

논문 16-7-4

## Si-Ge-H-Cl 계를 이용한 자기정렬 HBT용 Si 및 SiGe의 선택적 에피성장

### Selective Epitaxial Growth of Si and SiGe using Si-Ge-H-Cl System for Self-Aligned HBT Applications

김상훈\*, 박찬우, 이승윤, 심규환, 강진영

(Sang-Hoon Kim\*, Chan-Woo Park, Seung-Yun Lee, Kyu-Hwan Shim, and Jin-Young Kang)

#### Abstract

Low temperature selective epitaxial growth of Si and SiGe has been obtained using an industrial single wafer chemical vapor deposition module operating at reduced pressure. Epitaxial Si and heteroepitaxial SiGe deposition with Ge content about 20 % has been studied as extrinsic base for self-aligned heterojunction bipolar transistors(HBTs), which helps to reduce the parasitic resistance to obtain higher maximum oscillation frequencies( $f_{max}$ ). The dependence of Si and SiGe deposition rates on exposed windows and their evolution with the addition of HCl to the gas mixture are investigated.  $SiH_2Cl_2$  was used as the source of Si SEG(Selective Epitaxial Growth) and  $GeH_4$  was added to grow SiGe SEG. The addition of HCl into the gas mixture allows increasing an incubation time even low growth temperature of 675~725 °C. In addition, the selectivity is enhanced for the SiGe alloy and it was proposed that the incubation time for the polycrystalline deposit on the oxide is increased probably due to GeO formation. On the other hand, when only SiGe SEG(Selective Epitaxial Growth) layer is used for extrinsic base, it shows a higher sheet resistance with Ti-silicide because of Ge segregation to the interface, but in case of Si or Si/SiGe SEG layer, the sheet resistance is decreased up to 70 %.

**Key Words** : SEG, Si, SiGe, extrinsic base, incubation time, RPCVD

#### 1. 서론

데이터 전송이 10 Gb/s 이상인 광통신 시스템이나 무선 LAN 등에 적용 가능한 초고속소자를 제작하기 위해 실리콘-게르마늄을 이용한 이중접합 트랜지스터(SiGe HBT)에 대한 연구가 활발히 진행 되어왔다. 이중접합 트랜지스터는 크게 자기정렬구조와 비 자기정렬구조로 구별되는데 비 자기

정렬구조의 경우 소자에 대한 열적 부담과 기생 정전용량을 조절하는데 어려움이 있다. 또한 트랜지스터의 특성을 향상시키기 위해 소자의 집적도와 베이스의 저항성분을 줄이기 위한 방안들이 제시되었는데 선택적 실리콘 및 실리콘-게르마늄을 저온에서 성장시키는 것이 이러한 문제를 해결하는 핵심이 되고 있다. 그림 1은 채널 층을 형성한 후 선택적으로 실리콘이나 실리콘-게르마늄 막을 증착하여 외부베이스의 저항을 감소시키기 위한 방안으로 본 연구진에서 제시한 공정 개략도이다.

SEG의 기본 원리를 보면 실리콘 위에서의 성장은 2 차원적인 성장으로서 실리콘 원자가 실리콘 표면의 kink나 step에 결합하거나 혹은 adatom

\* : 한국전자통신연구원 무선통신소자연구부 SiGe 소자팀  
(305-350 대전시 유성구 가정동 161번지,  
Fax : 042-860-6183

Corresponding Author : krotc33@etri.re.kr  
2003년 2월 4일 접수, 2003년 3월 8일 1차 심사완료  
2003년 3월 19일 최종 심사완료

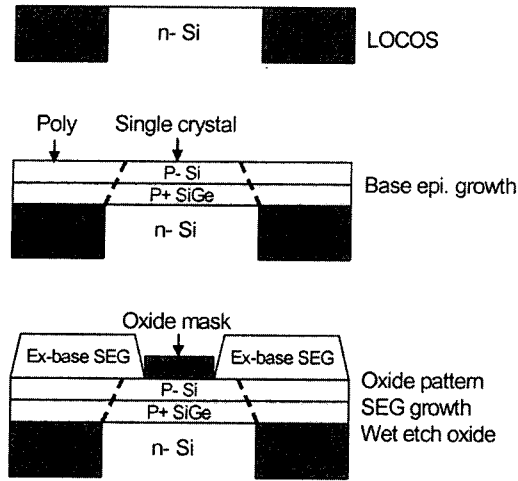
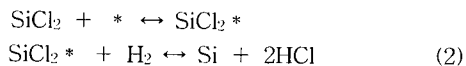
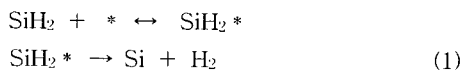


그림 1. 선택적 외부 베이스 증착의 공정 개략도.  
 Fig. 1. Schematic cross-section of a selective extrinsic base growth for HBT.

으로 흡착되어 성장이 일어나게 된다. 반면 비정질 위에서는 3 차원적인 성장으로 핵 생성과 성장의 과정을 겪게 되고, 핵 생성 시까지 일정한 시간이 걸리므로 이 시간 동안에는 선택적으로 실리콘 위에서만 성장이 일어나는 것이다. 이러한 시간을 잠입시간(incubation time)이라고 하며 주로 증착 온도나 증착 압력 등의 성장 조건에 따라서 잠입시간은 달라진다. 또한 게르마늄의 격자상수는 실리콘과 비슷하여 결정성을 유지하면서 실리콘과 적당한 비율로 혼합하는 것이 가능하다. 따라서 실리콘과 게르마늄을 혼합한 실리콘-게르마늄도 실리콘과 비슷한 양상으로 선택적 단결정 성장이 가능하다.

실리콘 소스 가스로는 저온에서는 주로  $\text{SiH}_4$  나  $\text{Si}_2\text{H}_6$  를 그리고 고온에서는  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$  를 사용하는 데 선택성을 높이기 위하여 HCl 과  $\text{Cl}_2$  가스를 첨가하기도 한다. J. Bloem[1] 이나 E. C. Stassimos[2] 등에 의해 실리콘 반응에 대한 연구가 많이 수행되었는데 소스 가스의 종류에 상관없이  $\text{H}_2$  와 HCl 이 유입된 반응의 경우 동일한 성장 기구를 나타낸다고 알려져 있다.



위의 식을 통해 알 수 있듯이 실리콘의 흡착과 표면 반응은  $\text{SiH}_2$  와  $\text{SiCl}_2$  에 의해 이루어지며 (2)식의 역반응을 통해서 산화막 위에서 결정핵으로 성장하기 위해 격자 자리에 흡착된 실리콘 원자의 식각 반응이 동시에 진행된다. 이러한 과정을 통해 비정질인 산화막에서의 핵 생성을 억제하여 잠입시간을 연장시키기도 하지만 SEG 박막의 전체적인 성장속도를 낮추므로 소스 가스와 HCl 가스의 비율이 중요하다. \* 는 격자 자리를 나타낸다.

## 2. 실험

본 실험의 목적은 실리콘 및 실리콘-게르마늄 막을  $700^\circ\text{C}$  부근의 저온에서 선택적으로 성장시켜 HBT 소자의 외부베이스에 적용하기 위한 것으로 베이스 증착 후에 SEG 가 진행되므로 열적 안정화를 위해 RCA 및 HF dipping 의 ex-situ cleaning 만 실시하였고 반응로 내에서의 수소 열처리 공정[3]은 실시하지 않았다.

본 실험에 사용된 장비는 미국 ASM 사의 Epsilon One-AP/PCVD 로 크게 load-lock 과 반응로로 구성되었으며 반응로는 타원형의 단면 형태를 하고 있다. 반응로에는 실리콘-카바이드가 코팅된 그라파이트 기판이 중앙에 위치해 있으며 이는 웨이퍼 상에서 고른 증착 속도를 얻기 위해 임의의 속도로 회전을 한다. 가열 방식은 반응로의 위아래에 격자 식으로 위치한 텅스텐-할로겐 램프에 의한 복사열을 이용하여 웨이퍼와 기판을 가열하며 기판의 아래에 위치한 네 개의 thermocouple 을 통해 웨이퍼의 온도를 간접적으로 측정한다.

증착 압력은 상압과 감압 모두 사용 가능하며 전체 실험에서 증착 조건을 통일하고 로딩 효과를 최소화[4] 하기 위해 반응로 내의 증착 압력은 40 torr 로 고정하였다. 소스가스로는  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$  와 수소에 1.5 %로 희석된  $\text{GeH}_4$  을 주입하였으며 반응 캐리어 가스로는  $\text{H}_2$  가스를 20 slm 유량으로 고정하여 사용하였다. 선택성을 향상시키기 위해 주입되는 HCl 은 반응식 (2)에서 나타난 것처럼  $\text{SiCl}_4$  를 형성하여 산화막 위에 생성된 결정핵 뿐만 아니라 실리콘 단결정 막도 동시에 식각하므로 HCl 의 유량과 시간을 적절히 조절하였다. 수소가스에 1000 ppm의 농도로 희석된  $\text{B}_2\text{H}_6$  를 도펀트로 첨가하여 실리콘-게르마늄의 선택적 단결정 성장에 미치는 영향에 대해서도 알아보았다.

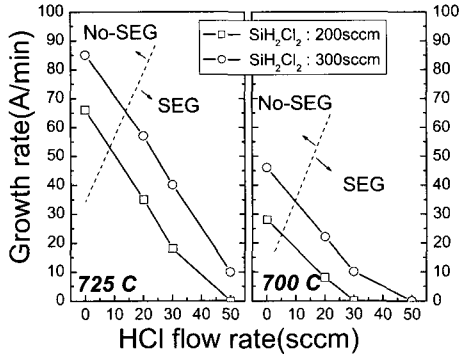


그림 2. 증착 온도 725 °C와 700 °C에서의 HCl 유량에 따른 실리콘 막의 증착 속도 및 선택성.

Fig. 2. Si growth rate and selectivity as a function of HCl flow rate deposited at 725 °C and 700 °C.

실험에 사용된 시편은 P-type 의 <100> 방향을 가지는 웨이퍼에 열 산화막이 6000 Å의 두께로 LOCOS 패터닝 된 것으로 SEM 과 TEM 관찰을 통해 선택적으로 증착된 단결정 박막의 형상 및 증착 속도를 관찰하였다. 또한 SIMS(secondary ion mass spectrometer) 장비를 이용하여 게르마늄의 함량과 보론의 농도에 대해 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 실리콘의 선택적 에피 성장

증착 온도별로 주입되는 SiH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> 및 HCl 가스의 유량에 따른 증착 속도와 선택성 여부를 그림 2에 나타내었다. 증착 온도는 675 °C, 700 °C 그리고 725 °C에서 각각 HCl의 유량을 0~50 sccm, SiH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> 유량을 200, 300 sccm 으로 변화를 주어 실험을 진행하였다. 그림 2에서 보듯이 725 °C와 700 °C에서는 HCl 의 유량이 증가함에 따라 실리콘막의 증착 속도가 감소하였는데 이는 첨가된 HCl 에 의한 식각 반응이 동시에 진행되기 때문이다. 반면 675 °C에서는 HCl 과 SiH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> 의 유량에 변화를 주어도 실리콘 기판이나 산화막 위에 전혀 성장이 이루어지지 않았는데, 소스 가스로 사용된 SiH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> 가스는 주로 고온 공정에서 사용되는 것으로 자체적으로 Cl기를 가지고 있어 선택성이 우수한 반면 저온에서는 열분해가 잘 일어나지 않고

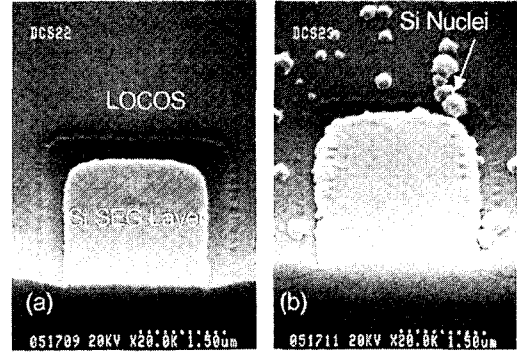


그림 3. 725 °C, 40 torr 에서 SiH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> 300 sccm, HCl (a) 20 sccm, (b) 0 sccm 첨가하여 증착한 시편의 SEM 사진.

Fig. 3. SEM micrographs of Si SEG layer deposited at 725 °C, 40 torr using SiH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> 300 sccm adding (a) 20 sccm of HCl or (b) no addition of HCl.

HCl 의 첨가로 인한 식각 반응이 실리콘 막의 성장을 방해하기 때문인 것으로 생각되어진다.

그림 3은 725 °C, 40 torr 에서 SiH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> 를 300 sccm 주입하고 HCl 가스의 첨가 유무에 따른 SEM 분석사진이다. 그림에서 20 sccm의 HCl 을 주입한 경우에는 선택성이 유지되어 선택적 실리콘 성장이 이루어진 반면 HCl 을 주입하지 않은 경우에는 산화막 위에 실리콘의 결정핵들이 성장해 있다. 700 °C와 725 °C에서 모두 HCl 을 주입하지 않은 경우에는 증착 속도나 온도에 상관없이 선택성이 유지되지 않았다. 이로써 주로 고온공정에서 선택성을 유지하기 위해 주입되는 HCl 가스가 700 °C 부근의 저온에서도 선택성을 확보하기 위해 필요하다는 것이 확인되었다.

#### 3.2 실리콘-게르마늄 막의 선택적 에피 성장

실리콘-게르마늄의 성장은 일반적으로 저온에서는 실리콘보다 빠른 성장 속도를 나타낸다. 그 이유는 게르마늄의 열분해 온도가 더욱 낮고 수소 원자의 탈착율이 증가하기 때문이다. 또한 선택성도 실리콘에 비해 우수한 것으로 보고되어지는데 이는 GeO 의 생성으로 인해 산화막 위에서의 안정한 핵 생성이 지연되어 잠입시간이 길어진다고 알려져 있다[5].

그림 4는 증착 온도 별로 주입되는 가스의 유량

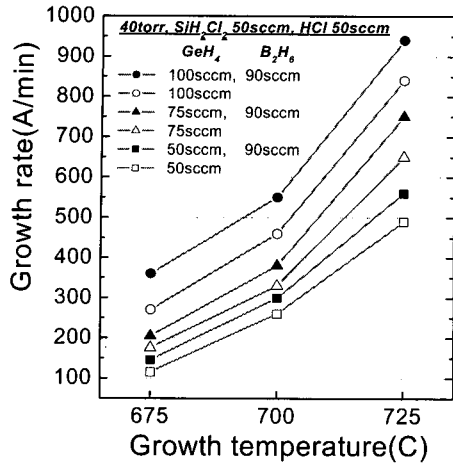


그림 4. 각각의 증착 온도별 GeH<sub>4</sub> 와 B<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 유량에 따른 실리콘-게르마늄 막의 증착 속도 변화.

Fig. 4. Variation in SiGe growth rate as a function of GeH<sub>4</sub> and B<sub>2</sub>H<sub>6</sub> flow rate.

에 따른 증착 속도를 나타내는 것으로 실리콘에서와 달리 675 °C에서도 증착이 진행되었으며 모든 조건에서 선택성이 유지되었다. 각 조건별 잠입시간은 상이할 것이나 대체적으로 선택적 실리콘-게르마늄 박막의 두께가 5000 Å 이상에서부터 산화막 위에 결정핵이 관찰되어진다. 또한 동일한 공정 조건에서 도펀트인 B<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 을 90 sccm의 유량으로 첨가한 경우에는 증착 온도와 GeH<sub>4</sub> 의 유량에 상관없이 10~20 %정도 증착 속도가 증가하는 경향을 보인다. 이는 700 °C이하의 저온에서 보론의 첨가가 실리콘-게르마늄 단결정 막의 성장속도에 영향을 주지 않는다는 Curtis Tsai[6]등의 보고와는 다른 결과를 보이는 것이다. 하지만 위의 결과는

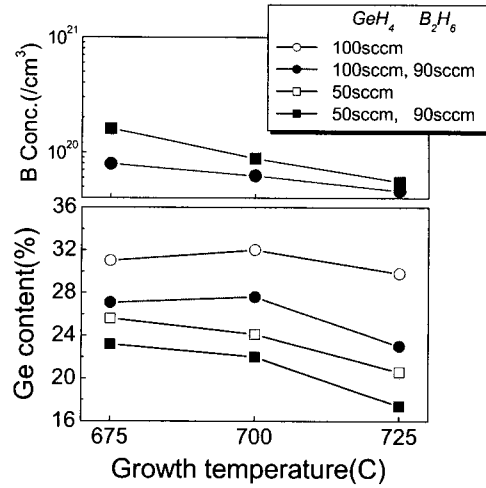


그림 5. 증착 온도에 따른 보론의 농도 및 게르마늄 함량 변화.

Fig. 5. Variation in B incorporation in SiGe and content of Ge as a function of growth temperature.

증착 속도를 관찰하기 위해 수분간 임계두께 이상으로 증착을 하여 얻은 결과로 고농도의 보론 첨가가 실리콘-게르마늄 막의 응력 완화 현상을 유도하여 성장속도에 영향을 주었을 것으로 생각된다.

그림 5는 증착 온도에 따른 보론의 농도와 게르마늄의 함량 변화를 나타낸 것이다. 보론의 농도는 증착 온도의 증가에 따라 감소하는 경향을 보인다. 또한 동일한 GeH<sub>4</sub> 의 유량에서도 보론을 첨가한 경우에는 첨가하지 않은 경우에 비해 게르마늄의 함량이 다소 감소한 것을 확인하였다.

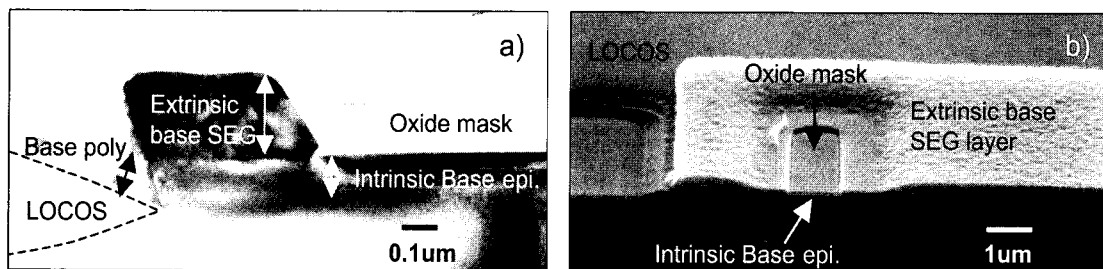


그림 6. 선택적 외부베이스 증착을 HBT 소자에 적용한 TEM (a) 및 SEM (b) 사진.

Fig. 6. X-TEM (a) and SEM (b) images of extrinsic base SEG layer for self-aligned HBTs.

### 3.3 외부베이스 저항

실리콘-게르마늄을 베이스로 이용하는 자기정렬 트랜지스터의 구조는 여러 가지로 많이 연구되었는데 RF 특성을 대표하는 값인  $f_T$  를 높이기 위해 베이스의 두께가 점차 감소하는 추세이다. 이에 따라 베이스의 저항성분이 증가하게 되고 이는  $f_{max}$  를 감소시키는 역할을 하게 된다. 이를 보완하기 위해 주로 실리사이드를 형성하나 외부베이스의 두께가 충분하지 않아 실리사이드 형성 시 들고일어나는 현상 등의 문제를 보인다. 따라서 실리사이드가 형성되는 외부베이스 영역에만 선택적으로 실리콘이나 실리콘-게르마늄 막을 증착하여 실리사이드 공정을 위한 충분한 두께를 확보하는 것은 외부베이스의 저항을 낮춰  $f_{max}$  의 감소를 막기 위한 한 방법이 될 것이다. 이를 그림 6에 나타내었다. LPCVD 법을 이용한 저온 산화막으로 내부 베이스 위에 마스크를 형성한 후 선택적으로 실리콘-게르마늄과 실리콘 막을 각각 1000 Å 두께로 증착한 후의 TEM 과 SEM 분석 사진으로 선택성을 유지하면서 외부 베이스가 증착된 것을 확인할 수 있다. 단결정의 베이스 위로 증착된 외부 베이스에서 결합이 관찰되나 이는 20 % 이상의 게르마늄 함량을 가지는 실리콘-게르마늄 막의 임계두께(~500 Å) 이상으로 증착되었기 때문이다.

본 실험에서 제시한 선택적 실리콘 및 실리콘-게르마늄 막의 성장법을 외부베이스로의 적용가능 여부를 확인하기 위해 1000 Å 두께의 열 산화막 위에 실리콘-게르마늄 베이스를 다결정으로 성장시킨 후 저항을 측정할 수 있도록 막대모양으로 패터 하였다. 상기의 실험 결과를 통해 700 °C에서 도핑하지 않은 실리콘 및 실리콘-게르마늄 막을 표 1에서와 같이 선택적으로 베이스 위에 증착한 후 Ti 실리사이드 공정을 거쳐 저항 값을 측정하였다. 표 1에서 보는 바와 같이 외부베이스의 선택적 성장에 의해 저항 값이 70 %정도 감소한 것을 알 수 있었다. 하지만 실리콘-게르마늄 층만 선택적으로 증착하였을 경우는 실리사이드가 형성되는 과정에서 게르마늄이 표면에 석출하는 현상 등에 의해 실리사이드가 제대로 형성되지 않아 오히려 저항 값이 증가한 것을 확인하였다.

### 4. 결론

상업적 적용이 가능한 RPCVD 내에서 HCl 을 첨가하여 선택성을 향상시킴으로써 675~725 °C의

표 1. 선택적 실리콘 및 실리콘-게르마늄 증착에 따른 외부베이스 저항 측정 결과.

Table 1. The results of sheet resistance for SEG layer introduced in extrinsic base.

Extrinsic base	SiGe SEG	Si SEG	Rs( $\Omega$ /sq.)
1200 Å	-	-	25.4
1200 Å	-	500 Å	7.4
1200 Å	-	1000 Å	7.1
1200 Å	500 Å	500 Å	8.2
1200 Å	1000 Å	-	34.2

저온에서도 실리콘 및 실리콘-게르마늄의 선택적 단결정 성장이 가능하였다. 실리콘의 선택적 성장은 700 °C 이상에서만 HCl 을 첨가하였을 경우 60 Å/min 이하의 증착 속도를 나타내었으나 실리콘-게르마늄 막은 실리콘에 비해 낮은 열분해 온도와 산화막 위에서 GeO 를 형성하여 잠입시간을 지연시키는 효과로 인해 675 °C에서도 선택성을 유지하면서도 실리콘에 비해 10배 이상 빠른 증착 속도를 보였다. 도펀트인 보론의 첨가는 게르마늄의 함량을 감소시키나 증착 속도를 증가시켰으며 선택적으로 외부베이스를 증착한 후 실리사이드를 형성한 경우 70 %정도 저항 값이 감소하여 자기정렬 구조의 이중접합 트랜지스터 제조 시 적용하면 소자특성의 향상이 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 정보통신부의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

### 참고 문헌

- [1] J. Bloem and W. P. A. Claassen, "Rate determining reactions and surface species in CVD of silicon : I. The SiH<sub>4</sub>-HCl-H<sub>2</sub> system", J. Cryst. Growth, Vol. 49, p. 435, 1980.
- [2] E. C. Stassimos, T. J. Anderson, and H. H. Lee, "A mechanism and kinetics of silicon growth", J. Cryst. Growth, Vol. 73, p. 21, 1985.
- [3] 이 경수, "저온 Si계 에피 성장기술에서 실험

계획법에 의한 in-situ H<sub>2</sub> bake 및 GeH<sub>4</sub> clean 공정 최적화”, 한국전기전자재료학회 1994 추계학술대회논문집, p. 54, 1994.

- [4] T. I. Kamin, "Pattern sensitivity of selective Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> chemical vapor deposition: Pressure dependence", J. Appl. Phys., Vol. 74, No. 9, p. 5799, 1993.
- [5] M. Racanelli and D. W. Greve, "Low temperature selective epitaxy by ultra high vacuum chemical vapor deposition from SiH<sub>4</sub> and GeH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>", Appl. Phys. Lett., Vol. 58, No. 19, p. 2096, 1991.
- [6] C. Tsai, S. M. Jang, and R. Rief, "Growth and characterization of undoped and in situ doped Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> on patterned oxide Si substrates by very low pressure chemical vapor deposition at 700°C and 625°C", J. Appl. Phys., Vol. 69, No. 12, p. 8158, 1991.