
DGMOSFET에서 채널내 전자분포에 따른 전도중심의 이동

정חק기*

Movement of Conduction Path for Electron Distribution in Channel of Double Gate MOSFET

Hakkee Jung*

요 약

본 연구에서는 이중게이트(Double Gate; DG) MOSFET에서 채널 내 전자분포에 대한 전도중심의 이동을 분석하고자 한다. 이를 위하여 기존에 발표되어 타당성이 입증된 포아송방정식의 해석학적 전위분포 모델을 이용할 것이다. 이중게이트 MOSFET의 경우 두개의 게이트전압에 의한 전류제어능력의 증가로 단채널 효과를 감소시킬 수 있다는 장점이 있다. 단채널효과는 주로 문턱전압영역을 포함한 문턱전압이하 영역에서 발생하므로 문턱전압이하 영역에서의 전송특성을 분석하는 것은 매우 중요하다. 또한 전송특성은 채널 내 전자의 분포 및 전도 중심의 변화 등에 영향을 받는다. 그러므로 본 연구에서는 채널 내 전자분포의 변화가 전도중심에 미치는 영향을 채널도핑농도, 도핑분포함수 그리고 채널의 크기 등에 따라 분석할 것이다.

ABSTRACT

In this paper, movement of conduction path has been analyzed for electron distribution in the channel of double gate(DG) MOSFET. The analytical potential distribution model of Poisson equation, validated in previous researches, has been used to analyze transport characteristics. DGMOSFETs have the advantage to be able to reduce short channel effects due to improvement for controllability of current by two gate voltages. Since short channel effects have been occurred in subthreshold region including threshold region, the analysis of transport characteristics in subthreshold region is very important. Also transport characteristics have been influenced on the deviation of electron distribution and conduction path. In this study, the influence of electron distribution on conduction path has been analyzed according to intensity and distribution of doping and channel dimension.

키워드

DGMOSFET, 도핑분포, 포아송방정식, DIBL, 단채널효과, 전도중심

Keyword

DGMOSFET, doping distribution, Poisson equation, DIBL, short channel effect, conduction path

* 종신회원 : 군산대학교(교신저자,hkjung@kunsan.ac.kr)

접수일자 : 2011. 12. 14

심사완료일자 : 2012. 02. 03

I. 서 론

최근 반도체메모리 시장의 중심은 트랜지스터 크기의 감소에 관한 연구이다. 트랜지스터 크기감소는 웨이퍼당 IC생산량을 증가시켜 가격경쟁력을 갖게 할 것이다. 메모리의 용량이 기가바이트단위로 증가하면서 소자크기의 감소는 필연적인 사항이 되었다. 20나노급 이하의 트랜지스터를 이용한 집적회로의 제작은 단순히 크기축소 이외에 또다른 문제를 야기시키고 있다. 기존의 CMOSFET를 이용한 20나노급 집적회로에서는 소위 단채널효과가 심하게 발생하여 소자제작에 어려움을 겪고 있다. 단채널효과는 문턱전압이하스윙 특성의 저하, 문턱전압의 이동, 드레인유도장벽감소 현상 등 다양한 형태로 발생하고 있다. 그러나 이러한 단채널효과를 감소시키기 위한 스켈링이론은 한계에 접어들고 있어 소자구조 자체의 변화에 대한 연구가 활발해지고 있다. 이와같은 문제점을 해결하기 위하여 개발되고 있는 소자가 다중게이트 MOSFET이다. 다중게이트 MOSFET의 경우, 여러 게이트에서 채널 내 캐리어들을 제어하므로 게이트의 전류제어 능력이 증가하며 특히 채널의 크기가 상대적으로 감소하여 완전결핍상태가 되면 무시할 수 있는 산란 때문에 캐리어의 속도를 증가시켜 차단주파수 및 스위칭속도를 향상시킬 수 있다는 장점이 있다.

최근 단채널효과를 획기적으로 감소시킬 수 있는 다중게이트 MOSFET중 가장 간단한 구조를 가진 이중게이트(Double Gate; DG) MOSFET소자에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 이론적 연구도 병행되고 있다.[1] DGMOSFET는 기존의 CMOSFET와 달리 상단에 게이트를 2개 제작하는 구조이며 제작상의 어려움을 극복하기 위하여 FinFET라는 새로운 형태의 트랜지스터로 발전하고 있다[2]. 그러나 FinFET 또한 Fin이라는 얇고 높은 단면을 갖는 채널 층을 제작하기 어렵다는 단점이 있다. DGMOSFET의 이론적인 연구의 대부분은 포아송방정식을 풀어 해석학적 전위분포모델 등을 구하여 실험값에 근사한 모델을 얻는데 집중하고 있다.

전위분포모델을 이용하여 구한 전자분포모델을 이용하면 DGMOSFET의 채널에서 전자분포에 따라 전자의 전도현상을 관찰할 수 있다. 일반적으로 에너지밴드

구조에서 에너지준위가 가장 작은 영역에 전자들이 모여 이동하는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 채널내 전위분포를 구하고 이에 상응하는 전자분포를 유도할 것이다. 각 전자분포에 따라 전자들이 게이트에 어느 정도 가까이 위치하여 전도되는 지를 관찰할 것이다. 게이트에 가까이 접근하여 이동할수록 게이트단자 전압의 영향력이 증가하여 문턱전압이하스윙의 저하현상을 감소시킬 수 있으며 드레인유도장벽감소 현상을 최소화하여 문턱전압을 일정하게 유지할 수 있을 것이다. 포아송방정식을 풀 때 전자분포에 대한 여러 가지 모델을 제시하고 있다 [2,3]. 그러나 실험값에 유사한 전하분포는 가우스함수이며 Tiwari 등[4]은 이를 이용하여 전위분포에 대한 해석학적 모델을 구하고 문턱전압에 대한 모델까지 제시하였다.

그러나 전자분포 및 전도중심의 이동현상에 대해선 언급하지 않았으며 소자파라미터가 전도중심 이동에 미치는 영향 등도 고찰하지 않았다. 이에 본 연구에서는 Tiwari의 모델을 이용하여 전위분포를 구하고 이에 해당하는 전자분포와 전도중심의 이동을 소자파라미터의 변화에 대하여 고찰하고자 한다. 소자파라미터로는 채널의 두께 및 길이, 도핑농도 및 형태 등을 사용할 것이다.

2장에서는 Tiwari의 전위분포 모델에 대하여 설명할 것이며 3장에서 전자분포 및 전도중심 이동 현상을 소자파라미터에 대하여 분석할 것이다. 4장에서 결론 및 향후 개발방향에 대하여 제시할 것이다.

II. 전위분포모델과 전도중심

그림 1은 이 논문에서 사용한 DGMOSFET의 개략도로서 x, y 방향에 대한 전위분포를 구하기 위하여 다음과 같은 포아송방정식을 이용한다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = \frac{qn(x)}{\epsilon_{si}} \quad (1)$$

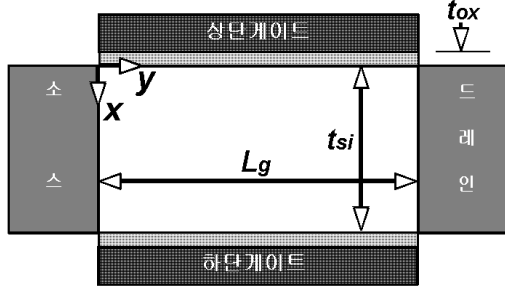


그림 1. DGMOSFET의 개략도
Fig. 1 Schematic view of DGMOSFET

여기서 채널폭 방향인 z 방향으로의 전위분포는 거의 일정하므로[2] x, y 방향의 2차원 전위분포만을 이용하여 해석학적 모델을 유도하였다. $n(x)$ 는 채널내 도핑 분포함수로서 식(2)와 같은 가우시안 분포함수를 이용하였다.

$$n(x) = N_p \exp \left\{ \frac{-(x - R_p)}{2\sigma_p^2} \right\} \quad (2)$$

여기서 N_p 는 이온주입시 도즈량에 의하여 결정되는 최대 도핑분포값이며 R_p 와 σ_p 는 각각 이온주입의 범위 및 분포편차를 나타낸다. 식 (1)과 (2)를 풀기 위하여 Tiwari 등[4]과 Zhang 등[5]의 경계조건을 이용하면 전위 분포를 구할 수 있다. 이미 발표한 논문에서 전위분포 관련식에 관하여 검증하였다[6]. 이렇게 구한 전위분포 함수를 이용하면 전자분포를 구할 수 있다. 전자분포는 볼츠만통계에 의하여

$$n_m(x, y) = \frac{n_i^2}{N_p} \exp(q\phi(x, y)/kT) \quad (3)$$

이며 여기서 n_i 는 순수반도체의 전자농도이고 k 는 볼츠만상수, 그리고 T 는 절대온도이다. 대부분의 전자 흐름 즉 전도현상은 식 (3)에서 이용한 전위분포 중 최소 채널전위에서 발생하며 최소 채널전위 $\phi_{\min}(x)$ 는 $\partial\phi(x, y)/\partial y = 0$ 에서 구할 수 있다. 드레인전류는 최소 채널전위에 존재하는 전자분포 $n_m(x)$ 에 비례

하며 이 값은 식 (3)에서 $\phi(x, y)$ 대신 $\phi_{\min}(x)$ 를 대입시켜 구할 수 있다. 이와같이 구한 전자분포 $n_m(x)$ 를 이용하면 전도중심을 구할 수 있다. 전도중심은 전자분포의 형태에 의하여 결정되고 대부분의 전자흐름이 발생하는 영역을 의미하며 다음과 같이 구할 수 있다[7].

$$x_{eff} = \frac{\int_0^{t_{si}/2} x e^{\phi_{\min}(x)/V_i} dx}{\int_0^{t_{si}/2} e^{\phi_{\min}(x)/V_i} dx} \quad (4)$$

식 (4)에서 x_{eff} 를 구할 때 사용한 $\phi_{\min}(x)$ 값은 도핑분포 형태에 따라 변화할 것이다. 그러므로 이 연구에서는 식 (2)의 파라미터인 이온주입의 범위 및 분포편차 그리고 N_p 값에 따라 전도중심의 변화를 관찰 할 것이다. 전도중심이 게이트단자에 접근할수록 단채널에서 발생하는 문턱전압이하스윙 값이 급격히 작아져 단채널효과가 개선되는 현상을 발견할 수 있다[2]. 이와같이 전도중심의 위치에 따라 문턱전압이하 특성의 변화가 발생할 수 있기 때문에 전도중심에 관하여 관찰할 것이다. 특히 채널도핑농도 및 도핑분포함수에 따른 전도중심의 변화에 중점을 두어 설명할 것이다.

III. 전위 및 전자분포와 전도 중심

그림 2는 Tiwari의 전위분포모델을 이용하여 이온주입의 범위 5nm, 분포편차 5nm 그리고 드레인전압 0.01V, 게이트전압 0.01V일때 구한 채널 내 도핑농도에 따른 전위분포이다. 도핑농도가 $N_p = 10^{15}/cm^3$ 일 경우 채널 내 전위 분포는 거의 변화를 보이지 않고 일정하게 유지되고 있었으나 도핑농도가 $N_p = 10^{19}/cm^3$ 정도로 증가할 경우 채널 내 전위분포는 매우 크게 변화함을 알 수 있었다. 이러한 전위분포의 급격한 변화는 전자분포의 급격한 변화를 초래하여 전도중심의 이동을 야기시킬 것이다.

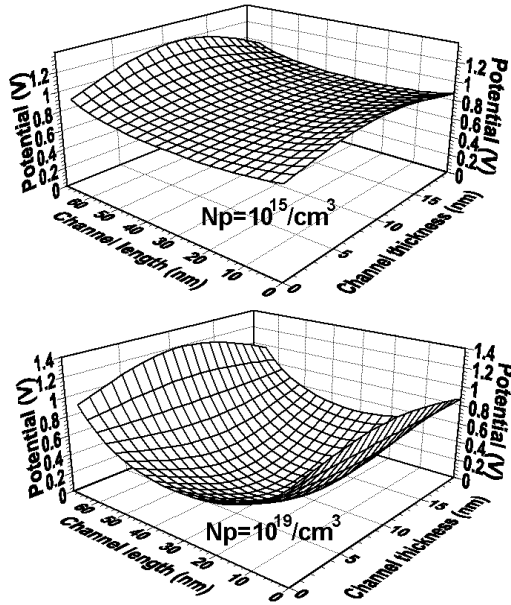


그림 2. 도핑농도에 따른 DGMOSFET의 채널내 전위분포
 Fig. 2 Potential distribution of DGMOSFET in channel for doping concentration

그림 3에 채널길이 60nm, 채널두께 30nm일 때의 전자분포를 등고선 그래프로 도시하였다. 그래프 내 숫자는 평방 m당 전자농도의 강도를 표시한 10의 지수에 해당하는 값이다. 그림 2에서 예측할 수 있듯이 도핑농도가 $N_p = 10^{19}/cm^3$ 일 때 매우 급격한 전자분포를 보이는 것을 알 수 있다. 또한 도핑농도가 클 때는 드레인과 소스단자 근처에서 급격한 전자분포의 변화를 나타내고 있다. 그림 3의 두 그래프를 비교해 보면 도핑농도가 $N_p = 10^{15}/cm^3$ 일 경우 약간의 비대칭현상이 발생하나 도핑농도가 $N_p = 10^{19}/cm^3$ 일 때는 거의 대칭적인 분포를 나타내고 있다는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 전자분포는 그림 3의 내부에 도시한 도핑분포함수 때문인 것으로 사료된다. 즉 상단 게이트단자에서 이온주입이 이루어지며 가우스분포함수의 특성상 상단게이트 근처에서의 분포강도가 더욱 강하다는 것을 알 수 있다.

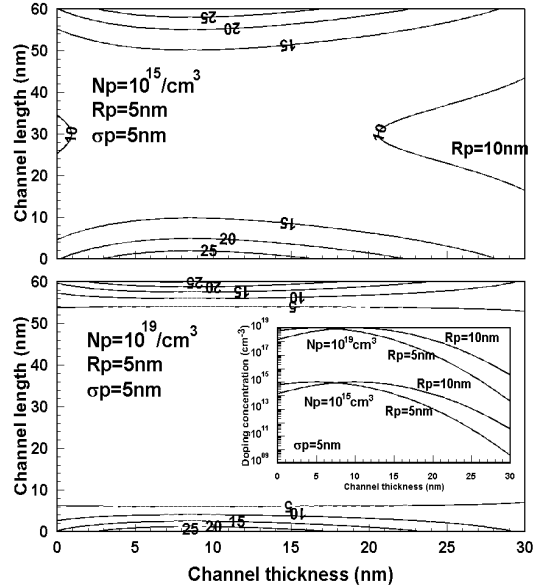


그림 3. 도핑농도에 따른 DGMOSFET의 채널내 전자분포의 등수 ($L_g = 60nm, t_{Si} = 30nm$)
 Fig. 3 The order of electron distribution of DGMOSFET in channel for doping concentration ($L_g = 60nm, t_{Si} = 30nm$)

채널크기감소에 따른 전자분포의 변화를 관찰하기 위하여 채널두께가 10nm, 채널길이 20nm로 감소하였을 때 전자분포를 그림 4에 도시하였다. 채널두께가 10nm 정도로 작아지면 그림 3의 내부그림에서 알 수 있듯이 채널두께에 대한 도핑분포가 거의 일정하게 유지되므로 전자분포도 상하단 게이트단자에 대하여 대칭적으로 분포하고 있다는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 도핑농도가 클 때는 그림 3에서 설명한 바와같이 전자분포의 변화율이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 전자분포의 변화는 전도중심의 이동을 야기시킬 것이며 이는 결국 단채널소자에서 문턱전압이하 특성의 변화를 발생시킬 것이다.

그림 3의 내부그림에서도 알 수 있듯이 가우스함수에서 이온주입의 범위 및 분포편차의 변화는 도핑농도분포를 변화시키며 결국 전자분포도 변화시킬 것이다.

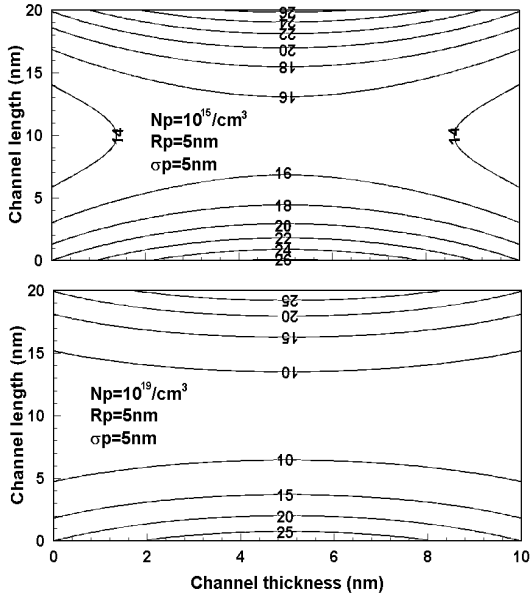


그림 4. 도핑농도에 따른 DGMOSFET의 채널내 전자분포의 승수($L_g = 20nm, t_{Si} = 10nm$)
 Fig. 4 The order of electron distribution of DGMOSFET in channel for doping concentration ($L_g = 20nm, t_{Si} = 10nm$)

이를 좀더 자세히 고찰하기 위하여 그림 5에 분포편차를 5nm로 고정된 상태에서 이온주입의 범위를 10nm로 증가시켰을 때 전자분포를 등고선 그래프로 나타내었다. 그림 3의 내부그림에서 채널두께가 10nm일 때 그리고 이온주입범위가 10nm일 때는 이온주입이 이루어지는 상단게이트단자보다 하단게이트단자에서의 도핑농도가 더욱 크다는 것을 관찰 할 수 있다. 그러므로 그림 5에서 알 수 있듯이 상단게이트보다 하단게이트 방향으로 전자분포가 이동한 것을 관찰 할 수 있다. 그러나 그림 3과 그림 4에서도 설명한 바와같이 도핑농도가 크면 전자분포의 변화율도 커진다는 것을 알 수 있다.

이와같이 이온주입범위 그리고 도핑농도 등 소자제작을 위한 파라미터에 전자분포는 매우 영향을 받는다는 것을 관찰할 수 있었다. 전술한 바와같이 전자분포의 형태 등은 전도중심에 커다란 영향을 미치며 이러한 전도중심은 문턱전압이하 특성에 영향을 미치는 것으로 나타나고 있다.

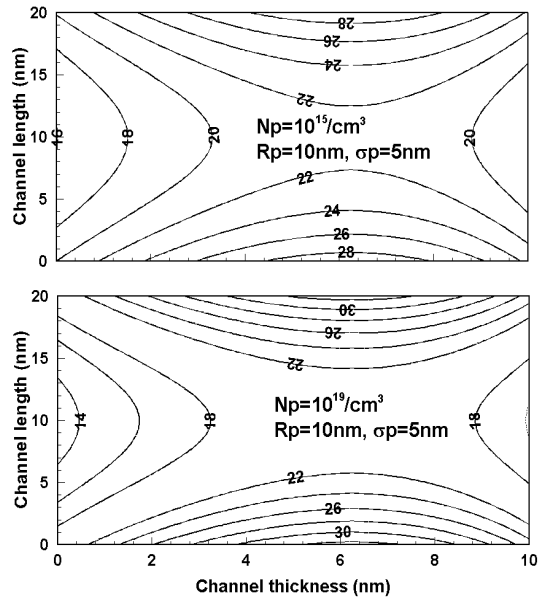


그림 5. 이온주입범위를 증가시켰을 때 도핑농도에 따른 DGMOSFET의 채널내 전자분포의 승수($L_g = 20nm, t_{Si} = 10nm$)
 Fig. 5 The order of electron distribution of DGMOSFET in channel for doping concentration when projected range is increased ($L_g = 20nm, t_{Si} = 10nm$)

그러므로 식 (4)를 이용하여 구한 도핑농도의 변화에 따른 전도중심의 변화를 그림 6에 도시하였다. 이때 채널길이와 채널두께 그리고 이온주입범위 및 분포편차를 변화시키면서 전도중심의 이동을 관찰하였다. 그림 6에서 일점쇄선은 상단게이트와 하단게이트의 영향을 관찰하기 위하여 그어놓은 채널의 중심선이다. 그림 6에서 알 수 있듯이 상하단 게이트에서 전도중심은 거의 대칭적인 분포를 보이고 있다. 그러나 채널길이가 60nm 정도로 증가하면 약간 전도중심의 대칭성이 깨어지는 것을 알 수 있다.

즉 채널길이가 60nm, 채널두께가 30nm일 경우 도핑농도가 작을 때는 거의대칭적인 분포를 보이다가 도핑농도가 증가하면 상단게이트에서 더욱 게이트단자가 가까운 전도중심을 나타내고 있다. 그러나 채널길이가 20nm, 채널두께가 10nm일 경우, 도핑농도에 관계없이 거의 대칭적인 분포를 나타내고 있다.

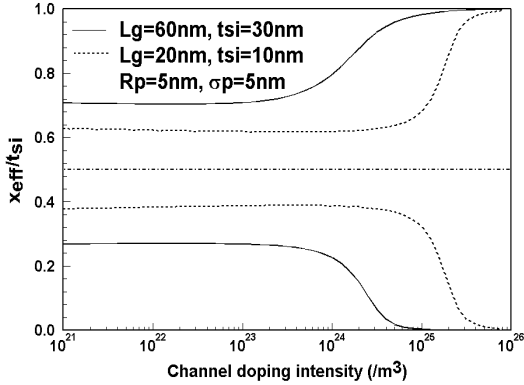


그림 6. 도핑농도에 따른 DG MOSFET의 전도중심
Fig. 6 Conduction paths of DG MOSFET for doping concentration

이는 전술한 바와같이 도핑분포 및 전자분포 등에 의한 것으로 사료된다. 그러므로 대칭적인 전도중심을 유지하기 위해선 채널길이와 채널두께가 작아야한다.

이온주입범위 및 분포편차가 변화하면 전자분포에도 변화가 발생하고 이는 전도중심에 영향을 미친다. 이온주입범위를 5nm에서 10nm로 증가시켰을 때 전도중심의 변화를 그림 7에 도시하였다. 일점쇄선은 그림 6과 마찬가지로 채널두께방향으로 중심선을 나타내고 있다.

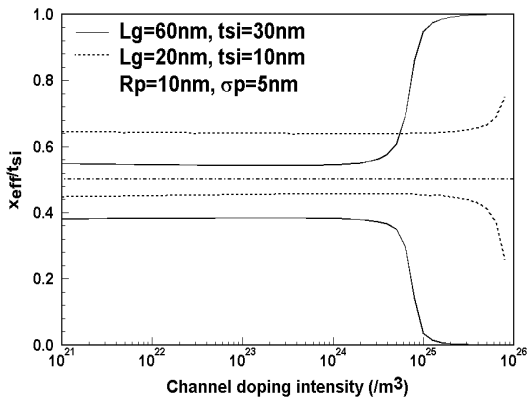


그림 7. 이온주입범위를 증가시켰을 때 도핑농도에 따른 DG MOSFET의 전도중심
Fig. 7 Conduction paths of DG MOSFET for doping concentration when projected range is increased

그림 6과 비교하면 상하단 게이트단자로부터 전도중심이 매우 비대칭적으로 분포하는 것을 알 수 있다. 도핑농도가 작을 때에도 일정하나 비대칭분포를 나타내며 도핑농도가 클 때는 게이트단자로 전도중심이 이동하나 비대칭적으로 이동하는 것을 알 수 있다. 이는 채널길이 및 두께에 관계없이 나타나는 것을 알 수 있다. 채널길이 및 두께가 클 때는 물론이고 그림 5의 전자분포에서도 예측할 수 있듯이 작을 때 이온주입범위와 분포편차가 다를 때는 전도중심도 비대칭적인 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 이중게이트 MOSFET에서 채널 내 도핑분포함수를 이용하여 전자분포를 구하였으며 이를 이용하여 전도중심의 이동을 분석하였다. 전위분포모델은 타당성이 입증된 포아송방정식의 해석학적 모델을 이용하였다. 이중게이트 MOSFET는 상하단에 두개의 게이트전압에 의하여 채널 내 전류의 흐름을 제어하고 있으므로 채널 내 전위분포와 전자분포를 각 도핑분포함수의 파라미터인 이온주입범위, 분포편차 그리고 도핑농도에 따라 분석하였다. 전자분포를 분석한 결과 이온주입범위 및 분포편차가 동일하더라도 채널길이 및 채널두께가 클 경우, 전자분포가 비대칭이므로 전도중심도 도핑농도가 증가하면 비대칭으로 나타나는 것을 알 수 있었다. 그러나 상대적으로 채널길이 및 채널두께가 작을 경우는 도핑농도에 관계없이 대칭적인 전도중심을 나타내고 있었다. 이온주입범위와 분포편차가 상이할 경우는 전도중심이 비대칭으로 나타나고 있었다.

전도중심은 단채널소자에서 문턱전압이하 특성을 결정하는 중요한 요소로서 이중게이트 MOSFET의 단채널효과를 감소시키기 위하여 각 파라미터에 대한 영향을 더욱 자세히 연구하여야 한다고 사료된다. 이 연구의 결과는 향후 이중게이트 MOSFET소자 제작의 기초로 사용될 것이다.

참고문헌

- [1] H.K.Jung and S.Dimitrijevic, "Analysis of Subthreshold Carrier Transport for Ultimate DGMOSFET", IEEE Trans. Electron Devices, vol.53, no.4, pp.685-691, 2006.
- [2] A.S.Havaladar, G.Katti, N.DasGupta and A.DasGupta, "Subthreshold Current Model of FinFETs Based on Analytical Solution of 3-D Poisson's Equation," IEEE Trans. Electron Devices, vol. 53, no.4, pp.737-741, 2006.
- [3] S.Namana, S.Baishya and K.Koley, " A Subthreshold Surface Potential Modeling of Drain/Source Edge Effect on Double Gate MOS Transistor," 2010 International Conference on Electronics and Information Engineering, vol. 1, pp.87-91, 2010.
- [4] P.K. Tiwari, S. Kumar, S. Mittal, V. Srivastava, U. Pandey and S. Jit, "A 2D Analytical Model of the Channel Potential and Threshold Voltage of Double-Gate(DG) MOSFETs with Vertical Gaussian Doping Profile," IMPACT-2009, pp.52-55, 2009.
- [5] G. Zhang, Z. Shao and K. Zhou, "Threshold voltage model for short channel FD-SOI MOSFETs with vertical Gaussian profile," IEEE Tran. Electron Devices, vol. 55, pp.803-809, 2008.
- [6] 정학기, "비선형도핑분포를 이용한 DGMOSFET의 산화막두께에 대한 문턱전압이하 특성분석," 한국해양정보통신학회 논문지, vol.15, no.7, pp.1537-1542, 2011.
- [7] Z.Ding, G.Hu, H.Gu, R.Liu, L.Wang and T.Ting, "An Analytical Model for the Subthreshold Swing of Double-Gate MOSFETs," IWJT-2010, May 2010.

저자소개



정학기(Hak Kee Jung)

1983.3 아주대학교 전자공학과 B.S.
 1985.3 연세대학교 전자공학과 M.S.
 1990.8 연세대학교 전자공학과
 Ph.D

1995.8 일본 오사카대학 교환교수
 2005.8 호주 그리피스대학 교환교수
 1990.3-현재 군산대학교 전자공학과 교수
 2010.1-현재 한국정보통신학회 총무부회장
 ※ 관심분야: 반도체소자 시뮬레이션, 몬테칼로
 시뮬레이션, 회로및 시스템 해석 등