

유기금속 화학증착법을 사용한 AlGaInP층의 Zn 도우핑 농도의 특성

윤기현·김남현*

연세대학교 공과대학 세라믹공학과

*삼성종합기술원

Characterization of Zn Doping in AlGaInP Epitaxy Layer Grown by MOCVD

Ki Hyun Yoon and Nam Heon Kim*

Department of Ceramic Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749

*Samsung Advanced Institute of Technology, Materials & Devices Research Center, P. O. Box 111, Suwon, Korea 440-600

초 록 저압 유기금속 화학증착법을 사용하여 AlGaInP층의 diethylzinc의 III족 원소(Al, Ga, In)에 대한 비와 성장온도 변화에 따른 Zn(acceptor)의 첨가 농도특성을 연구하였다. Diethylzinc의 III족 원소(Al, Ga, In)비를 0.4에서 2.0까지 변화시켜 본 결과 0.85일 때 가장 높은 acceptor 농도를 가졌으며, 성장온도를 690°C에서 800°C까지 변화시킨 결과 성장온도에 대한 변화는 690°C-730°C일 때 온도가 증가함에 따라 acceptor농도는 커졌으며, 그 이상에서는 감소하였다. 또한, 성장속도가 빠를수록 높은 acceptor농도를 가지게 되어 3.3 $\mu\text{m/hr}$ 의 성장속도일 때 $8 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 의 가장 높은 acceptor농도를 얻을 수 있었다.

Abstract Zn doping characteristics in the $(\text{Al}_x\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ epitaxy layer grown by the low pressure metalorganic chemical vapor phase deposition have been studied as a function of the ratio of diethylzinc to group III (In, Ga, Al) and growth temperature. The Zn(acceptor) concentration has the maximum value at 0.85 in the ratio of diethylzinc to group III in the range from 0.4 to 2.0. Acceptor concentration increased with increasing growth temperature from 690°C to 730°C, and then it decreased with increasing growth temperature above 730°C. It was observed acceptor concentration affected by growth rate. The highest acceptor concentration was obtained a value of $8 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ at the growth rate of 3.3 $\mu\text{m/hr}$.

1. 서 론

화합물 반도체 device를 제작함에 있어 가장 중요한 기술 중의 하나인 결정성장방법에서 널리 사용되고 또한 재현성이 뛰어난 방법이 유기금속 화학증착법(MOCVD: Metal Organic Chemical Vapor Deposition)이다^{1,2)}. 이 유기금속 화학증착법을 사용하여 적색 레이저 다이오드를 제작하려면 여러가지 물질을 사용할 수 있으나 그 중에서도 특히 GaInP/AlGaInP 이종이형접합구조는 적색 레이저 다이오드 제작에 주로 사용되는 물질이다. 이 적색 레이저 다이오드는 고밀도 광 디스크, 레이저 빔 프린터, 바코드 리더 등 광 정보처리기에 광범

위하게 광원으로 사용된다.

적색 레이저 다이오드는 1985년 상온에서 continuous-wave(CW)발진에 성공한 이후³⁻⁵⁾ 특성을 향상시키기 위한 연구가 진행되어 왔다⁶⁻¹²⁾. 특히 최근에는 고밀도 광 디스크의 기록 및 재생을 위해 고출력 적색 레이저 다이오드에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다¹³⁻¹⁵⁾.

그러나 GaInP/AlGaInP 이형접합구조의 레이저 다이오드 제작시 나타나는 문제점은 전자와 광자의 컨파인먼트(confinement)를 위해서 GaInP활성층과 AlGaInP클래드(clad)층의 에너지 밴드갭차이를 크게 해주어야 하는데 이를 위해서 Al이 많이 포함된 클래드(clad)

층을 사용하여야 한다. 하지만 Al이 많이 포함된 AlGaInP 클래드(clad)층도 GaInP 활성층과의 띠 간격 차이가 비교적 크지 않고, 또한 Al이 많이 포함될수록 전기적 저항이 커지게 되므로 레이저 작동시 전자의 누설이 발생하는 문제점을 안고 있다^{16~18)}. 이러한 전자의 넘침(overflow) 현상을 최대한 억제시키는 방법은 고농도의 p형 도우펀트(dopant, 본 실험에서는 Zn을 사용)를 사용한 AlGaInP층을 성장시킴으로써 전기적 저항을 낮추고, 전자의 leakage current를 줄이는 것이다. 아울러 AlGaInP층의 성장시 Al양이 많아질수록 Zn의 incorporation efficiency가 떨어져서 높은 전기적 저항을 갖게 되는 문제점도 있으므로 이를 이용한 레이저 다이오드의 특성은 p형 AlGaInP층의 전기적 특성에 매우 크게 영향을 받게 되는 문제점을 가지고 있다.

위와 같은 이유로 특성이 뛰어난 적색 레이저 다이오드를 제작하기 위해서는 전기적 특성을 좌우하게 되는 p형 AlGaInP층의 특성을 파악해야 하고, 이를 통해 높은 도우핑 농도를 얻을 수 있는 방법을 찾아야만 한다.

본 연구는 고농도의 p형 도우핑의 성장조건이 매우 어려운 $(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.5}In_{0.5}P$ 층에 Zn 도우핑 농도를 향상시키기 위한 성장조건을 찾는데 그 목적이 있다. 특히, Zn의 metal-organic source인 DEZn(diethylzinc)의 incorporation 효율이 성장온도에 따라서 도우핑 농도의 변화와 그 원인을 파악하고, Zn가 치환되어 도우펀트로서의 역할을 하게 되는 III족 원소와의 관계, 즉 DEZn/III족 원소의 비에 따른 도우핑 영향 및 성장속에 따라서 도우핑에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

2. 실험

적색 레이저 다이오드를 제작시 전기적, 광적 특성이 뛰어난 디바이스를 제작하기 위해서는 전자와 정공이 활성층에 가능한 한 많이 컨파인(confine)될 수 있도록 그 효율을 높여야 하는데 GaInP/AlGaInP 이형접합구조에서는 GaInP활성층과 AlGaInP층의 띠 간격 차이가 크지 않아 Fig. 1과 같은 전자의 누설이 발생하게 된다¹⁹⁾. Fig. 1에서 보는 바와 같이 barrier height인 δ_p 는 활성층과 클래드(clad)층의 밴드갭차이, ΔE_g 와 활성층과 p-클래드

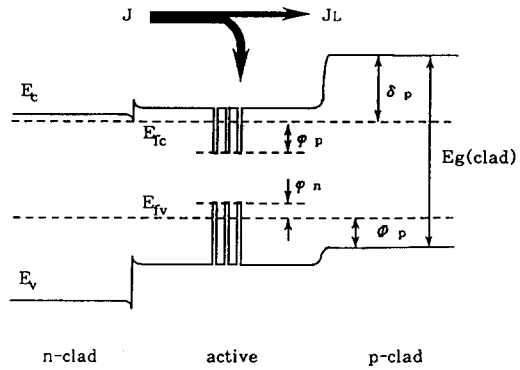


Fig. 1. Band Diagram of GaInP/AlGaInP Heterostructure.

층의 quasi-Fermi level, Φ_p , φ_n , φ_p 에 좌우된다. 이를 식으로 표현하면

$$\delta_p = \Delta E_g - \Phi_p - (\varphi_n + \varphi_p)$$

여기서 δ_p : barrier height

ΔE_g : GaInP활성층과 AlGaInP클래드층의 밴드갭 차이

Φ_p : p-클래드층의 quasi-Fermi level

φ_n : 활성층 가전자대의 quasi-Fermi level

φ_p : 활성층 전도대의 quasi-Fermi level

위의 식을 통해 p-클래드층의 도우핑 농도에 따른 δ_p 값의 변화를 그림으로 나타내면 Fig. 2와 같은 그래프를 얻을 수 있게 된다²⁰⁾.

본 논문에서는 660nm의 파장을 갖는 레이저 다이오드를 비교하였으므로 ΔE_g 같은 일정하게 되므로 δ_p 는 $\Phi_p - (\varphi_n + \varphi_p)$ 에 좌우된다. 특히, Φ_p 는 hole농도와 직접 연관되는 값이고, 또한, 활성층의 quasi-Fermi level인 φ_n , φ_p 는 injected carrier에 좌우되는 값으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$n = N_c F_{1/2}[\varphi_n / (kT)]$$

$$p = N_v F_{1/2}[\varphi_p / (kT)]$$

여기서, N_c : 전도대 상태의 유효밀도

N_v : 가전자대 상태의 유효밀도

$F_{1/2}[x]$: Fermi-Dirac integral이다.

또한, 운반자(carrier) 농도 n과 gain g와의 관계는

$$g = (q\beta_0 / \tau_n)n - \beta J_0$$

로 나타낼 수 있다.

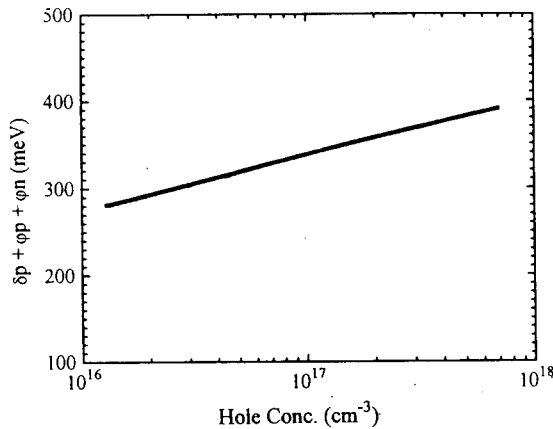


Fig. 2. Hole Concentration vs. Bandgap Change. (GaInP/AlGaInP Heterostructure, 660nm)

여기서, g : 이득
 q : 운반자의 전하
 η_i : 임계전류 전의 내부양자효율
 τ_n : carrier life time
 βJ_0 : gain coefficient이다.

이 식의 g 값, 즉 이득은 곧 바로 운반자 농도와 비례함을 알 수 있으므로, 운반자 농도가 증가함에 따라 증가됨을 알 수 있다.

한편, 임계전류에서의 g 값은 내부손실과 cavity mirror 손실의 합과 같으므로 임계전류에서의 운반자 농도, n_{th} 도 증가하게 된다. 그러므로, 위의 식들을 통해 p-클래드층의 hole 농도가 증가함에 따라 전자의 overflow는 줄어들게 되고, 활성층의 gain 즉, injected 운반자가 증가하게 되므로 이에 따라 $\phi_n + \phi_p$ 는 증가하게 되어 활성층과 p-클래드층 간에 더욱 더 높은 heterobarrier를 형성하게 된다. 다시 말해 p-클래드층의 hole 농도가 증가함에 따라서 활성층과 p-클래드층간의 가전자대의 차이가 커지게 되어 좋은 특성의 레이저 다이오드를 제작할 수 있다.

3. 실험 방법

MOCVD 장치는 운반 가스로 흐르는 수소의 양을 25 liter/minute로 고정하였고, run line과 vent line 사이에는 DP (Differential Pressure transducer)를 두 군데 연결하여 vent line의 압력을 조절함으로써 GaAs buffer층 성장 후 p-AlGaInP층 성장시의 가스유량 변화를 억제

시켜 깨끗한 계면을 얻을 수 있도록 하였다. 위와 같이 가스관을 통해 들어간 가스는 60 torr로 유지되는 반응관 안에서 RF inductor로 가열하여 반응시킴으로써 GaAs기판 위에 에피택시층을 성장시켰다. 기판은 n형 GaAs기판을 사용하였으며, 경사진 기판을 사용하면 GaInP활성층의 오더링(ordering)을 막을 수 있고, 또한 고농도의 p-AlGaInP층을 얻을 수 있으므로¹⁷⁾ (100)면에서 [011]방향으로 7° 경사진 기판을 사용하였다. 이 GaAs기판은 흑연 susceptor위에 위치하도록 하였고, 흑연 susceptor는 20r.p.m.의 속도로 회전시켜 에피택시층이 균일하게 성장되도록 하였다.

III족 원소 및 도우펀트로 사용되는 MO source (Metal-Organic source)는 TEGa (Triethylgallium, $(C_2H_5)_3Ga$), TMAI (Trimethylaluminium, $(CH_3)_3Al$), TMIIn (Trimethylindium, $(CH_3)_3In$) 및 DEZn (Diethylzinc, $(C_2H_5)_2Zn$)를 사용하였고, 특히 산소의 포함량에 따라 에피택시층에 영향을 주게 되는 TMAI은 oxygen reduced grade를 사용하였다. 본 연구에서는 MO source의 증기압이 일정하도록 일정한 온도를 유지하였고 (TEGa, TMAI, DEZn : 17°C, TMIIn : 20°C), 수소를 통해 나가는 source의 압력을 압력조절장치 (Pressure Controller)로 일정압력을 유지하는 (TEGa, TMAI : 750mbar, TMIIn, DEZn : 500mbar) 고정된 조건하에서, source를 통과하는 수소의 유량을 변경하여 MO source의 유량을 조절하였다. V족 원소로 사용되는 가스는 100% AsH₃, 100% PH₃, 0.1% SiH₄를 사용하였다.

본 실험에서의 p-AlGaInP층 성장은 먼저, 에피택시 성장층은 결정성장시에 형성될 수 있는 기판으로부터의 결정결함을 줄이기 위해 GaAs버퍼층을 0.5 μ m 성장시키고, 그 위에 p형 $(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.5}In_{0.5}P$ 층을 1 μ m 성장시켰으며, 표면의 산화를 막기 위해 p형 GaAs층을 성장시켰다. 본 실험에 서술된 모든 시편의 격자 부정합($\Delta a/a$, $\Delta b/b$: GaAs기판의 lattice constant - AlGaInP층의 lattice constant, a : GaAs기판의 lattice constant)은 DCXD (Double Crystal X-ray Diffractometer)를 통해 측정된 결과 2×10^{-3} 이하의 값을 가졌다.

본 실험에 사용된 시편의 hole 농도는 ECV (electrochemical capacitance voltage measure-

ment)를 통해 측정하였으며, 농도의 균일함을 측정하기 위해 NaOH용액을 사용하여 에피택시 성장층을 에칭하며 측정하였다. 또한 AlGaInP층의 Al조성을 파악하기 위해 PVS(Photovoltaic Spectroscopy)의 발전 과정을 측정하였다. 또한, AlGaInP층에 포함된 Zn의 전체 양을 파악하기 위하여 SIMS(Secondary Ion Mass Spectrometry)를 사용하여 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

DEZn/Ⅲ비와 Hole농도의 관계

Nishigawa²¹⁾보고에 의하면 $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P$ 층 성장시 Al조성 x 가 0, 0.4, 0.5, 0.7인 경우를 비교하여 hole농도는 Al조성에 따라 매우 큰 영향을 받는다. 그는 반응관 내부의 산소농도에 크게 영향을 받아 hole농도가 보상되는 AlGaAs의 경우와는 달리 AlGaInP층의 Al의 조성에 영향을 받는다고 보고하였다. 그러므로 본 연구에서 파악하고자 하는 hole농도 측정 이전에 성장된 $p-(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.5}In_{0.5}P$ 층의 조성을 확인하였다. 먼저, DCXD의 격자 부정합을 통해 In의 조성을 파악하였는데, 이때 모든 시편의 GaAs기판과의 격자 부정합은 2×10^{-3} 이하의 값을 가졌다. 이는 In의 조성변화가 5% 이내의 값을 가졌음을 의미한다. 그리고 Al의 조성은 ECV의 PVS를 통해서 나타나는 발전과정을 측정함으로써 파악하였는데, 이때의 조성변화는 5% 이내의 값을 가진 시편만을 택하여 hole농도를 측정하였다. 또한 Nishigawa²²⁾는 PH_3 가스와 Ⅲ족 원소의 비에 따라 $p-AlGaInP$ 층 내의 Zn의 양은 변화가 없으나 Zn의 electrical activity는 매우 큰 변화를 가진다고 보고하였다. 그는 $V/Ⅲ$ 비를 400이하가 되면 Zn의 전기활동도(electrical activity, $\eta = AlGaInP$ 층의 hole농도/ $AlGaInP$ 층에 포함된 전 Zn의 양)가 급격하게 떨어진다고 보고하였으므로, 본 연구에서는 성장된 $p-AlGaInP$ 층은 $V/Ⅲ$ 비를 400으로 고정하고 DEZn/Ⅲ비를 변화시키며 성장하여 hole농도를 측정하였다.

p형 $(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.5}In_{0.5}P$ 층의 DEZn의 물분율을 Ⅲ족 원소의 물분율로 나눈 비인 DEZn/Ⅲ 비율에 따라서 hole농도는 700°C, 710°C, 730°C의 성장온도에서 어떻게 변화되는가를 Fig. 3에서 나타내었다. Fig. 3에 나타낸 바와

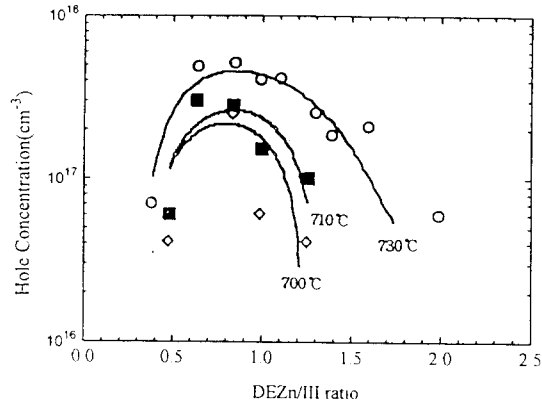
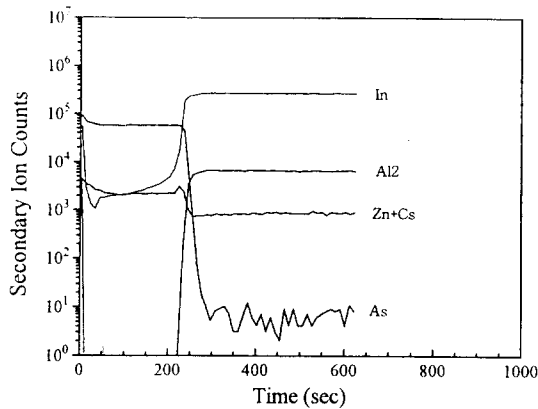
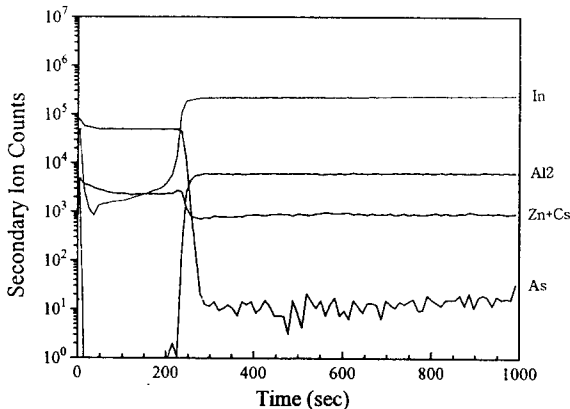


Fig. 3. DEZn/Ⅲ vs. Hole Concentration.

같이 DEZn/Ⅲ 비율이 0.85이하일 경우 DEZn/Ⅲ 비율이 증가함에 따라 Zn도핑량이 증가하게 되는데 이는 Zn가 대부분 Ⅲ족 원소 자리에 치환되어 들어감으로서 Zn가 원자확산에 의한 결정구조내부의 무질서화 역할을 하지 않고 hole로서의 역할을 해주기 때문이다. 그러나 DEZn/Ⅲ = 0.85부근에서 최대값을 갖고, 이후 DEZn/Ⅲ의 비율이 그 이상이 되면 Zn의 도핑량이 증가되어도 interstitial Zn, Zn-Zn 간의 결합 등으로 Zn가 acceptor로서의 역할을 할 수 없고 불순물로 존재하게 되어 Zn의 전기활동도는 떨어지게 된다²²⁾. 이는 Fig. 4에 나타낸 SIMS 측정결과로 잘 알 수 있다. Fig. 4의 SIMS 측정은 Zn도우핑된 AlGaInP층의 표준시편 측정을 실시하지 못하여 secondary ion count의 양만을 비교하였다. 하지만 두 시편의 Al의 조성은 동일하므로 임의단위(secondary ion count)만으로도 Zn의 양을 비교해 볼 수 있는데, Fig. 4의 (a), (b)에 나타난 바와 같이 DEZn/Ⅲ의 비가 0.85일 때 SIMS detector에 나타난 Zn의 양은 700 counts이고, DEZn/Ⅲ비가 1.41일 때의 Zn의 양은 800 counts이었다. 이때의 Zn의 incorporation efficiency를 비교해 보면, 반응관으로 보내주었던 Zn의 양은 각각 3.03sccm, 5.05sccm이었으므로 그 효율은 231.0(arb.unit/sccm), 158.4(arb.unit/sccm)으로 나타낼 수 있다. 이는 DEZn/Ⅲ의 비가 0.85이상이 되면 Zn는 hole 역할을 할 수 있는 Zn와 결합하여 electrical activity를 떨어뜨리게 되고, 이로 인해 hole농도가 떨어지게 된다. 또한, 성장온도에 따라서



(a) DEZn / III = 0.85



(b) DEZn / III = 1.41

Fig. 4. Zn Concentration in AlGaInP Layer at Different DEZn/III Ratios By SIMS.

도 DEZn/III비의 변화에 대해 hole농도가 다른 값을 갖게 되는데 Fig. 3에 나타난 바와 같이 온도가 증가할수록 더 높은 값을 가졌다.

성장온도와 Hole농도의 관계

Nozaki²²⁾는 전자 회절 패턴을 통해 AlGaInP층 성장시 성장온도에 따라서 결정의 장 범위 규칙화(long range ordering)가 형성된다고 보고하였는데, 이는 Al이 결정성장 표면에서의 III족 원소의 이동을 가능케 해주기 때문이라고 설명하였다. 그리고, PL(photo luminescence) 측정을 통해서 Al의 조성이 0.5 이하에서는 성장온도의 변화에 따라 띠틈격 에너지의 변화가 있으나, Al의 조성이 0.5 이상에서는 어느 성장온도에서도 띠틈격 에너지의 변화가 없음을 보고하였다. 본 연구에서는 Al의 조성이 0.7인 p-AlGaInP층에 관하여 실

험하였으므로 띠틈격 에너지의 변화는 없으므로 장 범위 규칙화로 인한 hole농도에 미치는 영향은 무시하였다.

또한, Nishigawa²⁴⁾는 p-AlGaInP층의 성장 온도에 따라서 In의 incorporation이 변화되어 AlGaInP층의 격자상수가 변화된다고 보고하였는데, 본 논문에서는 이러한 변화를 배제하기 위하여 4.1절에서 언급한 바와 같이 격자 부정합이 2×10^{-3} 이하의 값을 가지는 시편들만을 비교하였다.

GaAs층 성장의 경우에 Zn의 incorporation 효율은 성장온도에 크게 좌우되어 성장온도가 높아짐에 따라 Zn의 휘발에 의해 Zn의 도우핑 농도는 낮아지게 되는 것은 잘 알려진 사실이다²⁶⁾. 하지만 AlGaInP층의 Zn의 hole농도는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 730°C까지는 성장온도가 올라감에 따라 향상되고 그 이상의 성장온도에서는 점점 낮아졌다. Fig. 5에 나타난 성장온도에 따른 hole농도의 관계에서의 에피택시층 성장조건은 4.1절에서 III/V비가 0.85일 때 가장 높은 hole농도를 얻었으므로 이를 사용하였으며 V/III비는 400을 유지하였다. 730°C에서 가장 높은 hole농도를 얻을 수 있었던 원인을 확인하기 위해 DCXD로 각 온도에서의 결정성을 측정하였고, 또한 710°C, 730°C, 770°C에서의 Zn의 포함량을 SIMS로 분석하였다. 먼저, 결정성의 비교를 위해 성장온도에 따른 DCXD rocking curve와 DCXD rocking curve의 반치폭 변화를 Fig. 6, Fig. 7에 나타내었다. Fig. 6에 나타난 rocking

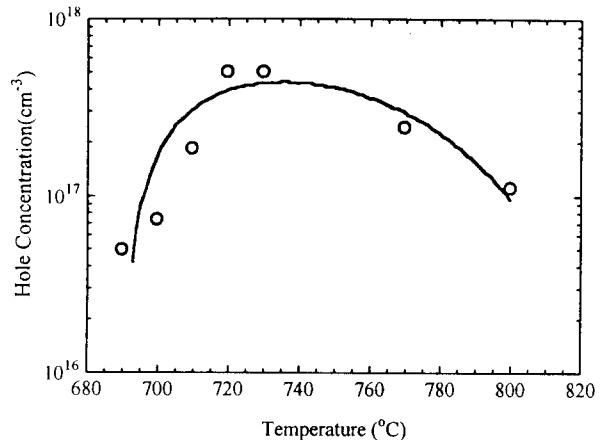


Fig. 5. Growth Temperature vs. Hole Concentration.

curve중 710°C 및 770°C에서 sharp peak를 보여주지 못하는 것은 AlGaInP층의 compositional fluctuation이 존재함을 의미하며, 이는 Zn가 III족 원소대신 치환되어 hole로서 작용할 수 있는 Zn를 interstitial Zn가 방해하는 것이 상대적으로 많아졌음을 의미한다. 이는 Nishigawa²⁵⁾가 설명한 V/III비에 따른 DCXD의 rocking curve변화와 Zn의 전기활동도의 변화의 관계와 잘 일치한다. Fig. 7에 나타낸 DCXD의 rocking curve의 반치 폭은 peak의 sharpness를 비교하기 위한 것으로 모두 같은 두께로 성장시킨 p-AlGaInP층을 비교하였으므로 반치폭값을 서로 비교하여 결정성을 비교할 수 있다. Fig. 7에 의하면 AlGaInP층이 730°C까지는 성장온도가 높을수록 결정성이 좋아지므로 Zn가 hole로서 작용하기 위한 조건이 잘 형성된다고 할 수 있다. 또한, Fig. 8에 나타낸 SIMS 측정결과와 같이 같은 양의

Zn를 반응관에 넣어 주어도 710°C, 730°C, 770°C에서 AlGaInP층에 첨가된 Zn의 양은 각각 600, 700, 450counts로 730°C에서 가장 많은 양이 들어가게 되므로 이는 Zn의 휘발로 인한 영향보다는 결정성에 크게 영향을 받음을 알 수 있고, 730°C이상이 되면 GaAs층

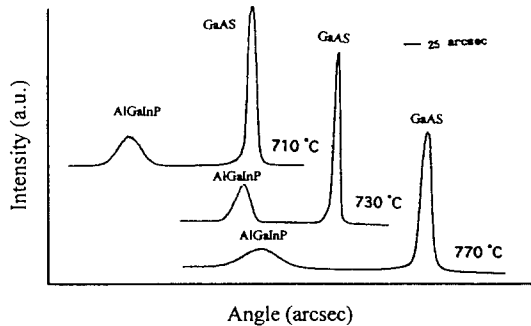


Fig. 6. DCXD Rocking Curve for Various Temperatures.

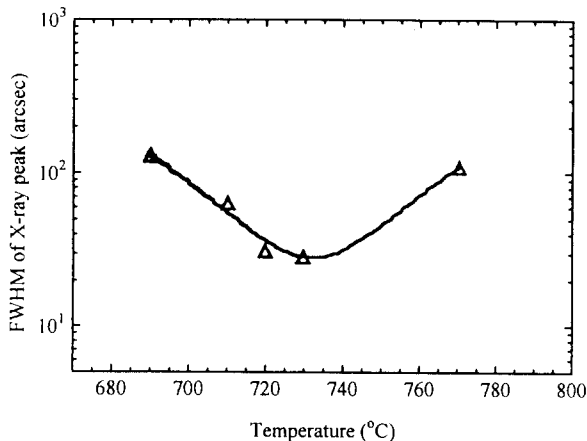
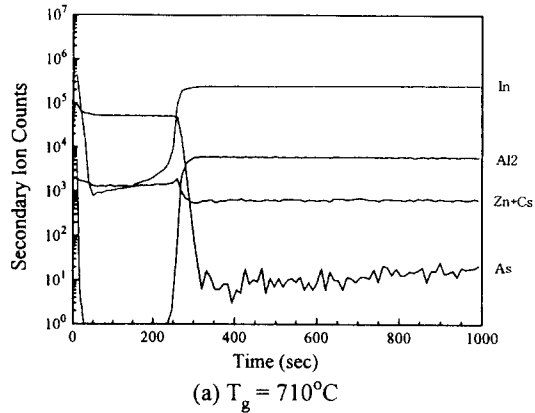
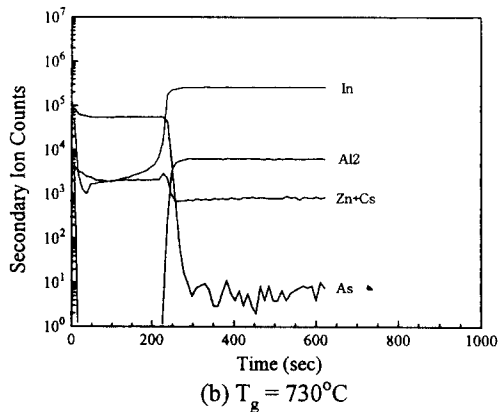


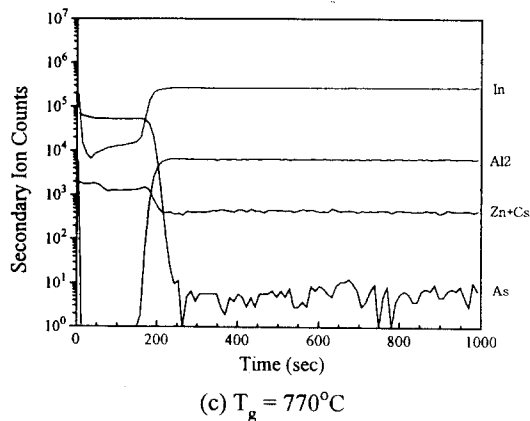
Fig. 7. Growth Temperature vs. FWHM of DCXD Rocking Curve.



(a) $T_g = 710^\circ\text{C}$



(b) $T_g = 730^\circ\text{C}$



(c) $T_g = 770^\circ\text{C}$

Fig. 8. Zn Concentration in AlGaInP Layer at Different Temperatures by SIMS

(a) $T_g=710^\circ\text{C}$, (b) $T_g=730^\circ\text{C}$ and (c) $T_g=770^\circ\text{C}$

성장시의 Zn의 거동과 마찬가지로 분해되었던 Zn가 휘발되어 AlGaInP층 성장시 730°C에서 보다 적은 양이 들어감과 동시에 결정성 또한 나빠지게 되므로, 이에 따라 Zn의 도우핑 농도도 730°C까지는 증가하나, 성장온도가 더 높아지면 감소하였다.

성장속도와 Hole농도의 관계

V/Ⅲ비 및 DEZn/Ⅲ와 성장온도를 고정시킨 조건하에 성장속도에 따른 hole 농도변화를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에 나타낸 바와 같이 3.3 μm/hr의 성장속도에서 $8 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 의 높은 hole농도를 얻을 수 있었다. 이는 Cao가²⁷⁾ GaInP의 성장을 통해서 밝힌 바와 비교할 수 있다. 그는 성장속도에 따라 표면 상태도 변화되고 규칙화(ordering)에 의해 에너지 띠 간격도 변화된다고 보고하였다. 하지만 p-AlGaInP층 성장의 경우 4.2절에서 언급된 바와 같이 규칙화가 나타나더라도 에너지 띠 간격의 변화는 PVS측정 결과 나타나지 않았고, 또한 성장속도에 따른 표면상태의 변화는 관찰할 수 없었다. 빠른 성장속도에서는 높은 hole농도를 얻을 수 있었는데 이는 AlGaInP층에 Zn의 표면확산 거리가 짧아져 비교적 쉽게 도우펀트 자리를 차지하게 되나, 성장속도가 늦어짐에 따라 Zn가 표면으로 확산되고 표면에서 다시 떨어져 나가게 되어 이와 같은 현상이 나타나게 된다. 이와같은 현상을 확인하기 위하여 DEZn/Ⅲ의 비를 0.85로 고정시킨 조건하에 1.5 μm/hr의 성장속도와 2.3 μm/hr의 성장속도로 성장된 p형 AlGaInP층에 포함된 전 Zn의 양을 SIMS를 통해 측정한 결과

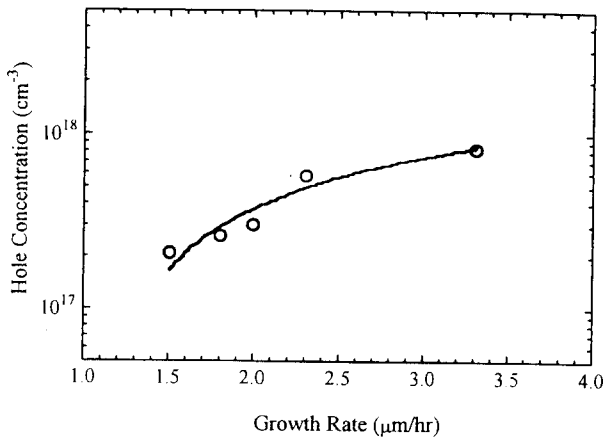
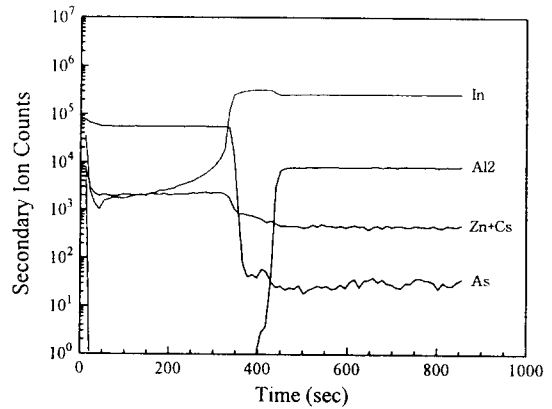
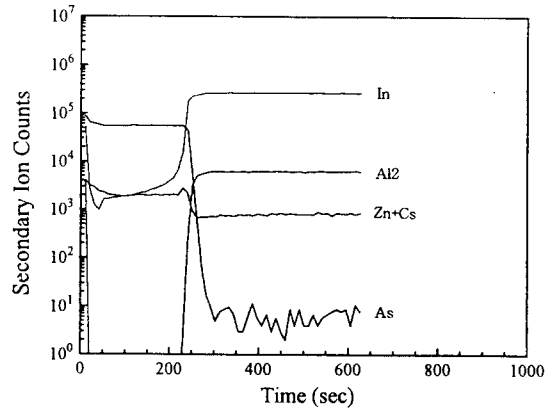


Fig. 9. Growth Rate vs. Hole concentrations.



(a) Growth rate = 1.5 μm/hr



(b) Growth rate = 2.3 μm/hr

Fig. 10. Zn Concentration in AlGaInP Layer at Different Growth Rates by SIMS.

Fig. 10과 같이 1.5 μm/hr의 성장속도에서는 500 counts, 2.3 μm/hr의 성장속도에서는 700 counts로 나타났다. 이는 앞서 언급된 바와 같이 성장속도가 빨라짐에 따라서 Zn가 쉽게 도우펀트 자리를 차지하게 되어 높은 hole농도를 얻을 수 있다는 점과 잘 일치하였다.

5. 결 론

1) p형 (AlGa)InP층 결정성장시 DEZn/Ⅲ 비율이 낮을 경우 DEZn/Ⅲ 비율이 증가함에 따라 Zn 도우핑 농도가 증가하게 되고 DEZn/Ⅲ = 0.85 부근에서 최대값을 갖게 된다. DEZn/Ⅲ의 비율이 0.85이상이면 Zn의 전기활동도가 떨어지게 되어 hole(Zn)의 농도는 떨어지게 됨을 SIMS결과로 확인하였다.

2) p형 AlGaInP층 Zn의 도우핑 농도는 730°C까지는 성장온도가 올라감에 따라 항상

되고 그 이상의 성장온도에서는 점점 낮아졌다. 이는 AlGaInP층이 결정성장층의 결정질에 영향을 받게 되기 때문이며 DCXD의 rocking curve를 통해 확인할 수 있었고, 또한, 730°C에서 AlGaInP층에 Zn가 최대량으로 포함됨을 확인하였다.

3) v/III 비, DEZn/III 비와 성장온도를 고정시킨 조건하에 성장속도에 따른 Zn의 도우핑 농도는 성장속도가 증가함에 따라 증가하게 되어 $3.3\mu\text{m}/\text{hr}$ 의 성장속도에서 $8 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 의 가장 높은 Zn도우핑 농도를 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

1. T. Suzuki, I. Hino, A. Gomyo and K. Nishida "MOCVD-grown AlGaInP double heterostructure lasers optically pumped at 90", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 21, p. L731, (1982)
2. I. Hino and T. Suzuki, "MOCVD growth of (AlGa)InP and double heterostructures for visible light lasers", J. Cryst. growth, vol. 68, p. 483, (1984).
3. K. Kobayashi, S. Kawata, A. Gomyo, I. Hino, and T. Suzuki, "Room-temperature cw operation of an AlGaInP double-heterostructure visible lasers", Electron. Lett., vol. 21, no. 20, p. 931, (1985).
4. M. Ishikawa, Y. Ohba, H. Sugawara, M. Yamamoto, and T. Nakanishi, "Room-temperature CW operation of InGaP/InGaAlP visible laser diodes on GaAs substrates grown by metalorganic chemical vapor deposition", Appl. Phys. Lett., vol. 48, p. 207, (1986).
5. M. Ikeda, Y. Mori, H. Sato, K. Kaneko, and N. Watanabe, "Room-temperature continuous-wave operation of an AlGaInP double heterostructure laser grown by atmospheric metalorganic chemical vapor deposition", Appl. Phys. Lett., vol. 47, p. 1027, (1985).
6. M. Ishigawa, Y. Ohba, Y. Watanabe, H. Sugawara, M. Yamamoto, and G. Hatakoshi, "Room-temperature CW operation of transverse mode stabilized InGaAlP visible light laser diodes", Trans. IECE Japan, vol. E69, p. 382, (1986).
7. M. Ishigawa, Y. Ohba, Y. Watanabe, H. Nagasaka, H. Sugawara, M. Yamamoto, and G. Hatakoshi, "InGaAlP transverse mode stabilized visible laser diodes fabricated by MOCVD selective growth", Abst. 18th Conf. Solid State Dev., Mater., Tokyo, Japan, p. 153, (1986).
8. R. Tanaka, S. Minagawa, t. Kajimura, "Transverse-mode-stabilized ridge stripe AlGaInP semiconductor lasers incorporating a thin GaAs etch stop layer", Appl. Phys. Lett., vol. p. 1391, (1989).
9. Y. Uematsu, G. Hatakoshi, M. Ishikawa, and M. Okajima, "670nm transverse-mode stabilized InGaAlP laser diodes", SPIE proc., vol. 1219, p.2, (1990).
10. M. Ishigawa, Y. Ohba, Y. Watanabe, H. Nagasaka, H. Sugawara, M. Yamamoto, and G. Hatakoshi, "Low threshold current InGaP/InAlP transverse mode stabilized lasers", in Tech. Dig., 10th IEEE Int. Semiconductor Laser Conf., Kanazawa, Japan, p. 2, (1986).
11. K. Nakano, M. Ikeda, A. Doda, and c. Kojima, "Very low threshold current density of a GaInP/AlGaInP double-heterostructure laser grown by MOCVD", Electron. Lett., vol. 23, p. 894, (1987).
12. H. Shiozawa, H. Okuda, M. Ishikawa, G. Hatakoshi, and Y. Uematsu, "High temperature CW operation of visible light-emitting GaInP/AlGaInP inner stripe laser diodes", Electron. Lett., vol. 24, p. 877, (1988).
13. T. Tanaka, A. Oishi, t. Kajimura, and S. Minagawa, "High temperature operation of index-guided AlGaInP semiconductor lasers", 22nd Conf. Solid State Dev., Mater., Sendai, Japan, p. 1177, (1990).
14. K. Itaya, M. Ishikawa, H. Okuda, Y. Watanabe, K. Nitta, H. Shiozawa, and Y. Uematsu, "Effect of facet coating on the reliability of InGaAlP visible light laser

- diode", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 53, p. 1363, (1988).
15. H. Okuda, M. Ishikawa, H. Shiozawa, Y. Watanabe, K. Itaya, K. Nitta, G. Hatakoshi, Y. Kokubun, and Y. Uematsu, "Highly reliable InGaP/InGaAlP visible light emitting inner stripe lasers with 667nm lasing wavelength", *IEEE J. Quantum Electron.* vol. 25, p. 1477, (1989).
 16. G. Hatakoshi, K. Nitta, K. Itaya, Y. Nishikawa, M. Ishikawa and M. Okajima, "High power InGaAlP laser diode for high density optical recording", *Jpn. Appl. Phys.*, vol. 31, p. 501, (1992).
 17. H. Hamada, S. Honda, R. Hiroyama, K. Yodoshi and T. Yamaguchi, "Activation of Zn acceptors in AlGaInP epitaxial layers grown on misoriented substrates by metal organic chemical vapor deposition", *Electron. Lett.*, vol. 28, p. 585, (1992).
 18. M. Suzuki, Y. Nishigawa, M. Ishikawa and Y. Kokubun, "Effects of substrate misorientation on doping characteristics and bandgap energy for InGaAlP crystals grown by metalorganic chemical vapor deposition", *J. Cryst. Growth*, vol. 113, p. 127, (1991).
 19. G. Hatakoshi, K. Itaya, M. Ishigawa, M. Okajima, and Y. Uematsu, "Short wavelength InGaAlP visible laser diodes", *IEEE J. Quantum Elec.*, vol. 27, p. 1476, (1991).
 20. G. Hatakoshi, K. Nitta, K. Itaya, Y. Nishikawa, M. Ishigawa, and M. Okajima, "High-power InGaAlP laser diodes for high density optical recording", *Jpn. Appl. Phys.* vol. 31, p. 501, (1992).
 21. U. Nishikawa, Y. Tsuburai, C. Nozaki, Y. Ohba, and Y. Kokubun, "Zn doping characteristics for InGaAlP grown by low-pressure metalorganic chemical vapor deposition", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 53, p. 2182, (1988).
 22. C. Nozaki, Y. Ohba, H. Sugawara, S. Yasuami and T. Nakashini, "Growth temperature dependent atomic arrangements and their role on band-gap of InGaAlP alloys grown by MOCVD", *J. Cryst. Growth*, vol. 93, p. 406, (1988).
 23. Y. Nishikawa, M. Ishigawa, H. Sugawara, G. Hatakoshi, and Y. Kokubun, "Anomalous dependence of In incorporation on substrate temperature into Zn doped InGaAlP grown by low-pressure MOCVD", *J. Cryst. Growth*, vol. 112, p. 628, (1991).
 25. Y. Nishigawa, H. Sugawara, M. Ishikawa, Y. Kokubun, "Effects of V/III ratio on Zn electrical activity in Zn doped InGaAlP grown by metalorganic chemical vapor deposition", *J. Cryst. Growth*, vol. 108, p. 728, (1991).
 26. S. B. Bass and P. E. Oliver, *Institute of Physics Conf. Series No. 33b*.
 27. D. S. CaO, E. H. Reihlen, G. S. Chen, A. W. Kimball, and G. B. Stringfellow", "Effects of growth rate on properties of GaInP grown by organometallic vapor phase epitaxy", *J. Cryst. Growth*, vol. 109, p. 279, (1991).