

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

김상훈, 심규환, 강진영

한국전자통신연구원 반도체원천연구소 무선통신소자연구부 SiGe소자연구팀

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

Sang-Hoon Kim, Kyu-Hwan Shim, Jin-Young Kang

SiGe Device Team, Wireless Communication Devices Department, Basic Research Lab., ETRI

### Abstract

자기정렬구조의 실리콘-게르마늄 이중접합 트랜지스터에서  $f_{max}$ 를 높이기 위한 방안으로 베이스의 저항 값을 감소시키고자 외부 베이스에 실리콘 및 실리콘-게르마늄 박막을 저온에서 선택적으로 성장할 수 있는 방법을 연구하였다. RPCVD를 이용하여  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$ 과  $\text{GeH}_4$ 를 소스 가스로 하고 HCl을 첨가하여 선택성을 향상시킴으로써 675~725°C의 저온에서도 실리콘 및 실리콘-게르마늄의 선택적 에피성장이 가능하였다. 고온 공정에 주로 이용되는  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$ 를 이용한 실리콘 증착은 675°C에서 열분해가 잘 이루어지지 않고 HCl의 첨가에 의한 식각반응이 동시에 진행되어 실리콘 기판에서도 증착이 진행되지 않으나 700°C 이상에서는 HCl을 첨가한 경우에 한해서 선택성이 유지되면서 실리콘의 성장이 이루어졌다. 반면 실리콘-게르마늄막은 실리콘에 비해 열분해 온도가 낮고 GeO를 형성하여 잠입시간을 지연하는 효과가 있는 게르마늄의 특성으로 인해 선택성이나 증착속도 모두에서 유리하였으나 실리사이드 공정시에 표면으로 게르마늄이 석출되는 현상 등의 저항성분이 크게 작용하여 실리콘-게르마늄막 만으로는 외부 베이스에의 적용은 적절하지 않았다. 그러나 실리콘막을 실리콘-게르마늄막 위에 Cap 층으로 증착하거나 실리콘막 만으로 외부 베이스에 선택적으로 증착하여 베이스의 저항을 70% 가량 감소시킬 수 있었다.

**Key Word** : 실리콘-게르마늄, 외부 베이스, 자기정렬구조, 선택성, 잠입시간

### 1. 서 론

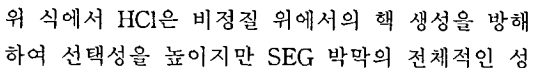
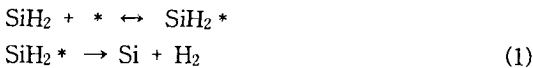
데이터 전송이 10Gb/s 이상인 광통신 시스템이나 무선 LAN 등에 적용 가능한 초고속소자를 제작하기 위해 실리콘-게르마늄을 이용한 이중접합 트랜지스터(SiGe HBT)에 대한 연구가 활발히 진행 되어왔다. 이중접합 트랜지스터는 크게 자기정렬구조와 비 자기정렬구조로 구별되는데 비 자기정렬구조의 경우 소자에 대한 열적 부담과 기생 정전용량을 조절하는데 어려움이 있다. 또한 트랜지스터의 특성을 향상시키기 위해 소자의 집적도와 베이스의 저항성분을 줄이기 위한 방안들이 제시되었는데 선택적 실리콘 및 실리콘-게르마늄을

저온에서 성장시키는 것이 이러한 문제를 해결하는 핵심이 되고 있다.

SEG의 기본 원리를 보면 실리콘 위에서의 성장은 2 차원적인 성장으로서 실리콘 원자가 실리콘 표면의 kink나 step에 결합하거나 혹은 adatom으로 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 증착온도나 증착압력등의 성장 조건에 따라서 잠입시간은 달라진다. 또한 게르마늄의 격자상수는 실리콘

과 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 사용하는데 선택성을 높이기 위하여  $\text{HCl}$ 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  $\text{HCl}$ 이 유입된 반응의 경우 동일한 성장 기구를 나타낸다고 알려져 있다. 아래의 식과 같이 실리콘의 흡착과 표면 반응은  $\text{SiH}_2$ 와  $\text{SiCl}_2$ 에 의해 이루어지며 (2)식의 역반응을 통해서 결정핵으로 성장하기 위해 격자 자리에 흡착된 실리콘 원자의 식각반응이 동시에 진행된다. 이러한 과정을 통해 비정질인 산화막에서의 핵 생성을 억제하여 잠입시간을 연장시킬 수 있다. \*는 격자 자리를 나타낸다.



$\text{SiCl}_2^* + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{Si} + 2\text{HCl}$   
 위 식에서  $\text{HCl}$ 은 비정질 위에서의 핵 생성을 방해하여 선택성을 높이지만 SEG 박막의 전체적인 성장속도를 낮추므로 소스 가스와의 비율이 중요하다. 기본적으로 SEG 기술을 통해 양질의 에피택시 박막을 얻기 위해서는 전체적인 소스 가스 및 캐리어 가스, 기판 표면 그리고 챔버 내에서  $\text{O}_2$ 나  $\text{H}_2\text{O}$ 의 분압을 최소화해야 한다.

## 2. 실험

본 실험의 목적은 실리콘 및 실리콘-게르마늄막을  $700^\circ\text{C}$  부근의 저온에서 선택적으로 성장시켜 HBT 소자의 외부베이스에 적용하기 위한 것으로 베이스 증착후에 SEG가 진행되므로 열적 안정화를 위해 RCA ex-situ cleaning만 실시하였고 반응로 내에서의 수소 열처리 공정은 실시하지 않았다. 본 실험에 사용된 장비는 미국 ASM 사의 Epsilon One-AP/RPCVD로 크게 load-lock과 반응로로 구성되어 있으며 반응로는 타원형의 단면 형태를 하고 있다. 반응로에는 실리콘-카바이드가 코팅된 그라파이트 기판이 중앙에 위치해 있으며 이는 웨이퍼

상에서 고른 증착속도를 얻기 위해 임의의 속도로 회전을 한다. 가열 방식은 반응로의 위아래에 격자식으로 위치한 텅스텐-할로젠 램프에 의한 복사열을 이용하여 웨이퍼와 기판을 가열하며 기판의 아래에 위치한 네 개의 thermocouple을 통해 웨이퍼의 온도를 간접적으로 측정한다.

증착압력은 상압과 감압 모두 사용 가능하며 전체 실험에서 증착조건을 통일하고 로딩 효과를 최소화[3] 하기 위해 반응로 내의 증착압력은 40torr로 고정하였다. 소스가스로는  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$ 와 수소에 1.5% 희석된  $\text{GeH}_4$ 을 주입하였으며 반응 캐리어 가스로는  $\text{H}_2$  가스를 20slm 유량으로 고정하여 사용하였다. 선택성을 향상시키기 위해 주입되는  $\text{HCl}$ 은 반응식(2)에서 나타낸 것처럼  $\text{SiCl}_4$ 를 형성하여 산화막위에 생성된 결정핵뿐만 아니라 실리콘 단결정막도 동시에 식각하므로  $\text{HCl}$ 의 유량과 시간을 적절히 조절하였다. 수소가스에 1000ppm의 농도로 희석된  $\text{B}_2\text{H}_6$ 를 도펀트로 첨가하여 실리콘-게르마늄의 선택적 단결정 성장에 미치는 영향에 대해서도 알아보았다.

실험에 사용된 시편은 P-type의 <100> 방향을 가지는 웨이퍼에 열산화막이 6000Å 두께로 패터닝된 것으로 SEM 관찰을 통해 선택적으로 증착된 단결정 박막의 형상 및 증착속도를 관찰하였다. 또한 SIMS(secondary ion mass spectrometer) 장비를 이용하여 게르마늄의 함량과 보론의 농도에 대해 분석하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 실리콘의 선택적 에피 성장

증착온도별로 주입되는  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$  및  $\text{HCl}$  가스의 유량에 따른 증착속도와 선택성 여부를 그림 1에 나타내었다. 증착온도는  $675^\circ\text{C}$ ,  $700^\circ\text{C}$  그리고  $725^\circ\text{C}$ 에서 각각  $\text{HCl}$ 의 유량을 0~50sccm,  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$  유량을 200, 300sccm 으로 변화를 주어 실험을 진행하였다. 그림 1에서 보듯이  $725^\circ\text{C}$ 와  $700^\circ\text{C}$ 에서는  $\text{HCl}$ 의 유량이 증가함에 따라 실리콘막의 증착속도가 감소하였는데 이는 첨가된  $\text{HCl}$ 에 의한 식각반응이 동시에 진행되기 때문이다. 반면  $675^\circ\text{C}$ 에서는  $\text{HCl}$ 과  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$ 의 유량에 변화를 주어도 실리콘 기판이나 산화막위에 전혀 성장이 이루어지지 않았는데, 소스 가스로 사용된  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$  가스는 주로 고온 공정에서 사용되는 것으로 자체적으로  $\text{Cl}$ 기를

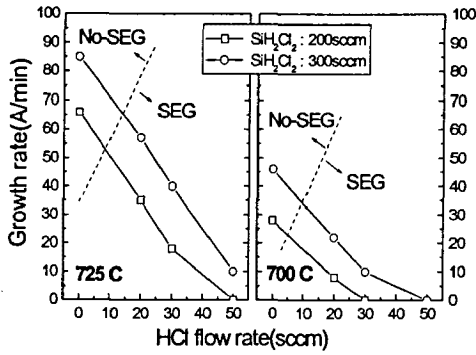


그림 1. 증착온도 725°C와 700°C에서의 HCl 유량에 따른 실리콘막의 증착속도 및 선택성 여부

가지고 있어 선택성이 우수한 반면 저온에서는 열분해가 잘 일어나지 않고 HCl의 첨가로 인한 식각반응이 실리콘막의 성장을 방해하기 때문인 것으로 생각되어진다.

그림 2는 725°C, 40torr에서  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$ 를 300sccm 주입하고 HCl 가스의 첨가 유무에 따른 SEM 분석사진이다. 그림에서 20sccm의 HCl을 주입한 경우에는 선택성이 유지되어 선택적 실리콘 성장이 이루어진 반면 HCl을 주입하지 않은 경우에는 산화막위에 실리콘의 결정핵들이 성장해 있다. 700°C와 725°C에서 모두 HCl을 주입하지 않은 경우에는 증착속도나 온도에 상관없이 선택성이 유지되지 않았다. 이로써 주로 고온공정에서 선택성을 유지하기 위해 주입되는 HCl 가스가 700°C 부근의 저온에서도 선택성을 확보하기 위해 필요하다는 것이 확인되었다.

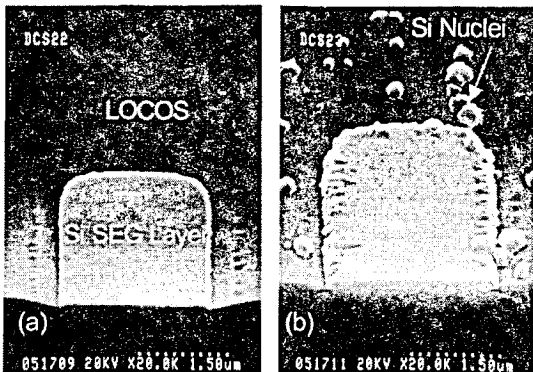


그림 2. 725°C, 40torr에서  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$  300sccm, HCl (a) 20sccm, (b) 0sccm 첨가하여 증착한 시편의 SEM 사진

### 3.2 실리콘 게르마늄막의 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 GeO의 생성으로 인해 산화막 위에서의 안정한 핵 생성이 지연되어 잠입시간이 길어진다고 알려져 있다.[4]

그림 3은 증착온도별로 주입되는 가스의 유량에 따른 증착속도를 나타내는 것으로 실리콘에서와 달리 675°C에서도 증착이 진행되었으며 모든 조건에서 선택성이 유지되었다. 각 조건별 잠입시간은 상이할 것이나 대체적으로 선택적 실리콘-게르마늄 박막의 두께가 5000Å 이상에서부터 산화막위에 결정핵이 관찰되어진다. 또한 동일한 공정조건에서도 펄트인  $\text{B}_2\text{H}_6$ 을 실시간 주입한 경우에는 증착온도와  $\text{GeH}_4$ 의 유량에 상관없이 10~20%정도 증착속도가 증가하는 경향을 보인다. 이는 700°C이하의 저온에서 보론의 첨가가 실리콘-게르마늄 단결정막의 성장속도에 영향을 주지 않는다는 Curtis Tsai[5]등의 보고와는 다른 결과를 보이는 것이다.

또한 SIMS 분석을 통해 게르마늄과 보론의 농도를 그림 4에 나타내었는데 증착온도의 증가에 따라 전체적으로 게르마늄과 보론 모두에서 농도가 감소하는 경향이 나타났으며 동일한 조건에서 실시간 보론을 주입한 경우에는 게르마늄 함량이

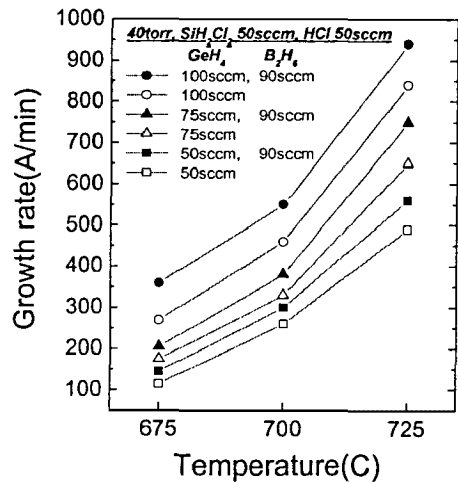


그림 3. 각각의 증착온도별  $\text{GeH}_4$ 와  $\text{B}_2\text{H}_6$  유량에 따른 실리콘-게르마늄막의 증착속도 변화

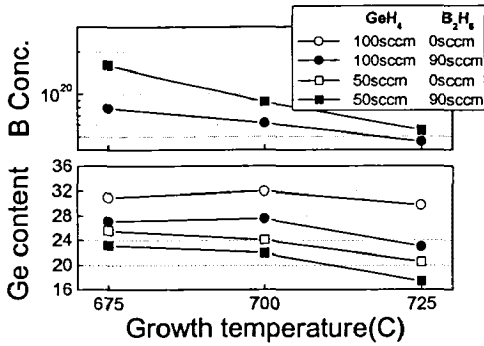


그림 4. 증착온도에 따른 보론의 농도 및 게르마늄 함량 변화

감소하는 결과를 보인다.

### 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 실리사이드를 형성하기도 하나 외부베이스를 선택적으로 증착하여 저항성분을 감소시키는 것도 한 방법이다.

본 실험에서 제시한 선택적 실리콘 및 실리콘-게르마늄막의 성장법을 외부베이스에 적용하기 위해 산화막위에 실리콘-게르마늄 베이스를 다결정으로 성장시킨 후 저항을 측정할 수 있도록 막대 모양으로 패팅 하였다. 상기의 실험 결과를 통해 700°C에서 도핑하지 않은 실리콘 및 실리콘 게르마늄막을 표 1에서와 같이 선택적으로 베이스 위에 증착한 후 Ti 실리사이드 공정을 거쳐 저항값

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

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

을 측정하였다. 표 1에서 보는 바와 같이 실리콘만 선택적으로 증착한 경우나 실리콘-게르마늄막위에 실리콘을 증착한 경우는 베이스의 두께 증가 없이 실리사이드만 실시한 경우보다 1/3정도 감소하였다. 하지만 실리콘-게르마늄층만 증착하였을 경우는 실리사이드 공정에서 게르마늄이 표면에 석출하는 현상 등에 의해 실리사이드가 형성되지 않아 오히려 저항값이 증가한 것을 확인하였다.

## 4. 결론

실리콘이나 실리콘-게르마늄막의 증착시 HCl의 첨가에 의해 비교적 저온인 700°C부근에서도 선택성을 유지하면서 단결정 성장이 가능하였다. 실리콘의 선택적 성장은 700°C이상에서만 HCl을 첨가하였을 때 60A/min 미만의 증착속도를 확보하였으나 실리콘-게르마늄막은 실리콘에 비해 낮은 열분해 온도와 GeO를 생성하여 잠입시간을 지연하는 효과로 인해 675°C에서 선택성을 유지하면서도 실리콘막에 비해 10배 이상 빠른 증착속도를 나타냈다. 또한 실시간 보론의 주입은 게르마늄의 함량을 감소시키나 증착속도를 증가시키는 결과를 보였다. 외부 베이스로의 적용여부를 위한 실험에서는 실리콘을 1000Å 올린 경우 저항값이 70%이상 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, J. Cryst. Growth. 49, p. 435, 1980
- [2] E.C. Stassimos, T.J. Anderson and H.H. Lee, J. Cryst. Growth. 73, p. 21, 1985
- [3] T.I. Kamins. J. Appl. Phys., 74(9), pp. 5799-5802, 1993
- [4] M. Racanelli, D.W. Greve, Appl. Phys. Lett. 58(19), pp. 2096-2098, 1991
- [5] C. Tsai, S. M. Jang and R. rief, J. Appl. Phys., 69(12), pp. 8158-8163, 1991