 것에서 알 수 있다.

표 1에 정리되어 있는 소자들의 결과는 다음과 같이 설명될 수 있다. 500 Å spacer를 삽입하면(소자 B) Be의 MQW영역으로의 확산은 억제되며 소자는 정상적으로 동작된다. 이 경우의 암전류특성은 동일한 물질계를 사용한 이전의 연구결과에 비해^[3] 현저하게 개선되었음을 알 수 있다. 250 Å spacer를 삽입한 경우에는(소자 C) Be의 확산이 완전히 억제되지 못하여 암전류 특성이 500 Å spacer를 삽입한 경우보다 나빠지게 된다. 그러나, spacer가 얇아지므로 전체 두께가 줄어들게 되어 이득 영역의 전계가 약간 커지고 대역폭 특성도 약간 더 좋아진다. Spacer를 쓰지 않은 경우에는(소자 A) 암전류 특성이 다른 소자들과 비교할 수 없을 만큼 안 좋다.

특히 동일한 이득을 얻기 위한 바이어스 전압의 크기가 500 Å spacer층을 가지는 구조에서 다른 구조들과 비교할 때 매우 낮은 것을 볼 수 있다. 이 사실을 통하여 이득 영역의 전계 분포는 소자의 특성을 결정하는 매우 중요한 요소임을 알 수 있다. 즉, 이득 영역에서 균일한 전계를 유지하는 것은 이득 영역 전체를 통해서 균일한 이득을 가지게 되므로 특정 이득값을 얻는데 필요한 전계값을 가장 낮게 유지할 수 있다는 점에서 매우 중요하다. 불균일한 전계 분포를 가지게 되면 같은 이득을 얻으려 했을 때 이득 영역내의 전계의 피크값은 균일한 전계분포를 가지는 경우보다 더 커지게 되므로 InGaAs well을 통하여 더 많은 tunneling 전류를 흐르게 한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 InGaAs/InAlAs MQW APD를 제작하였으며 이득이 10일 때 500 nA의 암전류와 10 GHz의 대역폭을 얻었다. 특히 spacer층의 삽입을 통하여 동일한 물질계를 사용한 이전의 연구결과들에 비해^[3] 암전류 특성을 현저하게 개선시킬 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] R. Chin, N. Holonyak, G. E. Stillman, J. Y. Tang, and K. Hess, *Electron. Lett.* **16**, 467 (1980).
- [2] F. Capasso, W. T. Tsang, A. L. Hutchinson, and G. F. Williams, *Appl. Phys. Lett.* **40**, 38 (1982).
- [3] S. Hanatani, H. Nakamura, S. Tanaka, C. Notsu, H. Sano, and K. Ishida, *Tech. Dig. OFC '93*, 187 (1993).
- [4] I. Watanabe, M. Tsuji, K. Makita, and K. Taguchi, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **8**, 269 (1996).
- [5] I. Watanabe, M. Tsuji, M. Hayashi, K. Makita, and K. Taguchi, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **8**, 824 (1996).
- [6] T. Kagawa, Y. Kawanura, and H. Iwanuma, *IEEE J. Quantum Electron.* **28**, 1419 (1992).
- [7] F. Capasso, B. Kasper, K. Alavi, A. Y. Cho, and J. M. Parsey, *Appl. Phys. Lett.* **44**, 1027 (1984).
- [8] C. Sirtori, J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, A. L. Hutchinson, S. N. G. Chu and A. Y. Cho, *Appl. Phys. Lett.* **68**, 1745 (1996).
- [9] R. Kuchibhotla and J. C. Campbell, *J. Lightwave Technol.* **9**, 900 (1991).
- [10] M. Hafizi, W. E. Stanchia, R. A. Metzger, J. F. Jensen, and F. Williams, *IEEE Trans. Electron Device*, **40**, 2178 (1993).
- [11] INSPEC, *Properties of Lattice-Matched and Strained Indium Gallium Arsenide*, Short Run Press Ltd., 244 (1993).

An InGaAs/InAlAs Multi-quantum Well (MQW) Avalanche Photodiode (APD) with a Spacer Layer Showing Low Dark Current and High Speed

S. J. Kim, M. J. Kim

School of Electrical Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

D. L. Sivco, A. Y. Cho

Bell Laboratories, Lucent Technologies, Murray Hill, NJ 07974, USA

J. M. M. Rios

Bell Laboratories, Lucent Technologies, Holmdel, NJ 07733, USA

(Received: August 9, 1996)

In this paper, we report an InGaAs/InAlAs multi-quantum well (MQW) avalanche photodiode (APD) showing a performance suitable for 10 Gbps lightwave communications. In designing the device, emphasis is given on the effect of indiffusion of Be dopant from the highly doped field layer into the MQW multiplication region. It is found that a small amount of diffusion can alter the dark current and gain characteristics of the device significantly. A spacer used to restrain such indiffusion is shown effective in reducing dark current (500 nA at a gain of 10) while maintaining a high bandwidth (10 GHz at a gain of 10) devices grown by molecular beam epitaxy.