

AlGaIn/GaN HEMT의 채널폭 스케일링에 따른 협폭효과

Narrow channel effect on the electrical characteristics of AlGaIn/GaN HEMT

임진홍*, 김정진*, 심규환*, 양전욱**

Jin Hong Lim*, Jeong Jin Kim*, Kyu Hwan Shim*, Jeon Wook Yang**

Abstract

AlGaIn/GaN HEMTs (High electron mobility transistors) with narrow channel were fabricated and the effect of channel scaling on the device were investigated. The devices were fabricated using e-beam lithography to have same channel length of 1 μm and various channel width from 0.5 to 9 μm . The sheet resistance of the channel was increased corresponding to the decrease of channel width and the increase was larger at the width of sub- μm . The threshold voltage of the HEMT with 1.6 μm and 9 μm channel width was -2.85 V. The transistor showed a variation of 50 mV at the width of 0.9 μm and the variation 350 mV at 0.5 μm . The transconductance of 250 mS/mm was decreased to 150 mS/mm corresponding to the decrease of channel width. Also, the gate leakage current of the HEMT decreased with channel width. But the degree of was reduced at the width of sub- μm . It was thought that the variation of the electrical characteristics of the HEMT corresponding to the channel width came from the reduced Piezoelectric field of the AlGaIn/GaN structure by the strain relief.

요약

본 연구에서는 AlGaIn/GaN HEMT (High electron mobility transistor)를 제작하고 채널폭의 감소에 따른 특성의 변화를 고찰하였다. AlGaIn/GaN 이종접합구조 기판의 기판 위에 채널의 길이는 1 μm , 채널 폭은 각각 0.5 ~ 9 μm 가 되도록 전자선 리소그래피 방법으로 트랜지스터를 제작하였다. 게이트를 형성하지 않은 상태에서 채널의 면저항을 측정된 결과 sub- μm 크기로 채널폭이 작아짐에 따라 채널의 면저항이 급격히 증가하였으며, 트랜지스터의 문턱전압은 1.6 μm 와 9 μm 의 채널폭에서 -2.85 V이었으며 0.9 μm 의 채널폭에서 50 mV의 변화, 0.5 μm 에서는 350 mV로 더욱 큰 변화를 보였다. 트랜스컨덕턴스는 250 mS/mm 내외의 값으로부터 sub- μm 채널에서 150 mS/mm로 채널폭에 따라 감소하였다. 또한, 게이트의 역방향 누설전류는 채널폭에 따라 감소하였으나 sub- μm 크기에서는 감소가 둔화되었는데 채널폭이 작아짐에 따라 나타는 이와 같은 일련의 현상들은 AlGaIn 층의 strain 감소로 인한 압전분극 감소가 원인이 되는 것으로 사료된다.

Key words : AlGaIn/GaN, HEMT, channel, narrow width, threshold voltage, strain

* Dept. of Semiconductor Science and Technology, Chonbuk National University
jwvang@jbnu.ac.kr 063-270-2830

★ Corresponding author

※ Acknowledgment 본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2012년도 산학공동연구개발사업(C0055514)의 연구 수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

Manuscript received Mar. 15, 2013; revised Mar. 22, 2013; accepted Mar. 25, 2013

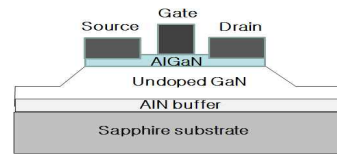
1. 서론

GaN는 3.4 eV의 넓은 밴드 갭과 물리적, 화학적 안정성을 바탕으로 광소자와 전자소자에 널리 응용되고 있다. 특히 AlGaIn/GaN의 이종접합은 $1 \times 10^{13} / \text{cm}^2$ 이상의 매우 높은 전자밀도와 2,000 $\text{cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$ 의 높은 이

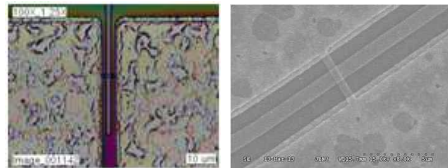
동도 특성을 갖는 이차원전자 (2-dimensional electron gas; 2-DEG) 층 형성이 가능하여 고전력, 고주파에 적용 가능한 high electron mobility transistor (HEMT)의 제작에 많이 이용된다.[1]-[5] 최근 AlGaIn/GaN 구조의 HEMT는 수십 W급 이상의 전력운용이 가능한 모듈에 적용될 수 있도록 개발되고 있으며 normally-on 상태의 동작특성과 on 저항의 감소 등을 피하기 위한 많은 연구가 수행되고 있다.[6]-[8] 이러한 고전력 특성에 반하여 매우 낮은 전류로 구동되는 트랜지스터는 논리회로와 스위칭 회로의 구성에 매우 유리하므로 저전력 소자 역시 AlGaIn/GaN 구조를 이용한 다양한 모듈의 구성에 필요한 요소이다. 저전력 고속동작을 하는 AlGaIn/GaN HEMT 소자를 만들기 위하여 좁은 게이트 폭의 소자의 제작이 필요하다. 본 연구에서는 AlGaIn/GaN 구조의 HEMT를 제작하고 저전력으로 동작시킬 수 있도록 게이트 폭을 감소시킬 때 나타나는 HEMT의 특성변화에 대하여 고찰하였다.

II. 실험

본 연구에서는 1 μm 이하의 게이트의 폭을 갖는 AlGaIn/GaN HEMT를 제작하고 특성을 관찰하기 위하여 0001 면의 사파이어 기판 위에 metal organic chemical vapor deposition (MOCVD) 방법으로 성장된 AlGaIn/GaN 구조를 갖는 기판을 이용하여 실험하였다. AlGaIn/GaN 구조는 사파이어 기판 위에 AlN를 버퍼층으로 이용하여 성장된 2 μm 두께의 도핑되지 않은 GaN과 그 위에 성장된 20 nm의 두께의 AlGaIn 층으로 구성되었다. HEMT의 제작을 위하여 먼저 리소그라피와 BCl_3/Cl_2 가스의 유도결합플라즈마를 이용한 건식식각 방법으로 트랜지스터의 활성영역을 정의하였다. 활성영역을 구분한 다음 소스와 드레인 영역에 Ti/Al/Ni/Au (30/100/30/100 nm)의 다층구조의 금속을 증착하여 형성한 뒤 금속접촉을 저항성 접촉이 되도록 900 $^\circ\text{C}$ 의 온도에서 30초 동안 열처리하였다. 소스와 드레인의 저항성 접촉은 TLM (Transfer Length Method) 방법을 이용하여 서로 다른 이격 거리를 갖는 패드들 간의 저항을 측정하고 계산한 결과 형성된 1.15 $\Omega\text{-mm}$ 의 값을 나타내는 것으로 확인되었다. 이어서 게이트 길이는 1 μm , 폭은 10 μm 에서 0.5 μm 에 이르는 다양한 값을 갖도록 전자선 리소그라피 방법을 이용하여 패드를 형성하고 Ni/Au (30/70 nm)의 금속구조를 갖는 게이트를 형성하여 (그림 1) 과 같이 트랜지스터를 제작하였다.



(a)



(b)

Fig. 1. (a) Schematic diagram of AlGaIn/GaN HEMT, and (b) photomicrograph and SEM image of HEMT

그림 1. a) 트랜지스터 단면 모식도 및 b) 현미경과 전자현미경 사진

트랜지스터 제작 후 dc 파라미터 분석기를 이용하여 전류-전압 특성을 측정하였으며 게이트폭에 따른 임계전압의 변화, 게이트 누설전류의 변화와 트랜스컨덕턴스 등 AlGaIn/GaN HEMT가 sub- μm 크기에서 보이는 특성변화에 대하여 고찰하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 채널 면저항의 변화

AlGaIn/GaN HEMT의 이중접합구조는 깊이방향의 분포가 제한된 이차원 전자층으로 트랜지스터의 채널을 형성하며 $\sim 50 \text{ \AA}$ 정도의 범위에서 전자들이 분포한다. 따라서 일반적으로 제작되는 HEMT의 경우 게이트 폭이 상대적으로 크기 때문에 게이트폭에 따른 특성의 변화를 보이지 않는 것으로 알려져 있다. 그러나 게이트 폭이 미세하게 작아질 경우 기하학적 구

-	-	AlGaIn tensile strain
P_{SP}	P_{PE}	
+	+	
-		Relaxed GaN
P_{SP}		
+		
Substrate		

Fig. 2. Spontaneous polarization and Piezoelectric polarization for the AlGaIn/GaN heterosture

그림 2. AlGaIn/GaN 이중접합 구조에서 발생하는 자발분극 과 압전분극

조에 따라 스트레스의 분포가 달라질 수 있으며 AlGaIn/GaN 구조의 전하는 자발분극과 압전분극에 의해 형성되기 때문에 게이트 폭에 영향을 받을 수 있다.[9]

(그림 2)는 이중접합구조에서 보이는 분극을 나타낸 것으로 그림과 같이 충분히 두꺼워 relaxed 상태로 성장된 GaN 위에 GaN 보다 격자상수가 큰 AlGaIn 에피층을 pseudomorphic 방식으로 성장시켰을 때 AlGaIn/GaN 계면에서의 자발 분극; P_{SP} 과 압전분극; P_{PE} 으로 인한 분극의 크기(P_{total})는 다음과 같다.

$$P_{total} = P_{SP(AlGaIn)} - P_{SP(GaN)} + P_{PE(AlGaIn)} \quad (1)$$

여기에서 자발분극의 방향은 AlGaIn과 GaN의 두층이 상쇄되므로 AlGaIn/GaN 계면은 압전분극의 주도적인 영향으로 양의 전하가 증가하게 된다[3]. 압전분극의 크기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{PE} = e_{33}\epsilon_z + e_{13}(\epsilon_z + \epsilon_y) \quad (2)$$

여기에서 e_{33} , e_{31} 은 piezoelectric coefficient 이고 ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z 는 각 방향에 대한 스트레인을 의미한다. C-축에 대한 스트레인은 $\epsilon_z = (c - a_0)/a_0$ 으로, 에피 면에 대한 스트레인은 $\epsilon_x = \epsilon_y = (a - a_0)/a_0$ 으로 나타낼 수 있으며 c_0 , a_0 는 각각 평형상태에서 GaN의 격자 상수들이다. 우어짜이즈 구조의 GaN 에서 각 격자상수들의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{c - a_0}{a_0} = -2 \frac{c_{13}}{c_{33}} \frac{a - a_0}{a_0} \quad (3)$$

여기에서 c_{13} , c_{33} 은 탄성계수이며 위 수식에 따라 AlGaIn/GaN 이중접합 면에서의 압전분극은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{PE} = 2 \frac{a - a_0}{a_0} \left(e_{31} - e_{33} \frac{c_{13}}{c_{33}} \right) = \epsilon_x \left(e_{31} - e_{33} \frac{c_{13}}{c_{33}} \right) \quad (4)$$

즉, AlGaIn/GaN 계면에서의 압전분극은 계면의 스트레인; ϵ_x 에 의해서 결정되며 AlGaIn 층의 스트레스가 완화되어 a 가 a_0 에 가깝게 변하게 되면 P_{PE} 의 크기가 작아져 분극에 의한 계면의 양전하 양도 작아지게 된다.

(그림 3)은 4.5 μm 간격의 두 오믹 전극 사이에 형성된 각기 다른 폭의 채널이 갖는 면저항 값을 나타낸

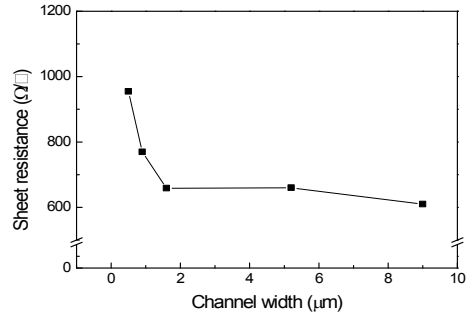


Fig. 3. Sheet resistance characteristics of AlGaIn / GaN structure corresponding to the channel width

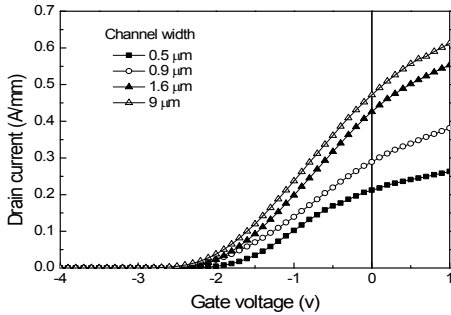
그림 3. 채널폭에 따른 AlGaIn/GaN 구조의 면저항 특성

그래프이다. 채널의 폭이 10 μm 에서 0.5 μm 로 작아짐에 따라 채널 면저항은 609.8 Ω/\square 에서 954.4 Ω/\square 로 증가하였으며 특히 채널 폭이 1.6 μm 이하인 경우에 면저항이 더욱 크게 증가하였다. 이러한 현상은 메사 구조로 제작된 채널의 폭이 작아짐에 따라 메사 위의 AlGaIn 층에 걸리는 스트레스가 작아지는 것이 원인으로 생각된다. 앞에 기술한 압전분극에 관한 식에 따라 AlGaIn/GaN 계면의 스트레인; ϵ_x 가 작아지면 P_{PE} 가 작아지고 이는 AlGaIn/GaN 구조의 2-DEG 전자 밀도를 감소시키는 결과를 가져오게 된다. 채널의 전자밀도가 감소하게 되면 채널의 면저항이 증가하며 2-DEG 채널을 공핍시키는데 더 적은 음의 방향 전위가 필요하게 되므로 트랜지스터를 turn off 시키는데 필요한 게이트 전압이 작아져 문턱전압이 양의 방향으로 증가하게 된다.

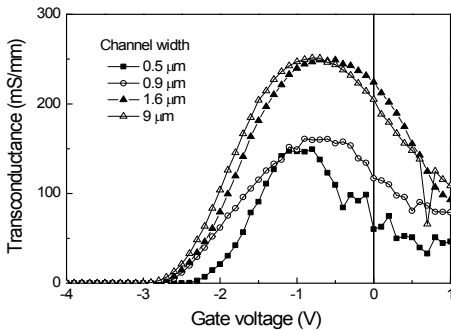
2. 게이트 폭에 따른 트랜지스터 특성의 변화

(그림 4)는 채널폭에 따라 나타낸 드레인 전류와 트랜스컨덕턴스 특성이다. 10 μm 와 1.6 μm 의 채널폭을 갖는 트랜지스터의 전류밀도는 550~600 mA/mm로 비슷한 값을 나타냈지만 채널폭이 1 μm 이하로 감소한 경우 400 mA/mm 이하로 드레인 전류 특성이 눈에 띄게 낮아졌다. 이는 채널 폭의 감소에 따라 sub- μm 크기로 줄어들면서 AlGaIn에 의한 스트레인의 감소가 나타나고 이에 따라 캐리어 농도가 감소하는 것을 의미한다. 스트레인과 함께 전류 감소의 또 다른 요인으로는 소스저항의 증가를 들 수 있다. 소스와 게이트 사이의 도전층 폭의 감소는 면저항의 증가를 피하며 소스저항이 증가를 나타낸다. 따라서 드레인 전류의 감소를 나타낼 수 있다. 그러나 문턱전압은

게이트영역의 채널 특성에 좌우되므로 문턱전압의 변화를 통해 스트레인에 따른 의한 효과가 있었음을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 4. (a) Drain current characteristics of the AlGaIn/GaN HEMTs and (b) transconductance characteristics
 그림 4. (a) 제작된 트랜지스터의 게이트 전압에 따른 드레인 전류와 (b)트랜스컨덕턴스 특성

(그림 5)는 채널폭에 따른 HEMT의 문턱전압을 나타낸 그래프이다. 문턱전압은 채널폭의 감소에 따라 양의 방향으로 증가하였는데 0.9 μm에서 50 mV의 작은 변화를 보이고 0.5 μm에서는 350 mV의 급격한 변화를 나냈다. 이는 채널폭에 대한 면저항의 변화와 거의 유사하며 AlGaIn 층의 폭이 sub-μm으로 작아짐에 따라 스트레인의 감소에 따른 효과가 나타남을 의미한다. 측정된 트랜스컨덕턴스는 소스저항에 의한 효과를 포함하기 때문에 그림에 나타낸바와 같이 250 mS/mm 내외의 값으로부터 150 mS/mm 내외로 채

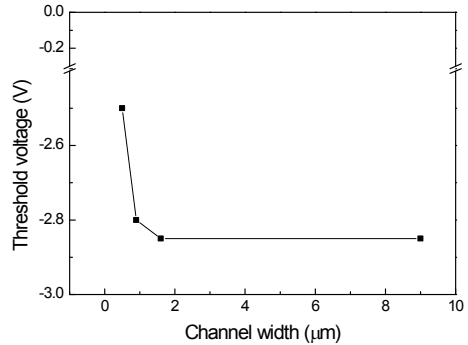


Fig. 5. Threshold voltage characteristics of the AlGaIn/GaN HEMTs corresponding to the channel width
 그림 5. 채널폭에 따른 AlGaIn/GaN HEMT의 문턱전압 변화

널폭에 따라 감소하였다. 한편, 채널폭의 감소에 따른 게이트 누설전류의 특성도 변화하였다. (그림 6)은 단위 채널폭에 대한 게이트 누설전류의 변화를 보여준다. 채널폭에 따라 누설전류가 감소하고 있으나 이 변화는 문턱전압의 변화와는 다른 모습을 보인다. 문턱전압은 sub-μm의 채널폭에서 변화를 보였으나 누설전류는 sub-μm 크기의 채널에서는 수 nA의 크기로 작은 값을 나타냈지만 1.6 μm와 9 μm의 경우 각각 16.8과 271 nA로 매우 큰 증가를 나타내고 있다. 누설전류는 게이트 접합면과 표면누설전류를 야기하는 측면, 또는 식각면 등 다양한 경로를 통해 흘러갈 수 있는데 제작된 트랜지스터는 채널폭을 제외하고 모든 구조가 동일하므로 그림에서 보이는 누설전류의 변화는 주로 채널폭과 접합면의 차이에 기인한 것으로 볼 수 있다. 게이트 폭을 1 μm로 환산한 누설전류는 변화폭이 다소 감소하였으나 여전히 게이트 폭에 따라 증가하고 있으며 이것은 게이트폭과 접합면적의 변화는 선형적이지만 이들 효과의 중첩은 누설전류의 더욱 큰 증가를 꾀하기 때문이다. 그럼에도 불구하고 0.5 μm 채널폭의 게이트에서 누설전류의 감소가 두드러지지 않은 것은 채널폭의 감소에 따라 AlGaIn 층의 압전분극의 크기가 작아지면서 AlGaIn 층 표면의 음전하의 크기도 작아져 표면에 전자가 모이는 것을 억제하는 힘이 작아졌기 때문으로 보인다. (표 1)은 각각의 채널폭에 대한 채널 면저항, 소자의 문턱전압, 트랜스컨덕턴스, 게이트 누설전류 값들을 정리한 표이다.

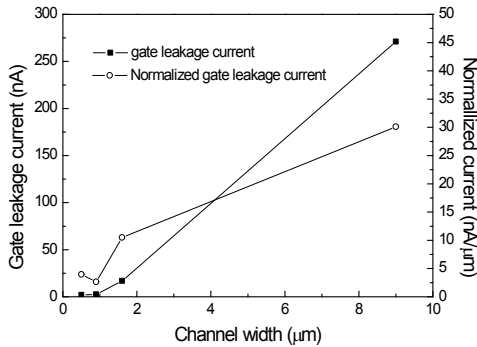


Fig. 6. Gate leakage current characteristics of the AlGaIn/GaN HEMTs corresponding to the channel width

그림 6. 채널폭에 따른 AlGaIn/GaN HEMT의 게이트 누설 전류 특성

이상과 같이 채널폭에 따른 트랜지스터 특성의 변화는 sub- μm 의 작은 폭에서 나타나고 있으며 더욱 작은 채널폭에서는 더욱 큰 변화를 나타낼 것으로 보이기 때문에 매우 작은 전력을 요하는 부품에 적용하기 위한 트랜지스터의 제작에서 반드시 고려되어야 할 것이다.

Table 1. Electrical characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs with various channel width

표 1. 채널폭에 따른 AlGaIn/GaN HEMT의 게이트 누설 전류 특성

Wg, μm	Idss, mA	Vth, V	Gm, mS/mm	Ig, nA
0.5	0.106	-2.5	150	1.98
0.9	0.26	-2.8	161	2.39
1.6	0.719	-2.85	249	16.8
9	4.253	-2.85	251	271

IV. 결론

본 연구에서는 메사식각을 이용하여 각 소자를 절연하는 방법으로 제작된 AlGaIn/GaN HEMT에서 채널의 폭을 좁게 하였을 때 나타나는 협폭효과에 대하여 실험하였다. 게이트를 형성하지 않은 상태에서 채널의 면저항을 측정된 결과 sub- μm 크기로 채널폭이 작아짐에 따라 채널의 면저항이 급격히 증가함을 확인

하였다. 제작된 HEMT의 문턱전압 또한 채널폭이 sub- μm 크기로 작아짐에 따라 양의방향으로 증가하여 면저항의 변화와 유사한 경향을 나타냈으며 게이트의 역방향 누설전류는 채널폭에 따라 감소하였으나 sub- μm 크기에서는 감소가 둔화되었다. 채널폭이 작아짐에 따라 나타는 이와 같은 일련의 현상들은 AlGaIn 층의 strain 감소로 인한 압전분극 감소가 원인이 되는 것으로 사료된다.

References

- [1] D. Krausse, F. Benkhelifa, R. Reiner, R. Quay, O. Ambacher, "AlGaIn/GaN Power amplifiers for ISM applications", *Solid-State Electron.*, Vol. 74, p. 108 (2012)
- [2] T. Oka, and T. Nozawa, "AlGaIn/GaN Recessed MIS-Gate HFET With High Threshold Voltage Normally-Off Operation for Power Electronics Applications", *IEEE Electron Dev Lett.*, Vol. 29, No. 7, p. 668 (2008)
- [3] Vetry, R., Zhang, N.Q., Keller, S., and Mishra, U. K., "The Impact of Surface States on the DC and RF Characteristics of AlGaIn/GaN HFETs", *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 48, No. 3, p. 560 (2001)
- [4] T. Palacios, A. Chakraborty, S. Rajan, C. Poblenz, S. Keller, S. P. Denbaars, J. S. Speck, and U. K. Mishra, "High-power AlGaIn/GaN HEMTs for Ka-band applications," *IEEE Electron Device Lett.*, Vol. 26, no. 11, p. 781 (2005)
- [5] W. Saito, T. Domon, I. Omura, M. Kuraguchi, Y. Takada, K. Tsuda, M. Yamaguchi, "Demonstration of 13.56-MHz Class-E Amplifier Using a High-Voltage GaN Power-HEMT", *IEEE Electron Device Lett.*, Vol. 27, No. 5, p. 326 (2006)
- [6] Ki-Sik Im, Jong-Bong Ha, Ki-Won Kim, Jong-Sub Lee, Dong-Seok Kim, Sung-Ho Hahm, and Jung-Hee Lee, "Normally Off GaN MOSFET Based on AlGaIn/GaN Heterostructure With Extremely High 2DEG Density Grown on Silicon Substrate", *IEEE Electron Device Lett.*, Vol. 31, No. 3, p. 192 (2010)
- [7] Naohisa Harada, Yujin Hori, Naoki Azumaishi, Kota Ohi, and Tamotsu Hashizume, "Formation of Recessed-Oxide Gate for Normally-Off

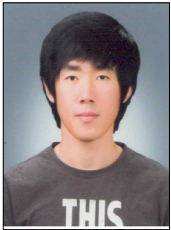
AlGaN/GaN High Electron Mobility Transistors Using Selective Electrochemical Oxidation", Appl. Phys. Express, Vol. 4, p. 021002 (2011)

[8] S. Maroldt, C. Haupt, W. Pletschen, S. Muller, R. Quay, O. Ambacher, C. Schippel, and F. Schwierz, "Gate-recessed AlGaN/GaN based enhancement-mode high electron mobility transistors for high frequency operation", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 48, p. 04C083 (2009)

[9] O. Ambacher et al., "Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N- and Ga-face AlGaN/GaN heterostructure", J. Appl. Phys. Vol. 85, No. 6, p. 3222 (1999)

BIOGRAPHY

Jin Hong Lim (Student Member)

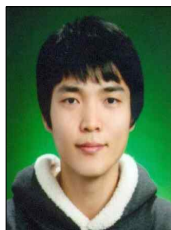


2012 : BS degree in Dept. of Semiconductor Science and Technology, Chonbuk National University.

2013~ : MS degree in Dept. of Semiconductor Science and Technology and Chemical

Engineering, Chonbuk National University.

Jeon Jin Kim (Student Member)



2009 : BS degree in Dept. of Semiconductor Science and Technology, Chonbuk National University.

2011 : MS degree in Dept. of Semiconductor Science and Technology and Chemical

Engineering, Chonbuk National University.

2011~ : PhD degree in Dept. of Semiconductor Science and Technology and Chemical

Engineering, Chonbuk National University.

Kyu Hwan Shim (Member)



1983 : BS degree in Dept. of Materials Science Engineering, Korea University.

1985 : MS degree in Dept. of Materials Science Engineering, Korea University.

1996 : PhD degree in Dept. of Electronic Materials, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign

1985~2005 : Member of Research Staff, ETRI

2005~ : Professor, Chonbuk National University

Jeon Wook Yang (Member)



1981 : BS degree in Dept. of Electronics Engineering, Kwang Woon University.

1983 : MS degree in Dept. of Electronics Engineering, Yonsei University.

1994 : PhD degree in Dept. of Electronics Engineering, Yonsei University.

1983~1998 : Member of Research Staff, ETRI

1998~ : Professor, Chonbuk National University