

이중 δ 도핑 채널 MESFET의 특성향상

이관흠, 이찬호*

숭실대학교 전자공학과

lkh@hanul.soongsil.ac.kr, chanho@ohm.soongsil.ac.kr*

Performance Improvement of Double δ -doped Channel MESFET's

Kwan Heum Lee, Chanho Lee*

Department of Electronic Engineering, Soongsil University

lkh@hanul.soongsil.ac.kr, chanho@ohm.soongsil.ac.kr*

Abstract

A MESFET device with double δ -doped channel is designed and investigated by computer simulation. The device with optimized design parameters such as a doping ratio and a spacer thickness, shows superior performance to conventional MESFETs. The effects of the FWHM of δ -doped layers device characteristics are investigated to account for the thermal process

1. 서론

고집적화와 저전력 소비를 추구하는 반도체 산업의 발달로 개별 소자들의 게이트 길이는 매우 짧아졌고 반도체 회로의 동적 전압 또한 2V이하로 낮아지고 있다. 따라서 개별 소자들은 단채널 효과 없이 전류 구동 능력이 좋아야 할 필요가 있으며 이러한 조건을 만족시키기 위한 한 방법으로 지난 수년 동안 채널 영역에 급격한 채널 도핑 profile을 갖는 반도체 소자가 연구되었다. δ 도핑 또는 ALD(Atomic Layer Doping)라 불리는 이 도핑 구조는 단채널 효과의 뛰어난 개선과 전류 구동 능력의 향상을 가져왔다[1-3].

δ 도핑이란 반도체 내에 불순물을 매우 얇은 층에 분포하도록 제한하는 것인데, 불순물의 분포를 Dirac δ -function으로 표현 할 수 있다[4]. 실제로 형성된 불순물은 폭이 매우 좁은 Gaussian 분포를 이루고 있으며 peak 도핑 농도는 δ 도핑이 되어 있지 않은 부분과 비교해 볼 때 약 10배에서 100배 정도의 높은 도핑 농도를 유지하고 있다. 따라서 δ 도핑층의 자유전자들은 주변의 도핑이 작은 곳으로 확산되며 하미 이온 인해 생긴 정전기적 힘에 의해 평형을 이루게 되어 v자형의

potential well이 생기고 높은 carrier 농도를 유지할 수 있게된다.

δ 도핑을 반도체 소자의 채널 영역에 이용하게 되면 주변보다 도핑이 높은 δ 도핑 채널영역에서 많은 carrier들이 존재하게 되어 같은 바이어스 조건에서 큰 전류를 흘릴 수 있다. 또한 이중으로 δ 도핑을 하면 두 개의 δ 도핑층 사이에 도핑이 낮은 부분이 생기는데 이러한 영역을 분리층(Spacer)[1]이라고 하며 도핑 농도가 낮아 이동도가 크다. 이곳에 양쪽 δ 도핑층 사이에서 확산되어 나온 전자들이 쌓여 전체적인 포화전류의 증가에 많은 기여를 할 수 있다.

그 밖의 δ 도핑을 이용한 반도체 소자의 장점으로는 접합 capacitance의 감소, 항복 전압의 증가, 그리고 단채널 효과의 완화 등이 있다[1]. 그러나 CMOS 공정의 경우 δ 도핑 층을 형성하기 위한 추가 mask, 두 번의 에피층 성장 단계, 그리고 공정중 δ 도핑 층을 유지하기 위한 저온 공정 등 복잡한 공정이 단점으로 지적되고 있다.

이러한 δ 도핑의 성질을 이용한 반도체 소자로서 MESFET(Metal Semiconductor Field Effect Transistor)을 선택하여 모의 실험을 하였다. 이중 δ 도핑을 이용한 반도체 소자에서 전기적 특성에 관여하는 주요 파라미터 중에는 두 δ 도핑 층 사이의 거리인 분리층의 폭, δ 도핑층의 농도와 비, δ 도핑층의 두께를 의미하는 Full Width at Half Maximum(FWHM), 그리고 보호층(Cap)이 있는데 이것은 게이트 금속과 첫 번째 δ 도핑층간의 Schottky 접합을 잘 이루어지게 하고 공정 중 채널을 보호하기 위한 것이다[1]. 이러한 MESFET의 특성에 영향을 미치는 파라미터들을 변화시켜 가장 특성이 좋은 구조를 설계하였으며 δ 도핑이 없는 벌크 채널 구조나 단일 δ 도핑 채널 구조와 비교하였다. 그리고 δ 도핑 층을 형성하기 위해 실제 공정에서 어떻게 적용될 수 있는지 알아보았다.

II. 이중 δ 도핑 채널 MESFET

1. 이중 δ 도핑층의 농도비에 따른 특성변화

그림 1은 채널길이 $1.0\mu\text{m}$ 를 가지는 일반적인 MESFET 구조의 채널 영역에 이중으로 δ 도핑을 형성한 소자의 단면이다. 소자의 형성과 특성 분석은 Silvaco사의 소자 시뮬레이터인 'Atlas'를 사용하였다.

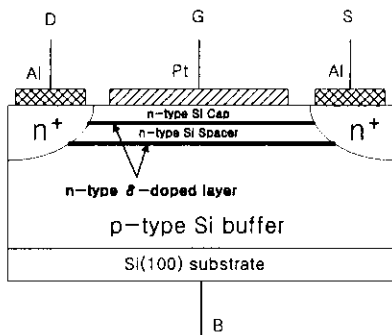


그림 1. 이중 δ 도핑 MESFET의 구조

그림 1과 같은 구조의 최적화 된 소자를 찾기 위해서는 모두 같은 조건에서 모의 실험이 되어야 한다. 기판의 도핑농도는 $1.2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, 보호층과 분리층의 도핑농도는 $2.1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 로 고정하였다. 또한 비교되어질 소자들은 일정한 차단 전압을 가질 필요가 있으며 본 논문에서는 $1.0\mu\text{m}$ 의 게이트 길이를 가지는 소자의 cutoff 조건을 드레인 전압이 2.4V 이고 n 채널 소자의 경우 게이트 전압이 -1.9V 일 때 드레인 전류가 $0.15\mu\text{A}/\mu\text{m}$ 인 경우로 정하였다.

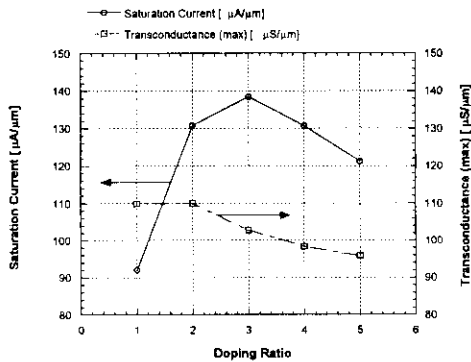


그림 2. 두 개의 δ 도핑 농도비에 따른 포화전류와 트랜스 컨덕턴스의 변화

그림 2는 두 개의 δ 도핑 농도를 변화시켜가며 얻은 결과이다. 이때, 분리층과 보호층의 두께는 각각 300\AA

과 200\AA 으로 고정하였고 게이트 전압은 0V , 기판 전압은 -3V 로 유지하였다. 도핑 농도비가 3인 경우가 가장 큰 포화전류를 흘리고 있음을 알 수 있는데 이것은 δ 도핑층에서 확산돼 나온 전자들의 분포가 도핑비 3인 경우에 가장 최적을 이룬다는 것을 의미한다.

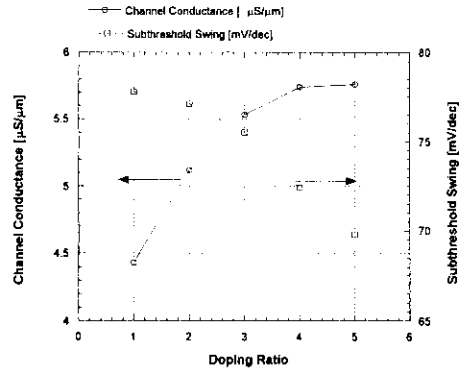


그림 3. 두 개의 δ 도핑 농도비에 따른 채널 컨덕턴스와 subthreshold swing의 변화

그림 3은 δ 도핑 농도비에 따른 채널 컨덕턴스와 subthreshold swing을 나타내고 있으며 이 두 값은 서로 반비례하고있다. 위의 경우에 따라 채널 컨덕턴스 또는 subthreshold swing중 어느 한쪽이 우수한 특성이 필요할 때 거기에 맞도록 도핑비를 선택할 수 있다.

2. 분리층의 두께에 따른 특성변화

분리층은 양쪽 δ 도핑에서 채널 안쪽 FWHM간의 거리이며 확산되어 나온 전자들이 쌓이는 곳으로 전류의 흐름에 최대한 기여할 수 있도록 설계되어야 한다.

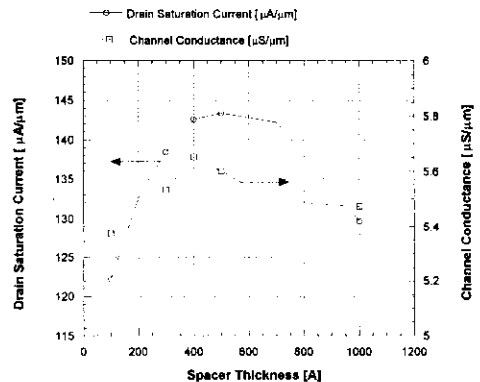


그림 4. 분리층의 두께에 따른 포화전류와 채널 컨덕턴스의 변화

그림 4는 가장 특성이 좋은 분리층 두께를 알기 위

해 최적화 도핑 농도비 3인 조건을 그대로 이용하여 분리층의 두께를 바꾸어 가며 모의 실험한 결과이다. 드레인 전류 특성은 분리층의 두께가 400Å에서 700Å 사이가 가장 좋게 나왔으며 이것은 이중 δ 도핑 MESFET은 도핑 농도비 3에 분리층의 두께는 이 값 사이에서 결정하여야 가장 특성이 좋은 소자를 설계할 수 있다는 것을 의미한다. 채널 컨덕턴스는 두 δ 도핑 층의 농도비에 따른 변화보다는 다소 완만한 변화를 나타내므로 분리층의 두께에 그리 큰 영향을 받지 않는다고 할 수 있다.

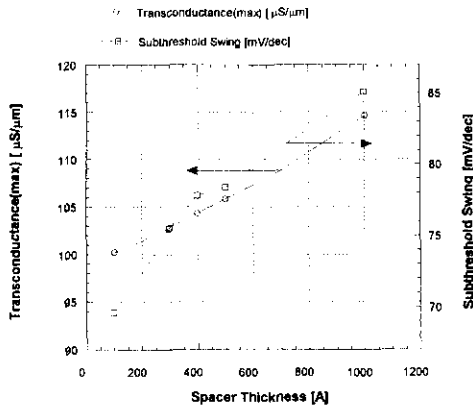


그림 5. 분리층의 두께에 따른 트랜스컨덕턴스와 subthreshold swing의 변화

그림 5은 분리층의 두께에 따른 트랜스컨덕턴스와 subthreshold swing의 변화를 나타내며 분리층이 두꺼워질수록 증가함을 보이고 있다. Swing이 증가한다는 것은 V_t 이하에서 누설전류가 크다는 것을 의미한다. Swing이 중요시되는 경우 지금까지의 결과를 이용하여 도핑비를 크게 하거나 분리층의 두께를 줄이는 방향으로 가면 된다.

3. FWHM에 따른 특성변화

실제 공정에서 δ 도핑 층의 형성은 분자선 박막 성장법(Molecular-Beam Epitaxy, MBE)을 이용하여 수Å에서 수십Å까지의 얇은 층을 만들 수 있다[2, 3]. 시뮬레이션상으로는 δ 도핑층의 원하는 파라미터를 그대로 반영할 수 있지만 실제로는 δ 도핑층의 형성 후에도 후속 공정 중의 각종 열에 의해 δ 도핑층이 영향을 받아 주변의 도핑이 낮은 곳으로 확산되어 결국 트랜지스터의 특성이 바뀔 수 있다. 따라서 실제 공정에서는 이러한 성질까지 고려하여 δ 도핑층을 만들어야 하며 궁극적으로 모든 공정이 끝난 후 처음 설계했던 δ 도핑층의 파라미터를 갖도록 해야한다. 최적 조건을 이용하고 δ 도핑층의 FWHM을 40Å에서 250Å까지 변화시켜가며 트랜지스터의 특성이 달라지는 경향을 살펴보았다.

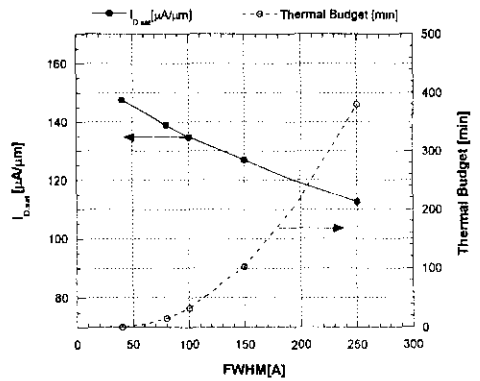


그림 6. 각 FWHM의 최적화 조건을 따른 포화전류의 변화

그림 6은 최적화 조건을 각각의 FWHM을 가지는 소자에 적용시켜 얻은 포화 전류의 변화와 그때의 FWHM을 얻기 위한 thermal budget을 나타낸다. 포화 전류는 FWHM이 40Å에서 250Å까지 커지면서 약 24%정도 감소하였다. Thermal budget은 각각의 FWHM에 대하여 그림2와 4에서 찾은 최적조건을 이루기 위한 것으로 처음 MBE공정에서 FWHM 40Å의 δ 도핑 층이 형성되었다고 할 때 공정이 끝난 후 원하는 peak 도핑과 FWHM을 가지는데 필요한 thermal budget을 나타낸다. 따라서 실제 공정에서 필요한 thermal budget을 예상하여 열처리후 최적조건이 되도록 초기 δ -doping 농도를 정하면 소자의 특성을 유지할 수 있다.

III. 벌크 채널 및 단일 δ 도핑 채널 MESFET

1. 벌크 채널 MESFET

이중 δ 도핑 채널 MESFET과의 비교를 위해 1.0μm의 게이트 길이와 약 1000Å의 채널 두께 그리고 200Å의 보호층을 가지는 벌크 채널 MESFET을 설계하였다. δ 도핑을 제외한 그밖에 모든 조건은 이중 δ 도핑 채널 MESFET과 동일하게 설정하였으며 일반적인 벌크 소자의 채널 두께로 1000Å을 적용하였다. 그러나 채널 두께가 얇아질수록 차단 조건을 만족하기 위해 채널의 도핑 농도는 점점 커지고 이에 따른 포화전류나 subthreshold swing등이 개선되는 등 소자의 특성이 다소 향상된다. 이러한 식으로 채널의 두께를 줄이게 되면 결국에는 단일 δ 도핑 채널 MESFET의 구조가 된다.

2. 단일 δ 도핑 채널 MESFET

단일 δ 도핑 채널 MESFET의 구조는 이중 δ 도핑 채널 MESFET과의 비교를 위해 동일한 차단 조건에서 FWHM이 60Å인 경우로 실험하였다. 그림 11은 이중 δ 도핑 채널 MESFET의 최적의 구조가 도핑 농도 비 3, 분리층 두께 500Å, FWHM 60Å이라 할 때 벌크 및 단일 δ 도핑 채널 MESFET의 드레인 특성 곡선이다.

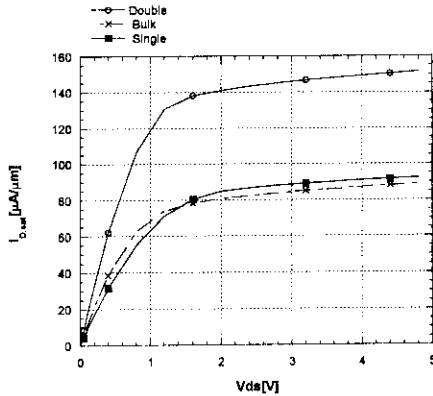


그림 7. 이중 및 단일 δ 도핑 채널과 벌크 채널 MESFET의 드레인 특성 곡선

그림 7에서 보듯이 이중 δ 도핑 채널 MESFET의 포화전류를 벌크 채널 MESFET과 비교해볼 때 약 74%, 단일 δ 도핑 채널 MESFET보다는 약 65%의 포화전류가 향상되었음을 알 수 있다. 표 1은 이러한 소자들의 채널 특징에 따른 채널 컨덕턴스와 subthreshold swing이 나타나 있다. 여기서 벌크 채널 소자에서 단일 δ 도핑 채널 소자로 갈 때 subthreshold swing이 눈에 띄게 향상되었음을 알 수 있는데 이것은 채널의 두께가 1000Å에서 60Å으로 급격히 줄어들었기 때문이며 채널 두께가 10Å씩 줄어들 때마다 swing이 약 1.9 [mV/dec]씩 개선되었다고 볼 수 있다.

<표 1. 채널 특징에 따른 특성 변화>

파라미터	채널 종류		
	벌크 채널	단일 δ 도핑 채널	이중 δ 도핑 채널
포화전류 [$\mu A/\mu m$]	82.4	86.7	142.5
채널 컨덕턴스 [$\mu S/\mu m$]	4.31	4.72	5.65
Subthreshold Swing[mV/dec]	84.9	66.5	77.8

IV. 결론

δ 도핑을 이용한 MESFET을 컴퓨터 모의 실험을 통하여 설계하고 그 특성을 비교하여 보았다. 각각의 소자들은 δ 도핑이 없는 일반적인 구조와 비교해서 성능이 향상됨을 확인하였다. 이것은 δ 도핑층의 높은 도핑 농도에 의한 전자와 이동도가 큰 분리층에 쌓인 전자들이 포화전류 증가에 기여하고 같은 비교 조건에서 일반 FET소자 보다 얇은 채널 두께를 가지게 되기 때문이며 포화전류는 74%의 성능이 향상되었다. 이러한 δ 도핑 층의 형성은 실제 공정을 마친 후 의도한 최적화 조건을 만족하도록 thermal budget을 고려하여 설계되어야 한다.

참고문헌

- [1] 김동명, 이찬호 " SiGe strained layer를 이용한 MESFET의 설계와 제작에 관한 연구", ISRC 96-E-1131 서울대학교 반도체 공동 연구소
- [2] Kiyokazu Nakagawa and Yasuhiro Shiraki, "Controlled Atomic Layer Doping and ALD MOSFET fabrication in Si", Jpn. J Appl. Phys. Vol.26, No.12, December, 1987, pp.L1933-L1936
- [3] S.L. Wu, T.K. Carns, S.J. Wang and K.L. Wang "Boron delta-doped Si metal semiconductor field-effect transistor grown by molecular-beam epitaxy", Appl. Phys. Lett., Vol. 63, No. 10, 6 September 1993, pp. 1363-1365
- [4] H.-J. Gossmann and E.F. Schubert "Delta Doping in Silicon" Critical Reviews in Solid State and Materials Science, 18(1):1-67(1993)