

Electrical Characteristics of an Optically Controlled N-channel Si-MOSFET for Possible Application to OEICs on Si Substrate

백 강현, 임 석진, 임 광만, 김 동명

국민 대학교 공과 대학 전자 공학부

서울 특별시 성북구 정릉동 861-1

E-mail : dmkim@kmu.koomin.ac.kr

Abstract

In this paper, electrical characteristics of an n-channel Si MOSFET with $L_g=0.6\mu m$ under optical illumination are characterized on wafer. Energetic photons with $\lambda=830nm$, $h\nu=1.494eV$, $P_{opt}=300mW$ are injected near the drain junction, the most photoresponsive region in the device, via optical fiber. We observed significantly increased drain current and transconductance, which is considered to be useful for the implementation of OEICs on Silicon substrate, under optical control with $P_{opt}=300mW$. Optical power-dependent physical mechanisms responsible for the variation of electrical characteristics under optical input are also reported.

I. 서론

광통신을 이용한 고속/대용량 정보처리의 필요성과 관심이 증대되면서 광통신 시스템용 광소자 및 전자소자의 단일칩 구현에 대한 연구가 급격히 증가하고 있으며, 지금까지는 소자 및 회로 동작시의 광 응답시간과 광 발생에 따른 기판재료의 제약으로 인하여 Si기판에 구현된 MOSFET 보다는 GaAs와 InP등의 화합물 반도체 기판에 구현된 PIN photodiode, MSM photodiode 등과 HBT, MESFET, 및 HEMT등에 관한 연구가 진행되었다.

그러나, Si-MOSFET은 화합물 반도체 기판에 구현된 소자들과 비교하여 축적된 제조공정기술, 소자의 안정된 전기적 동작특성, CAD-tool에 의한 회로성능의 모의실험의 용이성과 정확성, 다기능/고성능 집적회로 구현능력 등의 월등한 장점을 가지고 있다. 이미 이러한 장점을 이용하여 microwave device분야에서는 극미세구조 게이트를 가진 MOSFET 소자기술 및 제조공정 기술을 이용, RF LNA, power amplifier, mixer, oscillator 등의 구현에 대한 연구결과가 보고되었다.¹

따라서, Si 기판상에 구현된 고성능 MOSFET의 소자 및 공정기술을 이용한 광-전/전-광 변환회로 구현을 위해서는 Si-MOSFET의 광응답과 물리적 메커니즘에 관한 연구가 필수적이다. 특히, 광발생의 기능보다는 광응답 및 광수신의 특성이 필요한 광통신 시스템의 수신단에서 Si-MOSFET을 이용한 광-전 변환시스템의 구현에 대한 가능성과 활용도는 매우 높을 것으로 평가된다.

특히, 지금까지 optical detector에 대한 연구는 주로 GaAs와 InP등의 화합물반도체 기판에 구현된 FET의 게이트나 HBT/BJT의 베이스 등 제어용 단자에 빛을 인가하여 전기적 특성변화를 유도하였다.^{2,3,4} 그러나, Si-MOSFET에서는 기판재료가 갖는 광응답 양자효율의 비효율성으로 인해 기존의 광-전변환 방법으로는 큰 출력전류(I_D)의 변화를 기대할 수 없다.

따라서, 본 연구에서는 기존의 방법과는 달리 n-channel Si-MOSFET중 전계의 세기가 가장 큰 드레인 접합부근에 광신호를 인가하여 전기적 특성의 변화를 측정하였으며, 광응답 특성에 대한 MOSFET의 물리적 mechanism을 분석하였다.

II. 광제어 신호에 의한 MOSFET의 전기적 특성변화

On-wafer 상태의 n-channel Si-MOSFET 에 전기적 제어 신호만 인가된 경우($P_{opt}=0mW$)와 광제어 신호와 전기적 제어입력이 동시에 인가된 ($P_{opt}=300mW$) 두 경우에 대한 I_D-V_{DS} , I_D-V_{GS} 및 I_G-V_{GS} 특성용 그림 1, 그림 2, 및 그림 3 에 도시하였다.

먼저, 그림 1 에서 $P_{opt}=300mW$ 의 I_D-V_{DS} 특성을 $P_{opt}=0mW$ 의 I_D-V_{DS} 특성과 비교하면, I_D 는 $\sim 370\%$ 의 큰 변화를 보였으며, 작은 값의 drain 전압(V_{DS})이 인가된 선형

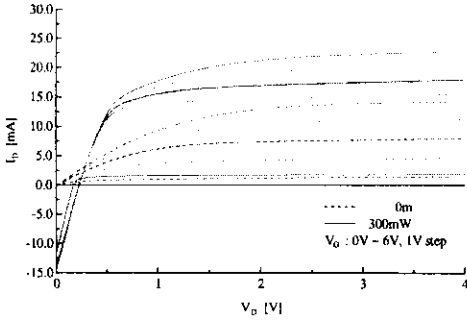


그림 1 $P_{opt}=0mW$ 와 $300mW$ 을 인가한 MOSFET 의 I_D-V_{DS} 특성 비교.

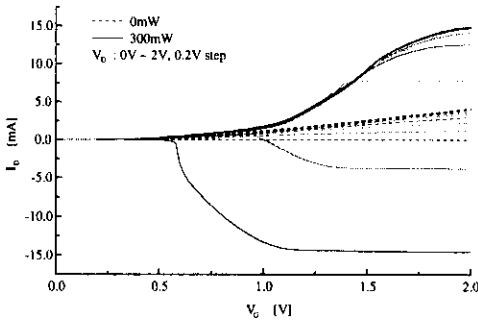


그림 2. $P_{opt}=0mW$ 와 $300mW$ 을 인가한 MOSFET 의 I_D-V_{GS} 특성 비교.

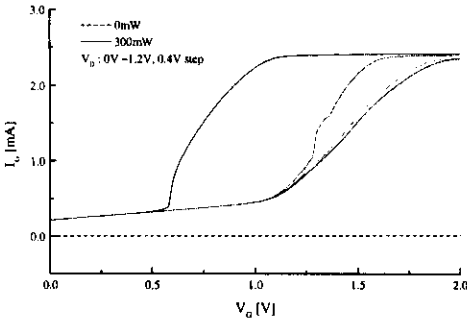


그림 3. $P_{opt}=0mW$ 와 $300mW$ 을 인가한 MOSFET 의 I_G-V_{GS} 특성 비교.

영역 동작의 경우에 음의 방향의 드레인 출력전류(I_D)가 관찰되었으며, MOSFET의 정상적 동작을 위해서는 일정 전압이상의 드레인 전압이 필요하며 이것을 드레인 offset 전압(V_{Dsoff})으로 정의할 수 있다. 또한, 그림 2

의 I_D-V_{GS} 입출력-전달특성에 의하면 I_D-V_{DS} 특성과 같이 작은 드레인 전압이 인가된 선형영역 동작의 경우 드레인 전류가 음의 값을 가지며, 위에서 정의한 V_{Dsoff} 를 그림 2에서도 확인할 수 있다.

또한, 그림 3의 I_D-V_{GS} 특성변화에 의하면 $P_{opt}=0mW$ 경우, 게이트 절연층으로 SiO_2 를 가진 MOSFET에서는 게이트 누설전류가 거의 관찰되지 않으나, $P_{opt}=300mW$ 의 광입사 신호가 인가된 경우 큰 게이트 누설전류가 측정되었다.

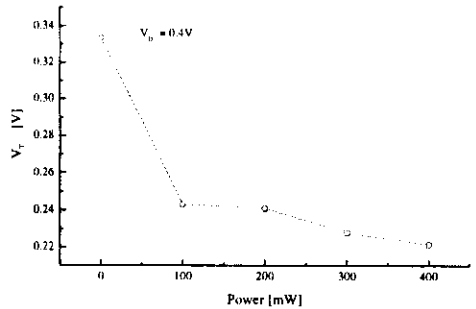
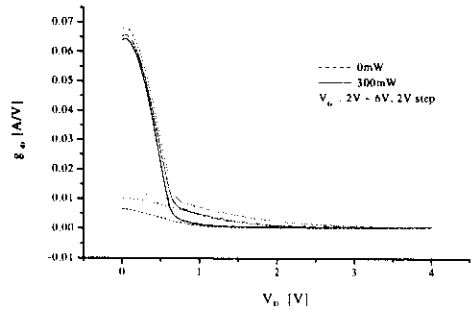
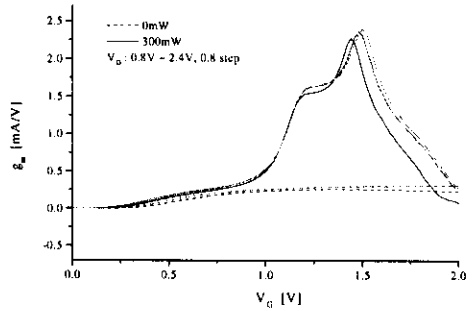


그림 4. 광제어 신호의 인가량에 따른 MOSFET의 transconductance, drain conductance, 및 임계전압 변화

그림 4에서는 $I-V$ 특성을 통하여 MOSFET의 전류 구동능력과 고속/고주파 특성을 결정하는 특성변수로 transconductance (g_m)와 MOSFET의 최대 전압증폭률 ($A_v = g_m r_{ds}$)을 제한하는 drain output conductance ($g_{ds} = 1/r_{ds}$)를 $0mW$ 와 $300mW$ 경우에 대하여 비교, 분석하였다. Transconductance는 $\sim 770\%$ 의 변화를, 선형영역에서의 drain conductance ($g_{ds} = 1/r_{ds}$)는 $\sim 640\%$ 의 변화를 보였다.

Si-MOSFET의 전기적 특성을 결정하는 주요 특성변수의 하나인 임계전압(V_T)의 변화는 $P_{opt} = 400mW$ 일 때의 임계전압이 $P_{opt} = 0mW$ 일 때보다 $0.12V$ 가 감소한 $V_T = 0.22V$ 가 측정되고 선형영역에서의 Sub-threshold slope는 $P_{opt} = 400mW$ 일 때가 $P_{opt} = 0mW$ 인 경우에 비하여 $0.010V/decade$ 만큼 감소한 $S = 0.100V/decade$ 로 측정되었다. 즉, 스위칭 특성의 개선과 더불어 "OFF"상태에서의 subthreshold 드레인 누설전류에 의한 전력소모가 개선됨을 확인할 수 있었다.

III. 광제어 신호와 MOSFET의 전기적 특성변화 관련 메커니즘 분석

N-channel Si-MOSFET에 광제어 신호가 인가된 경우의 전기적 특성의 변화와 관련된 물리적 메커니즘을 설명하기 위한 소자의 구조를 그림 5에 나타내었다.

그림 5(a)에 도시한 바와 같이 드레인 부근의 가전자 대역 전자가 광에너지 흡수하여 전도대역으로 천이될 수 있도록 충분한 에너지의 photon을 전계의 세기가 가장 큰 영역인 드레인 접합부근에 인가하게 된다. 이때 생성된 excess electron-hole pair에 의해서 드레인 영역의 excess minority carrier 농도가 증가하게 되고, ambipolar transport equation에 의하여 excess carrier의 확산방향과 전류의 양이 결정된다. 이때 드레인 전압에 의하여 형성된 채널영역 내의 수평방향 전계가 매우 작은 경우(선형영역 동작)에는 수평전계에 의한 채널 전자의 드리프트(drift)에 의한 전류보다 채널 내의 드레인측과 소스측의 농도차이로 인해 발생하는 확산(diffusion) 전류가 지배적이기 때문에 드레인 전류가 음의 값을 가지게 된다.

그림 5(b)에는 그림 5(a)의 A-A' 단면부근에서 광제어

신호에 의해 생성된 전자가 얇은 SiO_2 의 에너지 장벽을 극복하여 게이트 누설전류를 형성하는 과정을 개략적으로 도시하였다.

게이트 누설전류는 얇은 게이트 절연층 SiO_2 와 n^+ 로 높게 도핑된 드레인의 중첩된 영역에서 photon에 의해 생성된 excess carrier들이 $h\nu = 1.494eV$ 의 운동에너지를 가지게 된다. 또한, 게이트 인가전압 V_{GS} 의 증가에 따른 SiO_2 양단의 전위차 V_{OX} 의 증가는 SiO_2 의 전도대역 에너지 준위의 기울기를 크게 증가시켜 SiO_2 의 삼각형

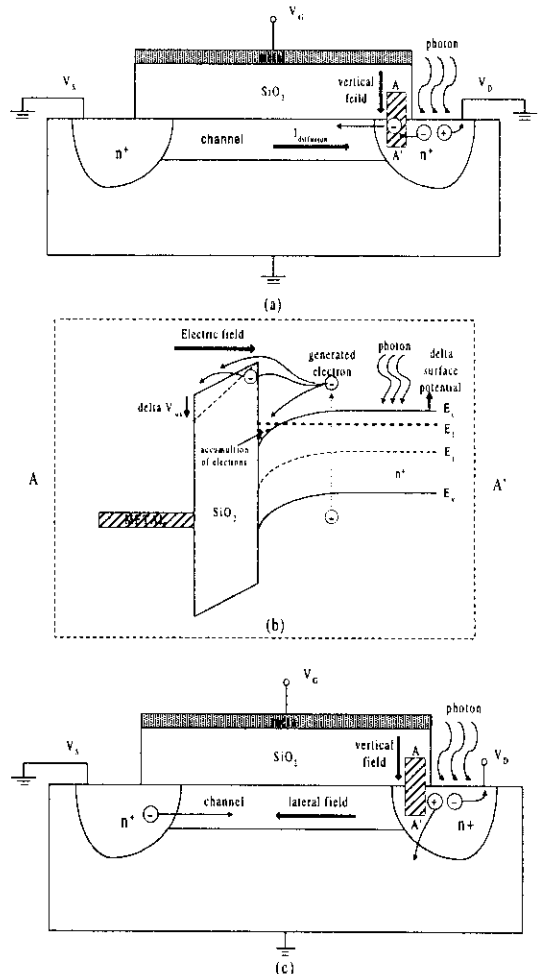


그림 5. 광제어 신호가 인가된 $L_g = 0.6 \mu m$ MOSFET의 광응답 특성에 기여하는 메커니즘.
 (a) 드레인에서의 전자 농도 변화에 따른 확산전류가 I_D 를 결정할 경우.
 (b) 그림 5(a)의 A-A'부분에 대한 물리적 메커니즘 (드레인과 SiO_2 의 계면에서의 전자 이동 경로.)
 (c) V_{DS} 에 의한 드리프트 전류가 I_D 를 결정할 경우.

에너지장벽구조를 통한 전자의 Fowler-Nordheim tunneling 또한 보다 쉽게 이루어지게 된다. 따라서, 입사광 세기의 증가에 따라 tunneling에 기여하는 carrier의 수는 급격히 증가하게 되며 게이트 누설전류가 급격히 증가하게 된다.

또한, 드레인에 인가된 전압 V_{DS} 가 점점 증가하여 채널내 수평방향의 전계가 증가하면, 그림5(c)에서와 같이 광제어 신호에 의하여 생성된 전자들은 높은 수평방향의 전계에 의해 이동하게 되고, 이런 전자의 드리프트 현상이 지배적으로 드레인 전류의 형성에 기여하게 된다. 따라서, excess carrier 농도차이에 의해 발생한 확산전류는 수평방향의 전계에 의해 형성된 드리프트 전류에 비하여 무시할 수 있으며 이때의 증가된 드레인 전류는 수평전계의 방향과 일치하게 된다. 이는 게이트 전압에 의한 채널영역 전자의 농도와 광입사시의 광생성 전자의 상대적 크기가 확산과 드리프트의 상대적 기여에 영향을 미치기 때문인 것으로 해석할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 $L_g=0.6\mu\text{m}$ 인 Si-MOSFET의 광응답이 가장 우수할 것으로 기대되는 드레인 접합부근에 Silicon의 에너지 밴드갭보다 큰 광제어 신호 ($\lambda=830\text{nm}$, $h\nu=1.494\text{eV}$, $P_{opt}=300\text{mW}$)을 인가하여 전기적 특성, 광응답 특성, 및 그에 따른 소자 특성변수의 변화를 측정하고 그에 관련된 물리적 메커니즘을 분석하였다. 광제어 신호가 인가된 경우(300mW)와 그렇지 않은 경우(0mW)에 비하여 동일한 전기적 bias 조건에서 I_D 는 ~370%의 변화를 관찰하였다. 또한, g_m 은 ~770%의 변화를, 선형영역에서의 g_{DS} 는 ~640%의 변화를 보였고, 광 기전력효과에 의한 임계전압과 subthreshold slope이 개선되어 스위칭 특성의 개선과 "OFF"상태에서의 subthreshold 드레인 누설전류에 의한 전력소모가 개선됨을 확인하였다.

이러한 특성은 광제어 신호에 의해 드레인 접합부근에서 생성된 전자가 드레인 전압과 게이트 전압에 의해서 지배되고, 소오스에서 전자들의 이동과

드레인 영역에서 광제어 신호에 의해 생성된 전자들의 이동에 의해 드레인 전류 I_D 가 결정되기 때문이다. 반면, 드레인 전압이 일정 전압(V_{DSoff})보다 작은 전압이 인가된 경우에는 소오스와 드레인사이의 전자의 농도차이로 인한 확산전류가 우세하여 음의 방향의 드레인 전류가 관찰되었다. 또한, 광제어 신호에 의한 비정상적인 게이트 누설전류의 증가는 충분한 운동에너지를 가지고 생성된 전자들로 인하여 SiO_2 와 드레인의 중첩된 영역에서 FN-tunneling이 일어나기 때문으로 해석하였다.

본 논문의 결과를 통해서, Si-MOSFET의 게이트 길이가 deep submicron의 극미세 구조를 가질 수 있도록 공정기술이 발전하여 채널전자의 채널영역 통과시간이 개선되고, 이를 이용한 초고주파 영역에서의 응용에 대한 연구가 활성화되면, 본 연구 결과를 Si-MOSFET의 광응답 특성을 이용한 광-전 초고주파 (microwave photonics)회로 및 집적시스템 구현에 활용이 가능할 것으로 기대된다.

References

- [1] J. Costa et al., "Silicon MOSFETs, the microwave device technology for the 90's.", *IEEE MTT-S Digest*, pp.545-548, 1993.
- [2] S. H. Song et al., "Photonic microwave characteristics and modeling of an $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}/\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ double heterostructure pseudomorphic HEMT", *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.*, vol.8, no.1, pp.35-37, 1998.
- [3] R.B. Darling, "Optical gain and large signal characteristics of illuminated GaAs MESFET's", *IEEE J. of Quantum Electron.*, vol. QE-23, no.7, pp.1160-1171, 1987.
- [4] M. A. Romero, "Negative photoreponse in modulation doped field effect transistors (MODFET's): theory and experiment", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 43, no. 3, pp.511-517, 1995.
- [5] K. Ayadi et al., "A monolithic optoelectronic receiver in standard $0.7\mu\text{m}$ CMOS operating at 180MHz and 176-fJ light input energy", *IEEE Photonics Tech. Lett.*, vol.9, no.1, pp. 88-90, 1997.