

증착과 식각의 연속 공정을 이용한 저온 선택적 실리콘-게르마늄 에피 성장

김상훈, 심규환, 강진영

한국전자통신연구원 반도체원천연구소 무선통신소자연구부 SiGe소자연구팀

Low-Temperature Selective Epitaxial Growth of SiGe using a Cyclic Process of Deposition-and-Etching

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

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

Abstract

AP/PCVD를 이용하여 650°C의 저온에서 실리콘-게르마늄의 선택적 단결정 성장(Selective Epitaxy Growth: SEG)을 수행하였다. 본 실험에서는 SiH₄, GeH₄ 그리고 HCl 가스를 사용하여 잠입시간 동안 실리콘-게르마늄막을 성장시키고 연속해서 HCl 가스만을 주입하여 산화막 위에 형성되어진 작은 결정입자들을 식각하는 공정을 반복적으로 수행하였다. HCl의 식각에 의해 한 주기의 잠입기 후에도 다시 잠입기가 존재함을 확인하였고, 이 성장법을 통하여 한 주기의 잠입시간 동안 증착할 수 있는 두께 이상으로 실리콘-게르마늄막의 선택적 성장이 가능하였다. 이는 저온 선택적 실리콘-게르마늄 성장 시 PCVD에서 보이는 낮은 선택성과 SiH₄의 짧은 잠입시간으로 인해 원하는 두께까지 확보하기 힘든 단점을 극복한 것이다. 선택성을 향상시키기 위해 실리콘-게르마늄 증착중 주입된 HCl의 유량에 따라 잠입시간과 증착속도에 영향을 주었으며, 연속공정을 위한 식각공정은 20sccm의 HCl을 20초간 주입하여 선택성을 유지하였다. 또한 보존 불순물의 첨가가 선택적으로 성장되는 박막의 결정성에 미치는 영향도 분석되었다.

Key Word : 실리콘-게르마늄, 선택성, 잠입시간, 반복공정

1. 서론

실리콘의 선택적 단결정 박막 성장기술(selective epitaxy growth: SEG)은 기존의 LOCOS 공정을 이용한 소자 격리법의 문제점을 보완하기 위해 고안된 것으로 HBT 제조에 있어 콜렉터, 내부 베이스 및 외부 베이스를 형성하는데 사용되기도 하며 CMOS에서 이온주입 없이 채널층, 높여진 소스/드레인 구조, 그리고 N-well과 P-well에서 retrograde well을 형성하는데 적용되기도 한다. 실리콘의 선택적 단결정 박막 성장은 일반적인 CVD 법에 의해 1000°C 근처의 고온에서는 쉽게 형성이 되지만 산화막 측벽 근처에서 생기는 결함 제거, 산화막의 종류나 성장법에 따라 다르게 형성되는 facet을 조절하려는 방향으로 연구가 진행되고 있

다. 또한 고품위의 단결정 박막을 아주 저온인 600°C 근처에서 얻고자 하는 SEG 기술도 많이 연구되고 있는데 이는 SEG 공정이 지나는 열적 부담이 도펀트의 확산으로 이어져 소자의 특성 열화를 가져오는 문제를 극복하기 위한 것으로 저온 공정의 당위성은 계속해서 대두되고 있다. 그러나 실리콘의 선택적 단결정 박막 성장법에 비해 실리콘-게르마늄에 대한 연구는 그리 많이 보고되고 있지 않다.

실리콘-게르마늄의 단결정 성장은 실리콘과 거의 비슷한 양상을 보이지만, 저온에서는 실리콘보다 빠른 성장속도를 나타낸다. 그 이유는 게르마늄의 열분해 온도가 더욱 낮고 수소 원자의 탈착율이 증가하기 때문이다[1]. 또한 선택성도 실리콘에

비해 우수한 것으로 보고되어지는데 이는 GeO의 생성으로 산화막 위에서의 안정한 핵생성이 지연되어 잠입 시간이 길어지기 때문으로 알려져 있다 [2]. 따라서 실리콘과 게르마늄을 혼합한 실리콘-게르마늄도 실리콘과 비슷한 양상으로 선택적 단결정 성장이 가능하다. 또한 실리콘-게르마늄 단결정막은 게르마늄의 함량이 증가함에 따라 밴드갭 에너지가 실리콘에 비해 감소하기 때문에 Schottky 장벽높이의 감소로 인해 접합 저항이 감소[3]하는 등의 장점으로 인해 초 미세 소자 제작에 있어 여러 분야의 적용이 기대 되어진다.

본 연구에서는 AP/RPCVD를 이용하여 저온에서 실리콘-게르마늄의 SEG을 증착과 식각을 반복하는 방식으로 개발하였으며, 공정조건이 성장특성에 미치는 영향에 대해 고찰하였다.

2. 실험

실험에 사용된 장비는 크게 load-lock과 반응로로 구성되어 있으며, 상압과 감압에서 모두 사용 가능하다. 전체 실험에서 증착조건을 통일하고 로딩 효과를 최소화[4] 하기 위해 반응로 내의 증착 압력은 30torr로 고정하였다. 증착온도는 650℃로 하여 SiH₄와 수소에 1.5% 희석된 GeH₄을 소스가스로 사용하였다. 반응 캐리어 가스로는 수소를 20slm의 유량으로 흘려주었는데 이는 반응로 내를 환원 분위기로 만들어주어 성장되는 박막으로의 산소 유입을 방지함으로써 고 품질의 단결정 성장을 가능하게 하는 역할을 함과 동시에 반응로 내로 유입되는 가스의 흐름이 층류가 되도록 하여 에피 성장면 상에 균일한 경계층이 형성되도록 한다.

실험은 동일한 공정조건에서 증착시간을 달리하여 산화막 위에 결정핵이 생성하기 시작하는 잠입 시간을 결정 한 후, 증착과 식각의 반복 공정을 실시하여 잠입시간이 다시 존재하는지를 확인하였다. 식각공정 중에 주입되는 HCl은 표면반응에 참가하여 SiCl₄를 형성함으로써 선택적으로 증착된 단결정 막도 동시에 식각하므로 HCl의 유량과 시간을 적절히 조절해야 한다. 식각공정의 최적 조건을 확보하기 위해 식각공정 시 HCl 유량을 20sccm으로 고정하고 시간에 변화를 주면서 30회 반복공정을 수행하여 표면 및 단면 상태를 확인하였다. 또한 수소가스에 1000ppm의 농도로 희석된 B₂H₆를 도

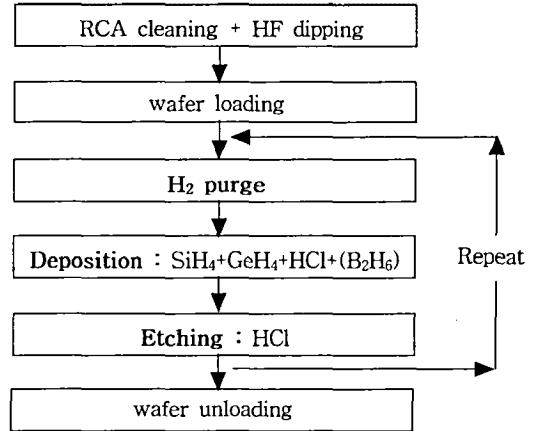


그림 1 선택적 실리콘-게르마늄 단결정 성장법의 공정 개략도

프트로 첨가하여 실리콘-게르마늄의 선택적 단결정 성장에 미치는 영향에 대해 알아보았다. 전체적인 실험방법은 그림 1의 공정 개략도를 통해 나타내었다.

증착이 시작된 후 절연막 위에 핵 생성이 일어나기 시작하는 잠입시간을 확인하기 위해 열산화막이 1000Å 키워진 웨이퍼를 사용하였다. 선택성장은 p-type <100> 방향의 웨이퍼에 열산화막을 6000Å 두께로 패턴한 시편을 이용했다. 실리콘-게르마늄막을 증착한 후에 SEM 또는 TEM 관찰을 통해 선택성, 증착속도 및 결함여부를 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

실리콘-게르마늄막을 선택적으로 실리콘 기판위에 증착할 수 있는 최대 시간인 잠입시간을 확인하기 위해 동일한 공정조건에서 증착시간에 변화를 주면서 열산화막 위에 증착을 실시하였다. 그림 2에서 보는 바와 같이 증착온도 650℃, 증착압력 30torr 그리고 SiH₄ 20sccm, GeH₄ 50sccm, HCl 30sccm의 공정조건에서 열산화막 위에 각각 5분, 10분, 20분, 40분 증착하였을 경우, 10분 이상 증착한 시편의 열산화막 위에는 실리콘-게르마늄의 결정핵이 생성되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 반면 5분 동안 증착한 후의 표면 사진을 보면 실리콘-게르마늄의 결정핵이 관찰되지 않았으며 10분 증착한 후에 보이는 결정핵의 형상은 20분, 40분 각각 증착 시간을 늘려나가도 결정핵의 밀도에는 변화를 주지 않고 그 크기만 증가한다. 이는 5분동

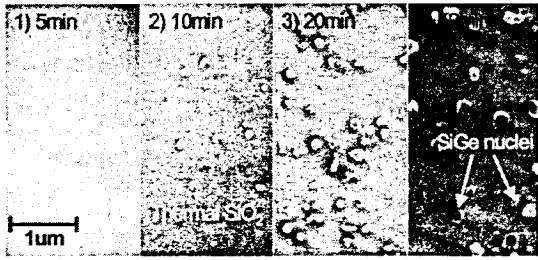


그림 2. 650°C, 30torr, SiH₄ 20sccm, GeH₄ 50sccm, HCl 30sccm의 공정조건으로 산화막 위에 각각 1) 5분, 2) 10분, 3) 20분, 4) 40분 증착한 후의 SEM 표면 분석 사진

안의 증착까지는 HCl에 의해 산화막위의 핵생성이 지연되다가 10분정도에서 핵생성을 나타내고 그 이상의 시간에서는 결정핵의 성장이 진행됨을 의미하는 것으로 증착과정 중 HCl을 30sccm 첨가하는 공정 조건에서는 5분을 잠입시간으로 결정할 수 있다.

이러한 방법으로 HCl 가스의 유량을 0, 10, 20, 30, 40 sccm 으로 변화를 주면서 HCl의 유량에 따른 잠입시간의 변화를 그림 3에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 HCl의 첨가량이 증가함에 따라 잠입시간은 급격하게 증가하나 Cl기에 의해 선택적으로 증착되는 박막의 식각현상도 동시에 이루어져 증착속도 역시 감소하는 경향을 보인다. HCl을 첨가하지 않고 SiH₄와 GeH₄ 가스만 주입한 경우에는 잠입시간이 없이 바로 결정핵이 생성되는 것을 관찰하였다.

위의 결과를 통해 수율등을 고려하면 HCl을

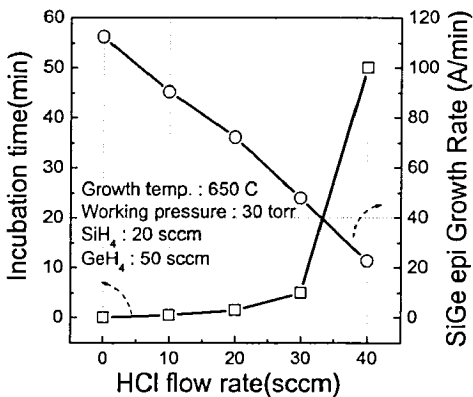


그림 3. 실리콘-게르마늄 단결정막 증착 시 HCl의 유량에 따른 잠입 시간 및 증착 속도의 변화

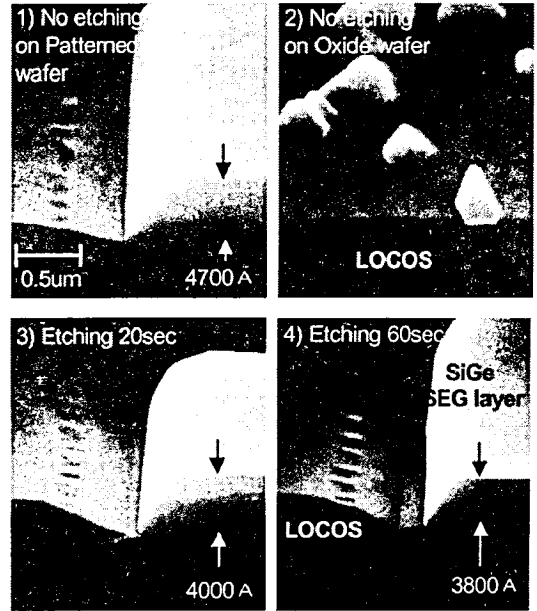


그림 4. 식각 공정 중 HCl 가스 20sccm을 각각 1-2) 0sec, 3) 20sec, 4) 60sec 동안 첨가하여 30회 반복 수행한 후의 SEM 사진

20sccm 첨가하는 경우가 최적의 조건이라 할 수 있다. 실리콘 기판 위에서의 증착은 잠입시간 없이 소스 가스의 주입과 거의 동시에 증착이 이루어지므로 HCl 유량의 변화에 따른 증착속도를 측정함으로써 각각의 잠입시간동안 실리콘 기판위에서 증착할 수 있는 최대 두께를 예상할 수 있다.

식각공정에 의해 선택성이 유지되는지 알아보기 위해 HCl 유량을 20sccm으로 고정하고 식각시간을 각각 0초, 20초, 60초로 변화를 주면서 증착과 식각을 30회씩 반복 수행하였다. 잠입시간동안의 실리콘-게르마늄 성장에서는 산화막위에 결정핵이 생성되지 않기 때문에, 증착후에 식각공정 없이 수소분위기를 만들어 준 후 다시 잠입시간이 그대로 유지가 된다면 식각공정 없이 선택적 실리콘-게르마늄 성장이 가능할 것이다.

그림 4에서 보듯이 식각공정을 첨가하지 않은 경우에 실리콘 기판과 산화막이 패터닝된 부분에서는 선택성이 유지되었으나, 웨이퍼 전면에 걸쳐 실리콘이 노출되지 않은 부분에서는 산화막 위에 결정핵이 성장되었다. 이로써 식각공정 없이는 최초의 잠입시간이 유지되지 않고 짧아져 연속공정을 통해 선택적 실리콘-게르마늄막을 증착할 수 없었

다. 대신 HCl 20sccm을 20초 그리고 60초동안 주입하면서 식각 공정을 실시한 경우는 패턴 유무에 상관없이 선택성이 유지되는 것을 확인할 수 있다. 하지만 식각공정이 없는 경우에 선택적으로 증착된 박막의 두께는 4700Å인 것에 비해 20초간 식각 공정을 하면 4000Å, 그리고 60초일 경우는 3800Å으로 성장속도가 감소하였다. 이를 통해 HCl을 첨가한 식각공정이 산화막위의 결정핵 뿐만 아니라 실리콘-게르마늄 단결정 박막도 동시에 식각하거나 증착을 지연하여 증착속도에 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

선택적으로 증착된 실리콘-게르마늄 박막의 결정성 및 결합 여부를 확인하기 위해 단면-TEM 분석을 실시했다. 증착방법에 따라 다소 차이가 있겠지만 650°C의 공정온도와 22%의 게르마늄 함량에서 단결정을 유지할 수 있는 임계 두께는 500Å 정도가 된다. 증착과 식각의 30회 연속공정으로 막의 두께가 4000Å 이상이라 그림 5에서 보는 것과 같이 응력완화에 의해 생성된 전위가 관찰된다.

그러나 두 경우에 대해 다른 양상을 보이는데, 실시간 보론을 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 농도로 도핑한 경우는 전위의 진행 방향이 실리콘-게르마늄막 보다는 실리콘 기판쪽으로 향하고 intrinsic의 경우에는 실리콘-게르마늄 막에만 전위가 형성되는 것을 확인하였다. 이는 실시간 보론 주입한 경우에 치환형 자리를 차지한 보론의 원자 반경이 실리콘이나 게르마늄의 원자 반경보다 작아 응력을 완화시켜주는 효과가 있어 실리콘-게르마늄막에 전위가 작게 생성되는 것으로 이해된다. 보론의 응력완화 현상으로 인해 임계두께가 증가하여 결합없는 단결정막을 얻기 수월해진다. 보론농도가 응력이완기구와 선택 성장에 미치는 영향은 더 상세한 연구가 요구된다.

4. 결론

저온에서 선택적으로 실리콘-게르마늄막을 성장하기 위한 방법으로 잠입 시간동안의 증착과 식각 공정을 반복적으로 수행함으로써 연속적으로 선택성이 유지되었다. 실리콘-게르마늄 증착시 유입되는 HCl의 유량은 20sccm에서 90초의 잠입시간과 72Å/min의 증착속도를 나타내 최적조건으로 확보하였으며 최소한 20초간의 식각공정이 연속공정시 선택성을 유지하기 위해 필요하였다. 반복공정을 통해 임계두께 이상으로 증착된 실리콘-게르마

1) In-situ B doped SiGe SEG



2) Intrinsic SiGe SEG



그림 5. 선택적 실리콘-게르마늄 성장시 실시간 보론 도핑을 실시한 경우1)와 보론 도핑을 하지 않은 경우2)의 TEM 분석사진

늄막의 dislocation 방향이 실시간 보론 주입여부에 따라 보론의 응력완화 현상으로 인해 다르게 나타나는데 소자의 적용 부위와 게르마늄 함량에 따른 임계두께 이하로 증착한다면 실리콘-게르마늄 단결정막을 얻을 수 있다.

감사의 글

본 연구는 정보통신부의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고 문헌

- [1] J. L. Regolini, J. Margail, S. Bodner, D. Maury, and C. Morin, "Selective epitaxial Si based layer and TiSi_2 deposition by integrated chemical vapor deposition", Applied Surface Science, 100/101, pp 566-574, 1996
- [2] M. Racanelli and D. W. Greve, "Low temperature selective epitaxy by ultra high vacuum chemical vapor deposition from SiH_4 and GeH_4/H_2 ", Appl. Phys. Lett. 58(19), pp 2096-2098, 1991
- [3] H. Shinoda, M. Kosaka, J. Kojima, S. Zaima and H. Ikeda, "Electrical properties of metal/ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(100)$ heterojunctions", Applied surface science, 100/101, pp. 526-529, 1996
- [4] T. I. Kamins, "Pattern sensitivity of selective chemical vapor deposition : pressure dependence", J. Appl. Phys., 74(9), pp.5799-5802, 1993