고품질 질화물 반도체 박막 성장을 위한 반응로 구조 및 열적 조건에 관한 연구

김진택* · 백병준† · 이철로** · 박복춘***

(2004년 8월 17일 접수, 2004년 10월 6일 심사완료)

A Study on the Reactor Configuration and Thermal Conditions for the Growth of High Quality Thin Film of GaN Layer

Jin Taek Kim, Byung Joon Baek, Cheul Ro Lee and Bock Choon Pak

Key Words: MOCVD(유기금속 화학증착법), GaN(질화갈륨), Deposition Rate(증착율), Horizontal Reactor(수평반응로), Susceptor(반응부), Thin Film(박막)

Abstract

Numerical calculation has been performed to investigate the transport phenomena in the horizontal reactor which has two different gas inlets for MOCVD(metalorganic chemical vapor deposition). The full elliptic governing equations for continuity, momentum, energy and chemical species are solved by using the commercial code FLUENT. It is investigated how thermal characteristics, reactor geometry, and the operating parameters affect flow fields, mass fraction of each reactants. The numerical simulations demonstrate that flow rate of each species, inlet geometry of the reactor, and its distance from the susceptor as well as the inclination of upper wall of reactor can be used effectively to optimize reactor performance. The commonly used idealized boundary conditions are also investigated to predict flow phenomena in the actual deposition system.

기호설명

$D_{i,m}$: 혼합물내 화학종 i 의 확산계수 (m^2/s)
D_i^T : 화학종 i의 열확산계수 (m^2/s)
J_i : 농도 기울기에 의한 확산 플럭스 (kg/m^2s)
L_p : 입구와 반응면 거리 (m)
L_s : 벽면의 경사 시작 위치 (m)
M_i : 화학종 i의 분자량 (kg/kmol)
m_i : 화학종 i 의 혼합물 질량과의 질량비
T : 혼합물 온도 (K)
T_w : 벽면 온도 (K)
X_i : 화학종 i의 몰 분율
x : 유동방향 (m)
y : 유동의 수직방향 (m)
u : 유동방향 속도 (m/s)
v : 수직방향속도 (m/s)
ρ : 혼합물 밀도 (kg/m^3)

* 회원, 전북대학교 자동차신기술연구센터
† 책임저자, 회원, 전북대학교 기계항공시스템공학부, 자동차신기술연구센터
E-mail : baekbj@chonbuk.ac.kr
TEL : (063)270-2373 FAX : (063)270-2388
** 전북대학교 신소재공학부
***회원, 전북대학교 기계항공시스템공학부

1. 서 론

화합물반도체는 디스플레이용 발광다이오드(LED), 광통신 등 산업적으로 광범위하게 응용되고 있으며 완전한 색상의 구현을 위한 고 휘도 발광다이오드의 실용화는 시급한 문제이다. 청색

발광다이오드는 MOCVD(metal organic chemical vapor deposition)장치를 사용하여 III-V족 질화물 반도체(AlN, GaN, InN 등)를 웨이퍼 위에 증착하여 제조한다. GaN계 III족 질화물 반도체의 성장은 약 1000℃~1100℃의 고온에서 이루어지기 때문에 온도에 민감한 반응가스의 유동 및 물질전달이 중요하다. 특히 양질의 에피층(epitaxial layer) 성장을 위한 중요한 요소 중 하나는 반응가스의 층류 유동이 기판과 평행하게 형성되어야 하며 이를 위해 기판 위를 흐르는 반응가스의 흐름제어가 필수적이다.

반응기의 형상을 고려한 반응로 내부의 열 및 유체역학적 해석이 Jensen 등[1]에 의해 수행된 바 있으며, 최근에는 물질전달을 고려하여 실제 CVD 공정과 가깝게 수치모사를 수행하는 연구[2]가 많이 진행되고 있다. Eversteyn 등[3]은 단순한 형태의 CVD 반응로의 유동 특성이 박막성장에 미치는 영향을 실험적으로 검토하여 대류의 효과가 중요한 인자가 됨을 발표하였다. 기존에 무시되었던 대류의 영향으로 가스의 혼합이 증가함을 가시적으로 규명하였으며, 가스속도와 경계층 두께가 성장 층의 균일성에 미치는 영향을 예측할 수 있는 이론식을 제시하였다. Chiu와 Jalulia[4]는 Eversteyn 등[3]이 사용한 동일 모델을 적용하여 열전달 특성에 대한 수치해석을 수행하여 반응면의 온도 및 Nu수 분포에 의해 반응율 및 그 균일성을 예측하였으며 다른 형태의 반응로에 대한 부력의 영향을 검토하였다.

박막성장을 예측할 때 그 성장두께의 균일성은 중요한 관심 대상이다. 이 관점에서 Cho 등[5]은 화학기상 증착 반응로의 입구 농도 경계조건을 최적화하여 증착율의 균일성을 획기적으로 증진시킬 수 있음을 제안하였다. 농도 및 유량과 함께 반응로 형상이 증착율의 균일성에 미치는 영향은 크다 할 수 있으나, 주로 고정된 형상의 반응로가 사용되고 있다. 최근 Cho와 Choi[6]는 채널 윗면의 형상을 최적화하여 균일한 증착을 얻을 수 있는 기법을 소개한 바 있다. Chiu 와 Jalulia[7]는 저속으로 이동하는 반응면의 영향이 물질부착에 큰 영향이 없음을 보이고 연속공정에 의한 산업적 대량생산 가능성을 제시하였다.

반응면 도달전의 암모니아와 반응기체의 선행반응(pre-reaction)을 방지하기 위하여 Hardtdegen 등[8]은 암모니아와 반응기체가 만나서 기판까지 도달하는 시간 및 거리를 단축하고자 하였다. 그러나 기판까지의 거리를 너무 짧게 하면 충분한 혼합이 발생하지 않아 성장이 어렵거나 또는 저품위의 GaN 계열 에피층이 성장하게 된다. 그러므로 이들 상반된 조건에 대한 구체적 연구가 요구되는 실정이다.

Theodorpoulos 등[9]은 수소 및 암모니아와 TMG (trimethyl gallium, $Ga(CH_3)_3$)로부터 GaN(gallium nitride) 박막을 형성하는 간단한 운동학적 모델(kinetic model)을 제안하고, 반응면에 도달한 농도에 의해 증착율을 예측한 결과를 제시하였다. 이 결과는 가스의 확산에 비해 표면반응이 매우 빠른 경우 표면에 도달된 모든 반응물질은 도달 즉시 소멸된다는 Mahajan[10]의 설명과 부합한다. 본 연구에서도 이 방법을 사용하여 반응로내 각 반응기체들의 열 및 물질전달을 해석한 후 반응면 위에 도달된 기체의 질량전달 및 몰 평형 식으로부터 증착율을 계산하였다.

기존의 연구들은 일반적인 반응로 구조와 작동조건에 대하여 현상학적인 성능 파악이 대부분이며 구체적이고 총괄적인 분석이 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 반응기체의 혼합 및 증착 두께에 미치는 각종 영향을 검토한 후 제안된 반응로 구조 및 열적조건에 대하여 최적의 작동조건을 제시하고자 한다.

2. 해석방법

2.1 해석모델

본 연구에서 채택한 계산모델의 기하학적인 형상은 Fig.1과 같이 상·하로 분리된 입구를 갖는 수평 채널을 사용하였다. 반응로의 구성은 비 반응 영역인 저온 벽면 및 입구영역과 출구영역, 고온의 반응영역으로 구분할 수 있다. 입구영역은 유기금속 재료인 TMG와 수소의 유입부와 암모니아의 유입부를 분리하여 상부 입구에는 수소와 TMG가 유입되고 하부 입구는 암모니아가 유

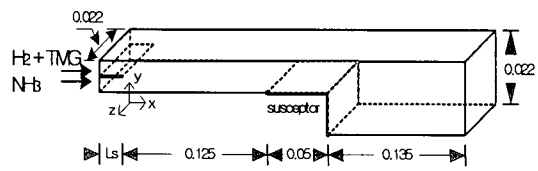


Fig. 1 Horizontal type MOCVD reactor

입된다. 사전 열분해 효과를 유지하도록 고안된 분리형 입구형상을 갖는 수평형 반응로의 형상이다. 또한 분리막이 없이 입구에서 충분한 혼합이 가능하도록 고안된 입구를 갖는 반응로의 결과를 비교 검토하였다. 반응기체의 유량은 수송가스인 수소 2.0slpm(standard liter per minutes), 암모니아 1.0slpm, TMG는 5sccm을 기준으로 그 영향을 검토하였다. 입구 수평 채널의 높이와 출구 수평채널의 높이는 각각 10mm와 22mm이고 총 반응로의 길이는 320mm이다. 반응로의 기준 압력은 250Torr, 반응이 일어나는 반응면의 온도는 1273K이다.

2.2 지배방정식

반응가스의 유동 특성을 파악하기 위하여 다음과 같은 정상상태 층류 유동에 대한 연속방정식, 운동량 및 에너지방정식을 적용하였다. 기체의 물질전달에 관한 i번째 화학종에 관한 대류 확산식으로부터 반응 기체의 국소 질량분률(local mass fraction)을 예측하였다.[10,11]

운동량방정식

$$\nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \mu(\nabla \bar{v}) + \rho \bar{g} \quad (1)$$

에너지방정식

$$\rho C_p(\bar{v} \cdot \nabla T) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (2)$$

화학종방정식

$$\bar{v} \cdot \nabla(\rho m_i) = -\nabla \cdot J_i \quad i = 1, \ldots, n-1, \quad (3)$$

여기에서 농도 기울기에 의한 확산 플럭스는

$$J_i = -\rho D_{i,m} \nabla m_i - D_i^T \frac{\nabla T}{T} \quad (4)$$

여기서 $D_{i,m} = \dfrac{1 - X_i}{\sum_{j, j \neq i} \dfrac{X_j}{D_{i,j}}}$

이며, 계산에 사용된 물성치는 기존에 발표된 문헌[9,10]에서 인용하였다.

2.3 경계조건

식 (1)~(4)의 해를 구하기 위한 경계조건은 실제 실험조건을 잘 모사할 수 있도록 하였으며, 다음과 같다.

입구: u_{in}, m_{H_2}, m_{TMG}, T_{in}등 입구조건; 지정된 값 (5)

출구: $\dfrac{\partial u}{\partial x} = \dfrac{\partial v}{\partial x} = \dfrac{\partial T}{\partial x} = \dfrac{\partial m}{\partial x} = 0$ (6)

고체벽면:

(반응면) T_w=1273K, m=0 (7)

(반응면을 제외한 벽면) T_w=300K

(또는 $-k_w(\dfrac{\partial T}{\partial x}) = h(T_w - T_\infty) + q_{rad,\infty}$),

$\dfrac{\partial m}{\partial x}$=0

식 (7)의 경계조건은 고온의 표면에 도달된 모든 반응물질은 도달 즉시 소멸된다는 조건으로부터 반응표면의 반응기체의 질량 분율 0을 반영한 것이다.[5,10] 비반응면의 열적조건은 일정한 온도를 기본으로 하고 다른 열적 조건과 비교하였다. 식 (1)~(4)의 해는 SIMPLE 알고리즘을 채택한 유한체적 프로그램인 FLUENT를 사용하여 구하였다.

화학 증착현상은 수많은 반응과 화학물질이 관련되어있다. 그러나 고온에서 반응하는 경우 질량전달이 증착에 지배적으로 작용한다는 것으로 알려져 있다. 따라서 TMG의 질량전달을 고려함으로서 반응면 위에 부착하는 GaN 박막의 증착율을 예측할 수 있으며, 몰 평형식으로부터 다음과 같은 식으로 계산된다.[4,5]

$$G = \frac{M_{GaN}}{M_{TMG}} \frac{\rho}{\rho_{GaN}} D_{TMG,m} \frac{\partial m_{TMG}}{\partial y} \quad (8)$$

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 수평형 CVD 반응로에 주입된 수소와 TMG 및 암모니아 가스의 혼합에 관한 수치계산을 수행하여 반응면 위에 부착하는 GaN의 증착율에 미치는 입구형상, 주입가스량 등의 영향을 조사하였다.

해석코드의 검증을 위하여 본 연구에 사용된 해석방법을 적용한 결과를 기존 연구의 계산 결과[2]와 비교하여 Fig. 2에 도시하였다. 분리막 직후(5cm<x<7cm) 유동 단면의 수소 몰분율 분포는 분할 판에 근접한 부근(x=5.5cm)에서 최대오차 12%를 나타내고 있으나, 대부분의 영역에서 기존의 결과와 잘 일치하고 있다.

Fig. 3은 이와 같은 방법으로 계산한 가스의 질량분율을 사용하여 증착율을 구하여 기존 연구자의 결과와 비교한 것이다. Theodoropoulos 등[9]은 원료가스가 2개의 축대칭 입구로부터 수직으로 공

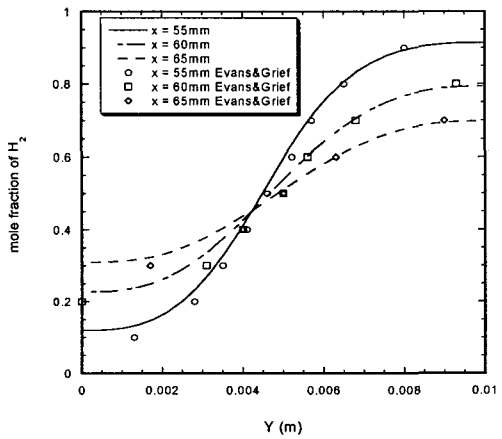


Fig. 2 Mole fraction of H_2 in a region immediately downstream of the splitter plate

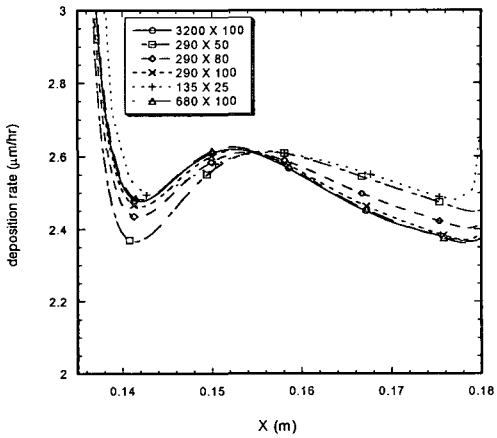


Fig. 4 Growth rate for various grids (H_2=3.0slpm, NH_3=1.0slpm, TMG=8.0sccm)

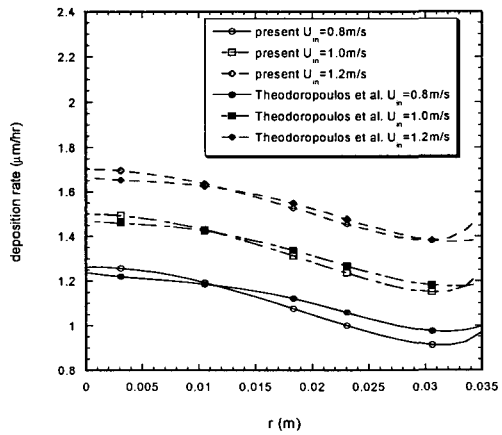


Fig. 3 Comparison of deposition rate of GaN for vertical MOVPE reactors for U_{out}=0.8m/s

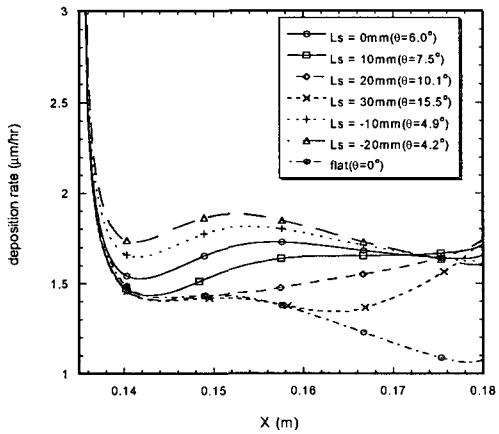


Fig. 5 The effect of upper wall inclination on the growth rate (H_2=3.0slpm, NH_3=1.0slpm, TMG=5.0sccm)

급되는 수직형 CVD 반응로를 사용하여 증착율에 미치는 내부입구 유동속도의 영향을 고찰한 바 있다. GaN 박막형성에 결정적인 역할을 하는 TMG가 중심에서 공급되기 때문에 그 증착율은 반응면의 중심에서 최대가 되며, 반경방향(r)을 따라 지속적으로 감소함으로서 균일한 두께의 박막을 형성하는데 어려움이 있음을 알 수 있다. 본 연구의 해석 방법을 사용한 결과와 비교할 때 8% 이내의 차이를 나타내고 있다. 이로부터 본 연구에서 사용한 해석 방법이 타당하며, 유사한 형태에 대하여 확장 응용하여 증착율을 계산할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 4는 적정 격자 분포를 결정하기 위하여 증착율에 미치는 격자계의 영향을 도시한 결과이다. 채널의 벽면, 특히 반응면 양단에 격자를 밀집시킨 불균일 격자계를 채택하였다. 유동방향과 수직방향의 격자수를 135 x 25로부터 3200 x 100까지 증가시키면서 구한 증착율을 비교하였다. 반응면 위의 증착율 분포는 유동방향 격자수보다 수직방향 격자수에 의해 예민하게 변화하였으며, 290 x 100개 이상의 격자계의 경우 격자수 증가에 비해 증착율 변화는 3.2%이내로서 수용할만한 수준이었다. 따라서 본 연구에서는 290 x 100 격자계를 채택하여 사용하였다.

Fig. 5는 증착율 분포에 미치는 채널 벽면 형상의 영향을 나타낸 것이다. 일반적으로 증착율은

반응면의 선단으로부터 유동의 진행 방향을 따라 감소하여 불균일한 두께를 갖는 증착이 이루어진다. 윗면이 수평인 경우 증착율은 반응면을 따라 급격하게 감소하며 반응면의 중심에 위치한 1인치 전·후에서 약 32% 증착율 감소를 나타내고 있다. 이 불균일 분포는 유동이 진행함에 따라 반응물이 희석되며, 특히 경계층 두께의 증가와 관련된 것으로 잘 알려져 있으며[2] 후류영역의 경계층 두께를 조절하기 위한 수단으로 반응면을 경사시키는 방법이 사용되고 있다. 본 연구에서는 공정상의 편리함을 위해 경사진 반응면을 사용하는 대신 채널의 윗벽면의 기울기 및 위치를 변화시켜 균일한 증착을 얻을 수 있도록 하였다. Ls는 경사가 시작하는 위치를 나타낸다. 경사진 벽면은 화학적인 확산에 의해 반응면에 도달되는 TMG의 양을 수직으로 이동시켜 증착율이 증가할 것이다. 반응면 바로 위에서 벽면의 경사가 시작되는 Ls=0을 기준으로 Ls=10mm는 하류방향으로 10mm이동한 곳으로부터 경사가 시작되며 Θ는 그 경사각을 나타낸다. Ls가 작을수록 단면축소에 의한 증착율 증가 및 균일성이 월등하게 향상되었으며, Ls=10mm일때 x=15.2cm 이후 거의 균일한 증착을 얻을 수 있음을 나타내고 있다. 그 이상의 급격한 경사도의 경우에는 반응면 후류영역에서 증착율이 증가하여 또 다른 불균일성이 나타난다.

MOCVD 반응로의 크기에 따라 다양한 입구 유량이 사용되며 이 유량은 반응로의 형상과 함께 증착율에 미치는 중요한 요인이 된다. Fig. 6은 GaN 증착을 위해 실험실 수준에서 사용되는 소규모 반응로에 대하여 수송가스로 사용되는 수소 질량의 영향을 나타낸 것이다. 암모니아 1.0slpm과 TMG 5.0sccm은 일정하게 유지하고 수소를 1.0slpm부터 5.0slpm까지 변화시켰다. 수소의 체적유량이 적을 경우에 증착율은 반응면을 따라 지속적으로 감소하며 수소의 양이 증가함에 따라 증착율에 지배적으로 작용하는 TMG의 질량분율이 감소함으로서 필름의 성장률은 저하됨을 알 수 있다. 수송가스량이 증가하여 5.0slpm가 되면 증착율은 대류에 의한 질량전달 및 채널 벽면의 경사진 효과에 의해 반응면을 따라 급격하게 증가함을 나타내고 있다. 중간 유량인 H_2=3.0slpm일 경우 반응면 대부분의 영역에서 균일한 증착두께를 유지하였다.

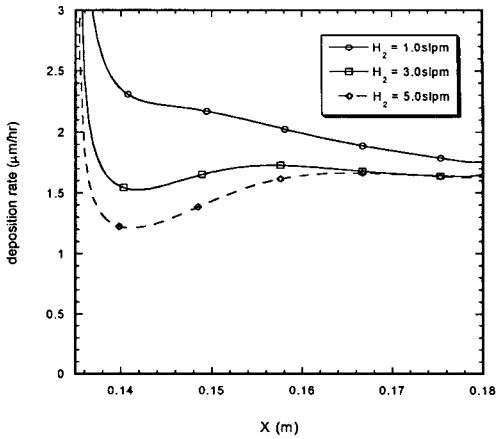


Fig. 6 The effect of volume flow rate of H_2 on the growth rate (NH_3=1.0slpm, TMG=5.0sccm)

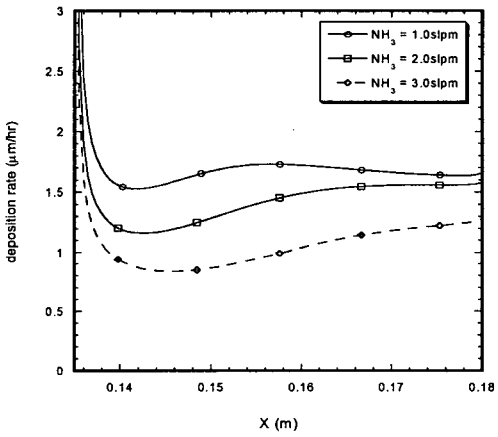


Fig. 7 The effect of volume flow rate of NH_3 on the growth rate (TMG=5.0sccm)

Fig. 7은 일정한 기체 유량(4.0slpm)에 대하여 암모니아 양이 GaN 성장률에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 암모니아의 증가에 따라 증착율의 감소 및 불균일성이 증가함을 알 수 있다. 암모니아의 증가에 의해 확산이 지연되는 이유는 동일한 체적유량의 공급에 대해 TMG와 암모니아의 확산에 의한 질량 전달(300K에서의 확산계수 0.08cm^2/s)이 TMG와 수소간의 확산에 의한 질량 전달(300K에서의 확산계수 0.40cm^2/s)보다 5배정도 늦기 때문으로 판단된다.

Fig. 8은 일정한 체적유량 (H_2=3.0slpm, NH_3=1.0 slpm)에 대하여 CVD 반응로내의 작용압력이 증착율에 미치는 영향을 도시한 것이다. 압력 760

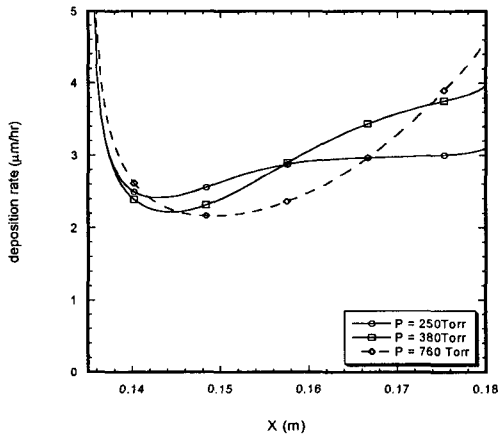
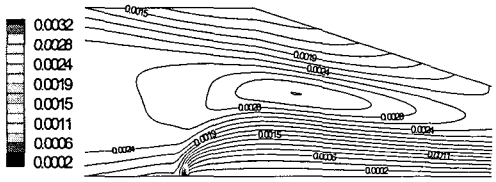
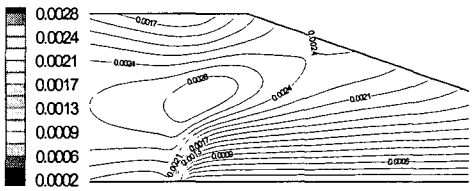


Fig. 8 The effect of operation pressure on the growth rate (H_2=3.0slpm, NH_3=1.0slpm, TMG=8.0sccm)



(a) P = 760 Torr



(b) P = 250 Torr

Fig. 9 Contour of mass fraction of TMG

Torr 의 경우 유동의 진행 방향으로 증착율이 급격하게 상승하여 증착이 불균일하게 되나, 반응로내의 압력이 낮아짐에 따라 상류영역 반응면의 증착은 증가하고 하류측 반응면에서는 급격하게 감소하여 균일한 분포를 나타내고 있다. 반응로 압력 250Torr에서 전체 반응면에서 비교적 균일한 증착이 이루어짐을 알 수 있다. 이러한 현상은 압력과 반비례하는 확산계수의 특징[10]에 기인되는 것으로 판단되며, 그 영향이 증착율에 지배

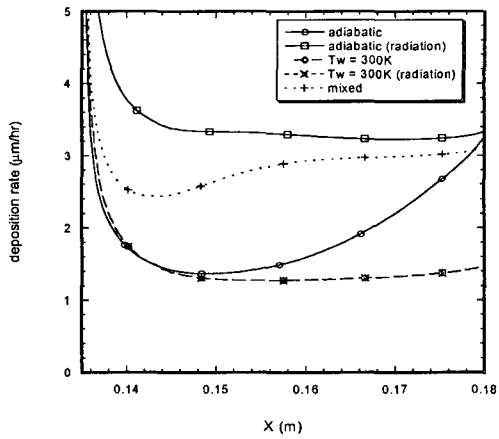


Fig. 10 The effect of thermal wall conditions on the growth rate (H_2=3.0slpm, NH_3=1.0slpm, TMG=8.0sccm)

적으로 작용하는 TMG 분포는 Fig. 9와 같이 나타난다.

작용압력이 760Torr일 때 TMG의 질량전달에는 대류의 영향이 지배적으로 작용하여 TMG의 주 전달방향은 Fig. 9(a)와 같이 유동방향과 같으며 단면이 축소된 유동 후류에서 질량분율의 극대가 형성된다. 따라서 Fig. 8의 증착율이 후류에서 급격하게 증가되는 것을 예측할 수 있다. 작용압력이 250Torr이면 압력의 감소에 따라 확산계수가 증가하여 Fig. 9(b)와 같이 주 유동방향과 수직으로 TMG의 질량전달이 증가하며, 질량분율의 극대위치가 상류영역으로 이동하여 균일성이 개선된다.

반응로 벽면의 적절한 열적 조건을 선택하기 위하여 Fig. 10에 도시한 바와 같이 5가지 경우의 조건을 검토하였다. 먼저 벽면을 냉각하여 일정한 온도(Tw=300K)를 유지할 경우 반응로 내부의 온도분포 또한 유동방향으로 균일하게 분포됨으로서 균일한 증착을 얻기에 용이한 조건이 되나, 증착율은 낮게 나타난다. 또한 등온인 벽면의 온도 조건에 대해서는 채널내의 복사의 영향은 무시할 수 있음을 알 수 있다. 벽면이 단열된 경우 유동 하류영역의 온도상승은 증착율의 급격한 증가를 야기하며 불균일한 증착이 이루어진다. 그러나 복사에 의해 채널 벽면 온도가 균일해짐으로서 증착율 또한 개선됨을 알 수 있다. 채널벽면으로부터 대류에 의한 냉각을 고려하기 위해 임의의 열전달계수 h=20W/m^{2}K를 사용하여 대류 열

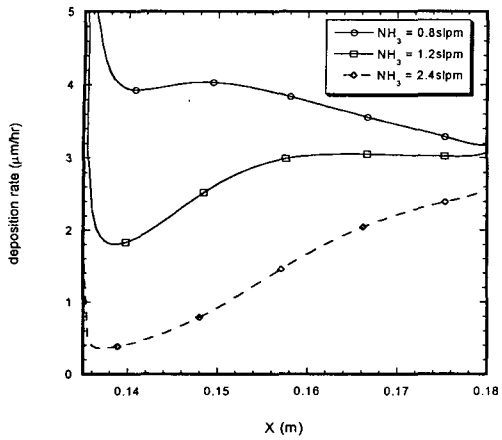


Fig. 11 The effect of volume flow rate of NH_3 on the growth rate for Lp=0.05m

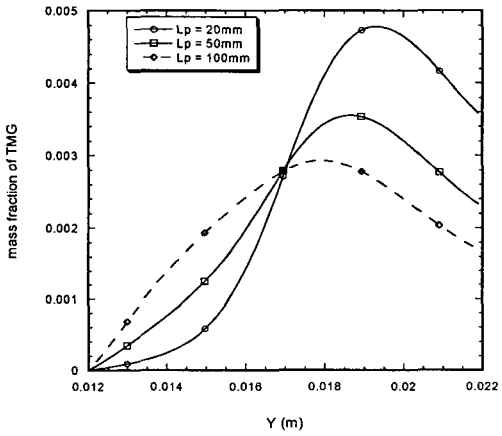


Fig. 12 Mass fraction of TMG at X=0.136m

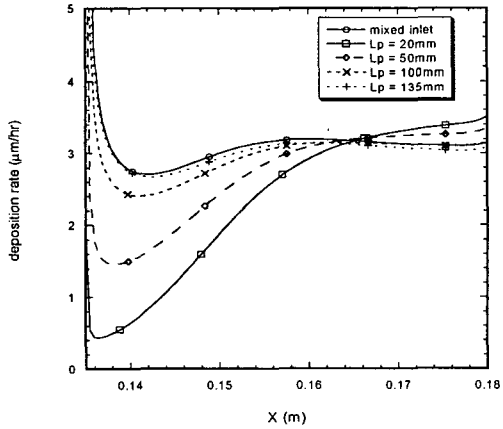


Fig. 13 The effect of splitter plate on the growth rate (H_2=3.0slpm, NH_3=1.0slpm, TMG=8.0sccm)

전달 및 복사열전달을 고려한 결과 비교적 균일한 증착을 구할 수 있었다. 이 혼합 조건이 실제로 사용될 수 있는 일반적인 경계조건으로 판단되며, 본 연구에서는 이 조건을 기본적인 열적 조건으로 사용하였다.

Fig. 11은 입구에 분리막이 있는 경우 암모니아의 양이 증착율에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 반응면 이전의 암모니아와 반응기체의 선행반응을 방지하기 위하여 분리막을 입구에 설치해 사용한 경우이다. 유입되는 수소와 TMG의 양을 고정(2.4slpm과 5.0sccm)하고 분리막의 아래로 공급되는 암모니아의 양을 조절하였다. 화학 반응물들의 주 전달방향은 대류에 의한 유동방향이나, 이 주 유동방향과 수직방향으로 농도 차이에 의한 확산이 추가된다. 암모니아의 체적유량이 비교적 많은 경우(NH_3=2.4slpm) 암모니아 층의 느린 확산에 의해 증착율은 감소된다. 또한 강제대류에 의한 혼합이 반응면의 후류에서 이루어짐으로서 불균일한 증착이 이루어진다. 암모니아의 체적유량이 감소함에 따라 TMG의 유동방향의 전달이 감소하고 수직방향의 확산이 용이하게 되어 증착율은 증가하며, NH_3=1.2slpm에서 비교적 균일한 증착이 이루어짐을 알 수 있다.

Fig. 12는 분리막으로부터 반응면까지 도달거리(L_p)가 TMG 분포에 미치는 영향을 도시한 것이다. 입구와 반응면의 거리가 가까운 경우에는 TMG와 암모니아의 혼합이 잘이루어지지 않게되나, 반응면과의 거리가 증가하여 L_p=100mm 이후에는 혼합이 양호하여 반응면에 도달되는 TMG 질량이 증가함을 알 수 있다. 이 질량분포의 변화는 반응면 위에 증착하는 질화갈륨의 성장에 직접적인 영향이 된다.

Fig. 13은 반응면 위에 부착되는 질화갈륨의 증착율에 미치는 분리막 거리의 영향을 도시한 것이다. 반응로의 상층에 위치한 III족 반응물은 반응표면에 도달하기 위해 상대적으로 긴 확산 길이를 갖고 있으며 또한 하부에 위치한 짙은 농도의 암모니아 층을 통과하여 확산되어야 한다. 따라서 입구와 반응면의 거리가 가까운 경우에는 반응면 상류에서 증착율은 매우 적으며, 유동이 하류로 이동함에 따라 반응물의 혼합이 잘 이루어짐으로서 성장률이 증가함을 나타내고 있다. 입구와 반응면과의 거리가 증가함에 따라 반응면 상류영역에서 증착율은 예민하게 증가하고 하류

영역에서는 완만하게 감소함으로서 L_p=100mm 이후에는 비교적 균일한 증착이 이루어짐을 알 수 있다.

4. 결 론

표면반응이 순간적으로 이루어지는 질화갈륨의 증착율에 미치는 반응로 및 입구의 형상, 작동조건 등의 영향은 다음과 같이 요약될 수 있다.

수송가스의 체적유량이 적을 경우 반응가스의 질량전달은 유동 진행 방향을 따라 감소하여 불균일한 두께를 갖는 증착이 이루어진다. 수송가스량의 증가 및 채널 벽면을 경사시킴으로서 균일한 증착이 가능함을 알 수 있었다. 특히 벽면의 경사는 반응기체들의 충분한 혼합 및 반응면과의 접촉을 용이하게 함으로서 증착율 및 균일성 향상에 양호한 수단이 된다.

일정한 기체 유량에 대하여 암모니아 양의 증가는 증착율의 감소 및 균일성이 저하된다. 작용압력의 감소에 의해 기체의 혼합 및 균일성이 개선되었으며, 일정한 온도로 냉각되는 벽면조건에서 최적의 증착율의 균일성을 얻을 수 있으나, 증착율은 낮게 나타난다.

입구와 반응면의 거리가 짧은 반응로에서는 상류영역의 낮은 증착율에 의해 불균일한 증착이 심하게 나타났으며, 거리가 증가함에 따라 균일성이 개선되어 L_p=100mm 이후에는 비교적 균일한 증착이 이루어졌다.

후 기

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2003-002-D00052).

참고문헌

(1) Jensen, K. F., Einset, E. O. and Fortiadis, D. I., 1991, "Flow Phenomena in Chemical Vapor Deposition of Thin Films," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 23, pp. 197~232.

(2) Evans, G. and Grief, R. 2001, "Characterization of Energy Transport by Mass Diffusion Including an Application to Elliptic Channel Flow," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 753~761.

(3) Eversteyn, F. C., Severin, P. J. W., Brekel, C. H. J. and Peek, H. L., 1970, "A Stagnant Layer Model for the Epitaxial Growth of Silicon from Silane in a Horizontal Reactor," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 117, No. 7, pp. 925~931.

(4) Chiu, W. K. S. and Jaluria, Y., 1997, "Heat Transfer in Horizontal and Vertical CVD Reactor," HTD-VOl. 347, *ASME National Heat Transfer Conference,* Vol. 9, pp. 293~311.

(5) Cho, W. K., Choi, D. H. and Kim, M. W., 1998, "Optimization of Inlet Concentration for Uniform Film Growth in a Cylindrical CVD Chamber," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 22, No. 2, pp. 173~183.

(6) Cho, W. K. and Choi, D. H., 2000, "Optimization of a Horizontal MOCVD Reactor for Uniform Epitaxial Layer Growth," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 43, Issue 10, pp. 1851~1858.

(7) Chiu, W. K. S. and Jaluria, Y., 1998, "Heat and Mass Transfer in Continuous CVD Reactors," *Proc. of 11th IHTC*, Vol. 5, pp. 187~192.

(8) Hardtdegen Hilde, Kaluza Andreas, Gauer D., Ahe, M.v.d, Grimm M., Kaufmann, P. and Kandinsky, L., 2001, "On the Influence of Gas Inlet Configuration with Respect to Homogeneity in a Horizontal Single Wafer MOVPE Reactor," *J. of Crystal Growth*, Vol. 223, pp. 15~20.

(9) Theodoropoulos, C., Mountziaris, T. J., Moffat, H. K. and Han, J., 2000, "Design of Gas Inlets for the Growth of Gallium Nitride by Metal-organic Vapor Phase Epitaxy," *J. of Crystal Growth*, Vol. 17, pp. 65~81.

(10) Mahajan, R. L., 1996, "Transport Phenomena in Chemical Vapor Deposition Systems," *Advances in Heat Transfer,* Vol. 28, pp. 339~415.

(11) Fluent Inc., Fluent User's Guide, 1998.