

論文97-34D-9-7

Oxygen 이온 주입의 전기적 고립을 통한 평면형 다중 양자 우물 구조의 애벌런치 & pn 및 p - i - n 광 다이오드의 제작 및 전기적 특성

(The Fabrication and Electrical Characteristics of Planar Multi-Quantum Well (MQW) Avalanche, MQW - pn, and p - i - n Photodiode Implanted with Oxygen for Electrical Isolation)

施相基*, 金成俊*, D.Sivco**, D.L.Jacobsen**, A.Y.Cho**

(Sang Kee Si, Sung June Kim, D.Sivco, D.L.Jacobsen, and A.Y.Cho)

要 約

전기적 고립(isolation)을 위해 oxygen 이온 주입으로 평면형 다중 양자 우물 (MQW) 구조 애벌런치 광 다이오드 (APD), MQW - pn 및 p - i - n 광 다이오드를 제작하여 annealing 온도 및 oxygen 도즈에 따른 소자 특성을 조사하였다. Oxygen이 주입된 p - i - n 광 다이오드의 누설전류 특성은 50 nA를 얻었다. Oxygen이 주입된 평면형 소자들에 대해 -5 V 바이어스에서 측정된 누설전류는 600 °C에서 모든 소자들에 대해 급격하게 증가하였다. 이는 annealing 온도가 증가함에 따라 oxygen의 화학적 작용에 의해 생성된 donor complex로 작용하는 결합들의 증가 때문이라 생각된다. 누설전류는 이온 주입에 의해 생성되는 결합들로 인해 oxygen 도즈의 양과 밀접하게 관련되어 있으며 도즈가 적을수록 낮은 누설전류 특성을 얻었다.

Abstract

The dependence of the electrical properties in planar MQW - APD & pn, and p - i - n photodiode implanted with oxygen on the annealing temperatures and ion dose has been investigated. The oxygen implantation was performed for inter-device isolation. The leakage current of as-implanted p - i - n photodiode obtained was less than 50 nA. An annealing temperature dependence study shows an abrupt increase of leakage current at 600 °C for all devices under study. This indicates that donor complex centers introduced by the chemical activity of oxygen increase with increasing annealing temperatures. Furthermore, leakage current was highly correlated with oxygen dose due to the implanted related defects.

I. 서 론

다중 양자 우물 (Multi - Quantum Well) 구조를

* 正會員, 서울大學校 電氣工學部

(School of Electrical Engineering, Seoul Nat. Univ.)

** Bell Laboratories, Lucent Technologies,

Murray Hill, NJ, 07974, USA

接受日字: 1997年6月28日, 수정완료일: 1997年8月19日

가지는 애벌런치 광다이오드 (Avalanche Photodiode)는 차세대 광 가입자망 시스템에 수신 소자로 유력시 되고 있는 소자로서 연구가 활발히 진행되고 있다. 이런 광수신 시스템의 응용을 위해 이종 접합면에서 conduction band offset이 상당히 크기 때문에 같은 전계에 대해 상대적으로 높은 이득을 얻을 수 있는 InGaAs/InAlAs 다중 양자 우물 구조가 이용되고 있다^[1]. 그러나 지금까지 보고된 다중 양자 우물 구

조의 APD는 습식 식각을 이용한 메사 구조를 가지는 소자들이며, 이는 신뢰성이나 재현성 뿐만 아니라 소자들의 접착화를 구현하는데 많은 어려움을 가지고 있다. 최근에 신뢰성이 높고 평면형이 가능한 다중 양자 우물 (MQW) 구조의 APD 제작에 관한 연구가 진행되고 있으며^[2], 이런 평면형 MQW - APD의 제작을 위해서는 전기적 고립을 통한 이온 주입이 한 예이다.

일반적으로 이온 주입은 국부적인 영역의 도핑 뿐만 아니라 소자간의 전기적 고립을 통한 평면형을 구현하는데 효과적인 기술로 알려져 왔다^{[3][4]}. 전기적 고립을 위한 이온 주입에는 이온 주입에 의한 손상 효과 (damage effect) 와 이온들이 substitutional site에 들어갈 수 있도록 하는 화학적 효과 (chemical effect) 의 한 가지 혹은 둘 다를 이용한다.

전자는 이온 주입에 의해 생성된 깊은 준위의 트랩들에 기인한 고 저항 영역을 가져다 주며, 반면에 후자는 고온에서 이온들이 substitutional site에 치환해 들어감으로 해서 온도에 안정적인 compensating level을 만든다. GaAs 및 이에 관련된 물질에 대한 고립 기술은 매우 잘 알려져 있으나 이에 비해 InP 및 이에 관련된 물질에 대한 고립 기술은 덜 알려져 있다. InP에 격자 정합이 되며 MQW - APD와 같은 소자 응용에 널리 사용되고 있는 InGaAs와 InAlAs층에 대해 전기적 고립을 위한 이온 주입에 대한 연구가 몇 차례 시도되었으나 본격적인 연구가 필요한 시점이다.

InP 및 이에 관련된 물질들에 사용 가능한 이온들은 O, H, Ti등이 있고 이를 중 O, H는 손상 효과로 Ti는 화학적 효과로 전기적 고립 효과를 나타낼 것으로 기대되며 물질 특성상으로는 손상 및 화학적 효과들이 겸증된 바 있으나^{[5][6]} 이들이 소자에 응용될 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 전기적 고립을 통한 소자 응용의 일환으로 MQW - APD & pn 그리고 p - i - n 광다이오드에 oxygen을 이온 주입하여 평면형 MQW - APD & pn 그리고 p - i - n 광다이오드를 제작하여 메사 형태로 제작된 소자들과의 전기적 특성을 비교하였다. 또한 oxygen이 주입된 평면형 MQW - APD & pn 그리고 p - i - n 광다이오드에 대해 annealing 온도 및 oxygen 도즈에 따른 누설전류를 측정하여 전기적 고립 효과를 조사 분석하였다.

II. 소자 구조 및 제작

그림 1에 MQW - APD & pn 그리고 p - i - n 광다이오드의 소자간 고립을 위해 oxygen이 주입된 평면형 소자의 구조를 보이고 있다. 이 실험을 위해 사용된 구조들은 MBE (Molecular Beam Epitaxy)를 이용하여 550 °C에서 성장시켰으며, Be과 Si이 p - type과 n - type 도판트로서 각각 사용되었다. 양자우물 구조는 50 Å InGaAs well과 150 Å InAlAs barrier가 10 주기로 된 다중 양자 우물 구조를 MQW - APD 및 MQW - pn 다이오드에 대해 각각 사용하였다. MQW - APD 각 층의 두께 및 도핑 농도는 표 1에 요약되어 있으며, 특히 MQW - APD에 사용된 각 층은 높은 이득 대역폭 곱을 얻기 위하여 최적화된 구조이며^[7] 흡수층과 MQW층의 전계를 분리시키기 위하여 사용된 field buffer층으로는 10^{18} cm^{-3} 의 농도로 Be이 도핑된 380 Å의 InAlAs층을 사용하였으며 field buffer층으로부터 Be의 확산을 막기 위해 500 Å의 undoped InAlAs spacer 층을 성장시켰다. MQW-pn다이오드는 흡수층 및 field buffer층이 사용되지 않는 것을 제외하고는 MQW - APD와 같은 구조이며 P - i - n 광다이오드의 경우는 2000 Å n^+ -InAlAs buffer층, 3 μm undoped - InGaAs 흡수층, 1000 Å p^- -InAlAs층 그리고 300 Å p^- -InGaAs contact층으로 이루어진 구조이다. 전기적 고립을 위한 oxygen 주입은 시료의 비정질화를 막기 위해 250 °C에서 하였으며, channeling effect를 피하기 위해 (100) 축에서 7° 기울어지게 하였다.

표 1. MQW-APD 각 층의 두께 및 농도

Table 1. The thickness and carrier concentration of MQW-APD.

Layer	특징	농도(cm^{-3})	두께(㎚)
p^+ -InGaAs	contact 층	1×10^{19}	30
p^+ -InAlAs	cap 층	1×10^{18}	100
undoped-InGaAs	흡수층	$< 5 \times 10^{15}$	900
p^+ -InAlAs	field 층	1×10^{18}	38
undoped-InAlAs	spacer층	$< 5 \times 10^{15}$	50
undoped-InAlAs	barrier층*	$< 5 \times 10^{15}$	15
undoped-InGaAs	well층*	$< 5 \times 10^{15}$	5
undoped-InAlAs	barrier층*	$< 5 \times 10^{15}$	15
n^+ -InAlAs	buffer층	1×10^{18}	200
n^+ -InP	기판	2×10^{18}	30

* MQW (InGaAs / InAlAs) x 10periods

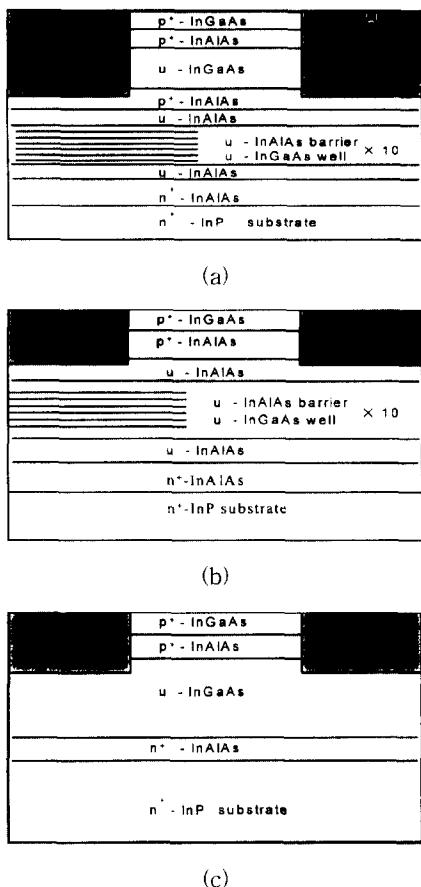


그림 1. Oxygen 주입에 의해 제작된 평면형 소자:
사용된 oxygen의 에너지 및 도즈는 (a)
MQW- APD (50 keV, $1.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} + 700$
keV, $6.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$), (b) MQW-pn (50
keV, $1.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) (c) p-i-n 광다이오드
(50 keV, $1.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$)

Fig. 1. Planar device fabricated with oxygen implantation. The samples were implanted with oxygen (a) MQW - APD (50 keV, $1.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} + 700 \text{ keV}$, $6.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$), (b) MQW - pn (50 keV, $1.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) (c) p - i - n photodiode (50 keV, $1.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$).

그림 2는 TRIM (Transport of Ions in Matter) 을 이용하여 MQW - APD 구조의 예상되는 oxygen depth 분포를 계산한 결과를 나타내었다. 소자들에 사용된 이온 도즈는 TRIM의 계산을 바탕으로 MQW - pn 및 p - i - n 광다이오드에 대해 $1.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 의 이온 도즈 및 50 keV의 에너지를 사용하였으며, MQW - APD에 대해서는 중폭층으로 사용되는 MQW 영역 바로 위의 InGaAs 흡수층까지 전기적 고립을 시키기 위해 이중 이온 주입 (50 keV,

$1.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} + 700 \text{ keV}$, $6.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$)을 하였다. 이온이 주입되어 제작된 평면형 소자와의 비교를 위해 메사 형태의 다이오드를 제작하였다. 메사 형태의 소자는 습식 식각으로 $50 \mu\text{m}$, $75 \mu\text{m}$ 직경을 가지는 메사를 형성하고 각각 n형과 p형 금속을 증착한 후에 PECVD를 이용하여 1000 Å의 SiN_x 절연막을 메사의 옆면을 덮어서 소자들을 제작하였다. 평면형 소자의 경우는 $75 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$ 직경으로 메사를 형성한 후 $50 \mu\text{m}$, $75 \mu\text{m}$ 를 제외한 나머지 부분에 oxygen을 주입하였다. 그후 p형 금속을 증착한 후 이 금속을 식각 마스크로 이용하여 p' - InGaAs contact층을 식각하고 뒷면에 n형 금속을 증착시켜 평면형 APD 및 광 다이오드를 제작하였다.

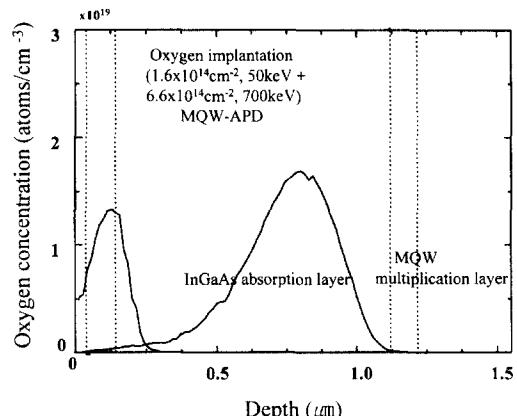


그림 2. TRIM에 의해 계산된 MQW - APD의 oxygen 이온 주입에 따른 depth profiles

Fig. 2. The calculated depth profiles of MQW-APD with oxygen implantation using TRIM.

III. 특성 분석 및 토의

표 2는 전기적 고립을 위해 oxygen이 주입되어 제작된 평면형 소자와 습식 식각에 의해 제작된 메사 형태 소자들의 역방향 전류 - 전압 (누설전류)의 특성을 비교하여 나타내고 있다. 표 2에서 보여주는 바와 같이 MQW - pn & p - i - n 광다이오드의 면적 및 바이어스 전압에 대해 oxygen이 주입된 소자들의 누설전류가 메사 형태의 소자들 보다 크게 나타났다. -5 V 바이어스 50 m m 직경을 가진 메사 형태의 누설전류가 MQW - pn 및 p - i - n 광다이오드에 대해 1.6 nA 및 40 nA에서 이온이 주입된 소자의 경

우 120 nA 및 50 nA까지 각각 증가를 하였다. 이는 이온 주입에 의해 생성된 결합들이 메사 형태로 만들 어진 소자들보다 누설전류에 훨씬 더 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

표 2. Oxygen이 주입된 평면형 소자와 메사 형태의 소자에 있어서 면적과 바이어스에 대한 누설전류의 특성

Table 2. Reverse current-voltage I-V characteristics as a function of area and bias voltage for diodes fabricated with mesa and planar devices using oxygen implantation.

		Ion implanted diode (50 μm / 75 μm)	Mesa diode (50 μm / 75 μm)
MQW-pn diode ^{*1}	-5V	120 nA / 160 nA ^{*3}	1.6 nA / 40 nA
	-10V	1.2 μA / 2.8 μA	27.7 nA / 55.4 nA
P-i-n PD	5V	50 nA / 2.0 μA ^{*3}	40 nA / 80 nA
	-10V	6.0 μA / 50 μA	3.4 μA / 6.8 μA
MQW-APD ^{*2}	-5V	20 μA / 40 μA ^{*4}	2.0 μA / 6.0 μA
	-10V	~A / ~A	10.4 nA / 66 nA

* 1, 2 (well 50 \AA + barrier 150 \AA) x10 periods

* 3 (50 keV, $1.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, @ 250 $^{\circ}\text{C}$

* 4 (50 keV, $1.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ +70 keV, $6.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, @ 250 $^{\circ}\text{C}$

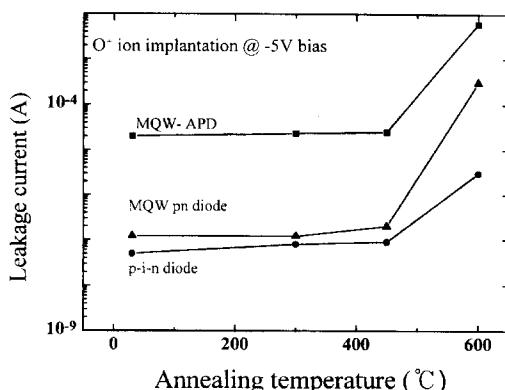


그림 3. Annealing 온도에 따른 각 소자들의 누설전류 특성

Fig. 3. The characteristics of leakage current as a function of annealing temperatures for implanted devices.

MQW - APD에 대해서는 면적 및 바이어스 전압에 관계없이 이온 주입에 의해 급격하게 증가함을 보여주고 있다. 이는 증폭층인 양자 우물까지 이온이 주입되어 생성된 결합이 MQW구조에 영향을 미치며 이

로 인해 MQW에서 누설전류의 주요 성분에 해당하는 터널링 전류 성분의 증가에 기인한다는 것을 보여주고 있다. 이 실험에서 밴드갭이 작은 InGaAs층이 양자 우물로 사용되었으며 작은 밴드갭 때문에 터널링 전류는 더욱 더 커진다. 그림 2에 나타나 있는 처럼 oxygen 주입 ($1.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, 50 keV + $6.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, 700 keV)의 계산된 분포는 MQW 증폭층 바로 위에 위치하였으며, oxygen 이온 주입에 의해 생성되는 결합들이 가장자리 disorder 영향으로 누설전류가 MQW 영역에 더 큰 영향을 준다는 것을 의미한다. Oxygen이 주입된 50 μm 의 면적을 가지는 p - i - n 광다이오드의 경우 50 nA 정도의 누설전류 특성을 얻었다.

각 소자들의 annealing 온도에 따른 누설전류 특성을 비교하였다. 그림 3은 oxygen 주입으로 제작된 평면형 소자들에 대한 annealing 온도에 따른 누설전류 특성을 나타내고 있다. Annealing 온도는 oxygen 주입에 의한 결합들의 영향을 조사하기 위해 이온이 주입된 상태 (상온)에서부터 300, 450 그리고 600 $^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서 annealing을 하였다. -5 V 바이어스에서 oxygen이 주입된 다이오드들의 누설전류 특성은 450 $^{\circ}\text{C}$ 까지 모든 소자들에 대해 서서히 증가하는 특성을 나타냈다. 450 $^{\circ}\text{C}$ 까지의 누설 전류 특성은 주로 손상 효과에 의해 지배되는 것을 보여주고 있다. 손상 효과는 전도도에 기여하는 캐리어(전자나 정공)들이 이온 주입에 의해 생성된 결합(트랩)에 의해 compensation이 일어나 고저항 영역을 만드는 것이며 400~450 $^{\circ}\text{C}$ 정도에서 면저항값이 최대값을 가진다고 알려져 있다^[8]. 이는 이 온도 부근에서 원래의 도핑 농도와 이온 주입에 의해 생성된 트랩들의 농도가 같아서 완전한 compensation을 이룬다는 것을 의미한다. 그림 3에서 보는 것처럼 450 $^{\circ}\text{C}$ 까지 이온 주입에 의해 생성된 결합들의 증가로 누설전류가 서서히 증가함을 보이고 있지만 증가하는 양은 annealing 전에 비해 그다지 크지 않다. 이 온도 (~450 $^{\circ}\text{C}$)에서는 결정성이 이온 주입 이전의 결정 상태로 되돌아 가지 않으며 이온 주입에 의한 손상 그 자체로서 누설전류 성분에 기여를 하게 된다는 것을 가리킨다. 이온 주입에 의해 생성되는 결합들은 vacancy, interstitial, Frenkel 결합, 주입 이온과 vacancy 또는 격자 침입 (interstitial) 자리와의 complex 그리고 점 결합 (point defect), dislocation과 같은 선 결합 등이 있다.

그러나 600 °C에서 모든 소자들의 누설전류는 급격하게 증가하였으며 특히 MQW 소자들의 누설전류 특성이 p - i - n 다이오드 보다 훨씬 크게 증가하였다. 이는 이온 주입에 의해 생성된 결합들이 벌크보다는 터널링 성분이 지배하는 MQW 영역에 훨씬 더 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 누설전류의 급격한 증가에 대한 정확한 원인은 알 수 없지만 측정된 것으로부터 다음과 같은 mechanism을 가정할 수 있다. 600 °C 이상의 고온 영역에서 oxygen의 화학적 작용에 의한 donor complex와 같은 결합들의 형성과 이런 결합들의 증가로 인해 누설전류가 급격하게 증가하는 요인이라 생각 된다. 그림 1에서 보는 것처럼 oxygen이 주입된 범위는 모든 소자에 대해서 $p^+ - InAlAs$ cap층을 포함하며 undoped InGaAs 흡수층은 MQW - APD 및 p - i - n 광다이오드에 대해 적용되었다. $P^+ - InAlAs$ 에서는 oxygen이 고온에서 V족 site들을 점유한다고 알려져 있지만 고립된 electronic level을 가지는 단순한 center로서 보다는 화학적 작용으로 donor complex를 이루는 것으로 알려져 있다^[9]. 예를 들어 $p^+ - InAlAs$ 에 oxygen을 주입하였을 경우 생성된 결합들은 $p^+ - InAlAs$ 를 compensate하는 deep level로서 native defect와 관련된 complex center로 작용하는 것으로 알려져 있다.

즉, 600°C 이상의 고온 영역에서는 이온 주입에 의해 생성된 결합(트랩)들이 anneal out되는 것 뿐만 아니라 oxygen이 화학적 작용에 의한 donor complex와 같은 center를 이룰 수 있으며 특히 MQW - APD의 경우 증폭층으로 사용된 양자 우물층 바로 위의 field buffer층인 $p^+ - InAlAs$ 층에 donor로 작용하는 complex center의 형성은 누설전류 특성에 더욱 영향을 줄 것이며 MQW - pn 다이오드의 경우 양자 우물 바로 위의 $p^+ - InAlAs$ cap층에서도 마찬가지로 영향을 줄 것이다. 이것이 MQW 소자들이 p - i - n 광다이오드보다 누설전류가 더욱 더 증가하는 원인이며 결합(트랩)들이 anneal out되는 것보다 donor complex와 같은 결합들의 증가로 인해 모든 소자들에 대해 누설전류가 급격하게 증가하는 요인이다. 또 다른 가능성은 흡수층으로 사용된 undoped - InGaAs층에 대한 oxygen의 영향을 생각할 수 있다. InGaAs는 intrinsic 캐리어 농도가 300K에서 대략 10^{12} cm^{-3} 정도로 $\sim 10^3 \Omega\text{cm}$ 의 최대 저항을 얻을

수 있는 것으로 알려져 있다^[10]. 이는 InGaAs층의 낮은 밴드갭 (~0.75 eV at 300K) 에너지에 기인한다. 이런 낮은 밴드갭 에너지는 이온 주입으로 생성된 결합들의 터널링에 의한 누설전류 성분을 증가 시킬 것이며 특히 MQW 영역에서 더 큰 영향을 미칠 것이다.

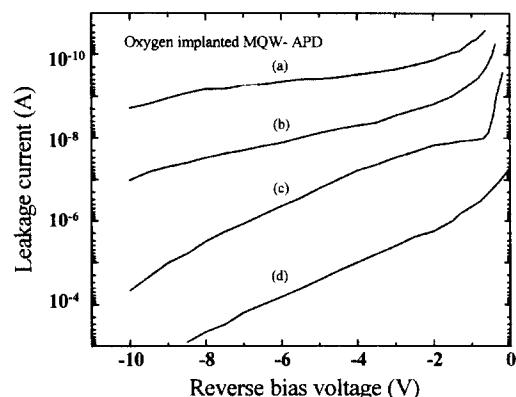


그림 4. MQW - APD의 Oxygen 도즈에 따른 누설 전류 특성: (a) 메사 형태 (b) (50 keV, $1.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} + 700 \text{ keV}, 6.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) 를 사용한 다이오드를 부분적으로 식각한 형태 (c) 낮은 도즈 (50 keV, $1.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} + 700 \text{ keV}, 6.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$)를 사용한 형태 (d) 높은 도즈 (50 keV, $1.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} + 700 \text{ keV}, 6.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$)를 사용한 형태

Fig. 4. Reverse current characteristics of mesa APD and oxygen implanted APD devices. (a) mesa APD (b) APD with implanted of low dose (50 keV, $1.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} + 700 \text{ keV}, 6.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) (c) low dose of APD with partially etched structure (50 keV, $1.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} + 700 \text{ keV}, 6.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) (d) APD with implanted of high dose (50 keV, $1.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} + 700 \text{ keV}, 6.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$).

누설전류의 oxygen 도즈에 따른 의존성을 알아보기 위해 MQW - APD 소자에 대해 메사 형태의 소자와 여러 가지 도즈를 사용하여 그 특성을 조사 하였다. 그림 4는 각 도즈에 따른 누설전류 특성을 나타내고 있다. 메사 형태, 낮은 도즈 (50 keV, $1.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} + 700 \text{ keV}, 6.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$)의 이온 주입으로 제작된 소자를 부분적으로 메사 형태로 식각한 소자, 낮은 도즈 (50 keV, $1.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} + 700 \text{ keV}, 6.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) 및 높은 도즈 (50 keV, $1.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} + 700 \text{ keV}, 6.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$)를 사용해서 제작

된 소자의 누설전류 특성을 각각 (a), (b), (c), 그리고 (d)로 표기하였으며 열처리 온도는 580 °C에서 행하였다. 그림 4에서 보듯이 높은 도즈 (d)를 사용해서 제작된 소자는 낮은 도즈 (c)를 사용해서 제작된 소자보다 누설전류가 크게 나왔다. 이는 높은 도즈를 사용할 경우 이온 주입에 의해 보다 더 많이 생성된 결합들의 영향이 누설전류에 보다 더 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있으며 보다 적절한 열처리 온도에 따른 낮은 누설전류 특성을 얻는 연구가 필요하다. 그럼 4(b)는 낮은 도즈의 소자에서 oxygen이 주입된 영역의 영향을 알아보고자 주입 영역을 약간만 남겨두고 식각을 한 경우인데 낮은 도즈 (c)와 비교해서 훨씬 적은 누설전류 특성을 얻었다. 이것은 이온이 주입된 면적의 감소로 인한 손상의 감소 때문에 낮은 누설전류 특성을 가진다는 것을 쉽게 예상할 수 있다.

IV. 결 론

전기적 고립을 위해 oxygen이온 주입에 의한 평면형 MQW - APD & pn 및 p - i - n 광다이오드를 제작하여 annealing 온도 및 oxygen 도즈에 따른 누설전류 특성을 조사하였다. P - i - n다이오드의 경우 낮은 전압 (-5 V)에서는 50 nA의 누설전류를 보였으나 MQW를 사용한 경우 누설전류가 증가하였고 높은 전장에 의한 효과가 필요한 APD의 경우는 누설전류가 매우 증가하였다. I - V특성에 따른 누설전류로부터 annealing 온도가 증가함에 따라 oxygen의 화학적 작용에 의해 donor로 작용하는 complex center와 같은 결합들의 증가를 가져다 주며 이로 인해 600 °C에서 누설전류가 급격하게 증가한다. 낮은 도즈를 사용하여 제작된 소자들이 적은 결합들의 생성으로 인해 높은 도즈의 경우보다 훨씬 낮은 누설전류 특성을 가졌으며, 이온 주입에 의한 손상 영향을 최소화하고, 적절한 oxygen 도즈를 선택한다면 훨씬 낮은 누설전류를 가지는 평면형 소자들을 제작할 수 있을 것이다.

감사의 글

* 본 논문은 KAIST OERC(97K3-0809-02-06-1)와 교육부(97-E-3205)과제의 지원에 의해 이루어졌음을 밝히고자 한다.

참 고 문 현

- [1] S. Hanatani, H. Nakamura, S. Tanaka, C. Notsu, H. Sano, and K. Isida, "Superlattice Avalanche Photodiode with a Gain-Bandwidth Product Larger than 100GHz for Very-High-Speed Systems," *Tech Dig., OFC'93*, 187 (1993)
- [2] I. Watanabe, M. Tsuji, K. Makita, and K. Taguchi, "A New Planar - Structure In-AlGaAs-InAlAs Superlattice Avalanche Photodiode with a Ti - Implanted Guard - Ring," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 8, 827 (1996)
- [3] J. P. Boos, W. Kruppa, and B. Molnar, "Planar, Fully Ion - Implanted InP Junction FET's with a Nitride-Registered Gate Metallization," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 10, 79 (1989)
- [4] Ch. Buchal, "Ion Implantation for Optical Applications," *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.*, B 96, 370 (1995)
- [5] S. J. Pearton, C. R. Abernathy, M. B. Panish, R. A. Hamm, and L. M. Lunardi, "Implant - Induced High - Resistivity Regions in InP and InGaAs," *J. Appl. Phys.*, vol. 66, 656 (1989)
- [6] J. M. Martin, R. V. Nadella, J. Vellanke, M. V. Rao, and O. W. Holland, "Thermally Stable, Buried High-Resistance Layers in p - type InP Obtained by MeV energy Ti Implantation," *J. Appl. Phys.*, vol. 73, 7238 (1993)
- [7] S. J. Kim, M. J. Kim, D. L. Sivco, A. Y. Cho, J. M. M. Rios, "An InGaAs/InAlAs Multi - Quantum Well (MQW) Avalanche Photodiode (APD) with a Spacer Layer Showing Low Dark Current and High Speed" *Kor. J. Opt. Soc.*, vol. 7, 440 (1997)
- [8] M. C. Ridgway, C. Jagadish, R. G. Elliman, and N. Hauser, "Single - Step Implant Isolation of p⁺ - InP with 5 - MeV O Ions," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 60, 3010 (1992)
- [9] Ph. Krauz, E. V. K. Rao, H. Thibierge,

and J. C. Harmand, "Highly Thermally Stable Electrical Compensation in Oxygen Implanted p - InAlAs" *Appl. Phys. Lett.*, vol. 62, 867 (1993)

[10] M. V. Rao, R. S. Babu, H. B. Dietrich and P. E. Thompson, "Light - Ion - Bombarded p - type $In_{0.53}Ga_{0.47}As$," *J. Appl. Phys.*, vol. 64, 4755 (1988)

저자소개



施相基(正會員)

1985년 8월 경북대학교 물리학과 학사, 1988년 2월 경북대학교 물리학과 석사. 1987년 11월 ~ 1993년 3월 LG 종합기술원 연구원으로 근무. 1993년 3월 ~ 서울대학교 전기공학부 박사과정. 주관심분야는 광수신 소자 및 optoelectronic material & devices, Quantum Well intermixing 등임

金成俊(正會員) 第32卷 A編 第11號 參照

현재 서울대학교 전기공학부 교수