

나노구조 실리콘 소자의 임팩트이온화 모델 분석

고석웅^{*} · 임규성^{**} · 정학기^{*}

^{*}군산대학교

^{**}백제병원

Analysis of Impact Ionization Model for Nano structure Silicon device

Suk-woong Ko^{*} · Gyu-sung Lim^{**} · Hak-kee Jung^{*}

^{*}Kunsan National University

^{**}Back-Jae Hospital

E-mail : a-molla@hanmail.net

요 약

최근 반도체 기술의 발달로 소자의 크기가 줄어들면서 높은 에너지를 갖는 핫 캐리어 전송 해석이 매우 중요하게 되었다. Auger 과정과는 반대인 임팩트이온화현상은 핫 캐리어에 의한 산란에 의하여 전자-정공쌍을 생성하는 과정으로 소자의 전송특성 해석을 위한 시뮬레이션에 정확한 임팩트이온화모델이 필수적이다. 본 연구에서는 Monte Carlo 시뮬레이터를 이용한 임팩트이온화 모델과 TCAD 그리고 Micro-Tec을 이용한 임팩트이온화 모델을 분석하여 보다 정확한 임팩트이온화 모델을 제시하고자 한다.

ABSTRACT

Recently, as device techniques are advancing and its size become smaller, the hot carriers transport analysis has more important. Impact ionization(I.I.) effect is electron-hole pair generation process by the dispersion of hot carrier in the contrast with Auger process. Complete I.I. model is essential to simulate and analysis the device transport characteristics. In the study, we will try to analysis I.I. models using Monte Carlo simulator, TCAD and Micro-Tec and present more accurate I.I. model.

I. 서 론

최근 소자의 집적도가 증가하고, 소자들의 크기가 스케일링 이론(scaling theory)에 의해서 단위 면적당 집적도가 높아졌다. 그런데 소스와 드레인 접합 깊이가 얇아지면서 소스와 드레인 저항이 증가하여 소자 성능이 떨어지므로 저항이 얇은 접합 기술이 필요하게 되었으며 또한 얇은 접합에서는 드레인 영역이 고농도가 되므로 드레인 접합 부근에서 전계가 높아지게 되어 고온 캐리어효과(hot carrier effect)가 일어난다. 임팩트이온화현상은 이 고온 캐리어에 의한 산란으로 전자-정공쌍이 생성되어 소자의 전자 전송특성에 영향을 미치게된다[1]-[2].

본 연구에서는 nMOS를 이용하여 임팩트 이온화 현상을 고찰하여 이 임팩트이온화가 소자에 어떠한 영향을 미치는지를 TCAD와 Micro-Tec시

뮬레이터를 이용하여 분석함으로써 보다 정확한 임팩트이온화 모델을 제시하고자 한다.

II. 본 론

본 연구에서는 임팩트이온화 현상을 고찰하기 위하여 V_{gs} 를 0V로 고정시키고 V_{ds} 를 1~14V까지의 변화를 고찰하였다. 먼저 임팩트이온화 모델을 적용시키지 않은 nMOS를 시뮬레이션하여 임팩트이온화현상을 고찰하였고, 다음으로 임팩트이온화 모델을 적용하여 시뮬레이션하여 결과를 유도하였다. 또한 여기에 임팩트이온화 파라미터에 대하여 디폴트값을 사용하여 시뮬레이션 하였고, 보다 정확한 임팩트이온화 모델을 조사하기 위하여 임팩트이온화 파라미터와 임팩트 이온화계수값들을

조정하여 임팩트이온화 현상을 고찰하였다.

본 연구에서 사용된 임팩트이온화 모델식은 TCAD 경우 다음과 같이 Kane[3]의 형태로 쓰여졌다.

$$S_n(\mathbf{k}, n) = \frac{2\pi}{\hbar} \sum_{n,n'} \sum_{a,a'} \sum_{\mathbf{k},\mathbf{k}'} |M_{ee}|^2 \delta(E_{n'} + E_{n'} - (E_n + E_n)) \quad (1)$$

여기서 M_{ee} 는 행렬요소로

$$M_{ee}(1, 2; 3, 4) = \langle \mathbf{k}_{3n3a}; \mathbf{k}_{4n4a} | V_{ee} | \mathbf{k}_{1n1a}; \mathbf{k}_{2n2a} \rangle \quad (2)$$

이고 행렬요소 계산시 전자사이의 상호작용은 다음과 같은 쿨롱포텐셜식을 이용하였다.

$$V_{ee}(\mathbf{q}, \omega) = \varepsilon^{-1}(\mathbf{q}, \omega) \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 q^2} \quad (3)$$

여기서 $\varepsilon(\mathbf{q}, \omega)$ 는 파수와 주파수에 의존하는 유전함수로 다음과 같이 표현된다.

$$\varepsilon(\mathbf{q}, \omega) = 1 + \frac{1}{\epsilon_0 q^2} \sum_{\mathbf{k}, n, n'} \frac{f_n(\mathbf{k}) - f_n(\mathbf{k} + \mathbf{q})}{E_n(\mathbf{k} + \mathbf{q}) - E_n(\mathbf{k}) - \hbar\omega + i\alpha} \times \langle \mathbf{k} + \mathbf{q}, n' | e^{i\mathbf{q} \cdot \mathbf{r}} | \mathbf{k}, n \rangle \quad (4)$$

그러나 식 (1)은 계산이 너무 복잡하고 계산소요 시간이 너무 걸리므로 다음과 같은 Keldysh[4]공식을 사용하였다.

$$S_{ii}(E) = P \left(\frac{E - E_T}{E_T} \right)^x \quad (5)$$

여기서 P는 조정된 값들을 사용하였으며, x는 1과 2사이 값을 사용하였다. E_T 는 문턱에너지로 다음과 같다.

$$E_T = E_g \left(\frac{m_v^* + 2m_c^*}{m_v^* + m_c^*} \right) \quad (6)$$

여기서 v 와 c 는 각각 가전자대와 전도대를 나타낸다.

Micro-Tec에서 사용된 임팩트이온화 모델식은

다음과 같은 Chynoweth model[5]을 사용하였다.

$$G_{av} = \alpha_n |J_n| + \alpha_p |J_p| \quad (7)$$

여기서 임팩트이온화 파라미터 α_n 은 다음과 같이 쓰여졌다.

$$\alpha_n = a_n \exp\left(\frac{-b_n |J_n|}{|(E \cdot J_n)|}\right) \quad (8)$$

$$\alpha_p = a_p \exp\left(\frac{-b_p |J_p|}{|(E \cdot J_p)|}\right)$$

여기서 a_n 과 a_p 는 각각 임팩트이온화계수를 나타내며 본 연구에서는 정공과 관련된 항들은 사용하지 않았으며, 여기에서 사용된 파라미터 값들은 표 1에 나타내었다.

표 1. 임팩트이온화 파라미터 값과 이온화 계수

Sym.	Default	Exp.	Units	Description
E_0	0.0	0.0	V/cm	0- E_0 범위의 전계
E_1	$4.0 \cdot 10^5$	$2.0 \cdot 10^4$	V/cm	E_0 - E_1 범위의 전계
E_2	$6.0 \cdot 10^5$	$5.0 \cdot 10^4$	V/cm	E_1 - E_2 범위의 전계
b_n^0	0.0	$1.0 \cdot 10^4$	V/cm	0- E_0 범위의 지수
b_n^1	$1.4 \cdot 10^4$	$1.4 \cdot 10^5$	V/cm	E_0 - E_1 범위의 지수
b_n^2	$1.4 \cdot 10^4$	$1.4 \cdot 10^5$	V/cm	E_1 - E_2 범위의 지수
b_n^3	$1.4 \cdot 10^4$	$1.4 \cdot 10^5$	V/cm	E_2 - 범위의 지수
a_n^0	0.0	0.0	1/cm	0- E_0 범위의 계수
a_n^1	$7.0 \cdot 10^5$	$4.0 \cdot 10^4$	1/cm	E_0 - E_1 범위의 계수
a_n^2	$7.0 \cdot 10^5$	$4.0 \cdot 10^4$	1/cm	E_1 - E_2 범위의 계수
a_n^3	$7.0 \cdot 10^5$	$4.0 \cdot 10^4$	1/cm	E_2 - 범위의 계수

또한 본 연구에서는 게이트길이(L_g)는 1.5 μ m로 했으며, 소스길이(L_s)와 드레인 길이(L_d)는 0.5 μ m 이고 산화층 두께(O_{th})는 0.02 μ m 값을 사용하였다. 그리고 각 영역의 도핑 방법은 Gaussian 함수에 따라 도핑하였다.

임팩트이온화 모델을 적용하지 않고 시뮬레이션한 결과(a)와 임팩트이온화 모델이 적용하여 시뮬레이션한 결과(b), 그리고 임팩트이온화 파라미터와 임팩트이온화계수를 조정하여 시뮬레이션한 결과(c)를 그림 1.1에 보여주고 있다. 그림 1.1(a)에서 알수 있듯이 임팩트이온화모델을 적용하지 않은 nMOS인 경우 임팩트이온화 현상이 일어나지 않았다. 이것은 전자 전송이 거의 일어나지 않

음을 보여주고 있다.

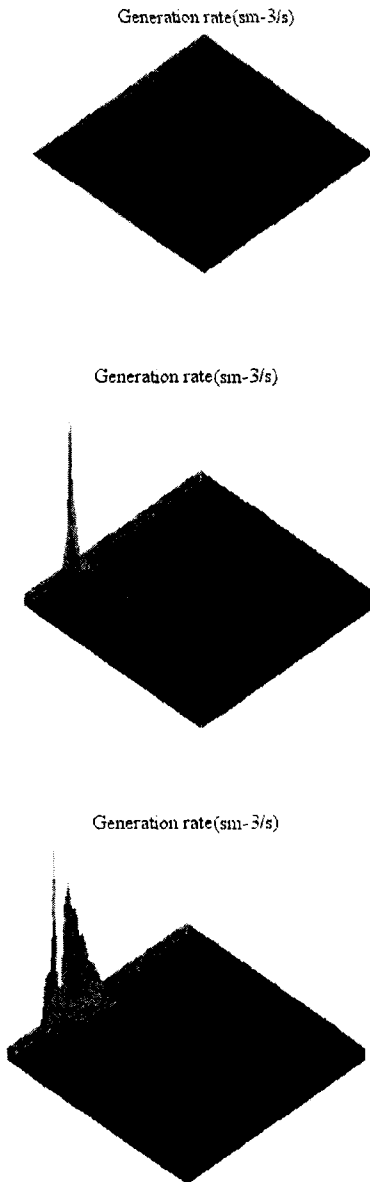


그림 1.1 임팩트이온화 모델이 적용되지 않은 nMOSFET의 임팩트이온화율(a), 임팩트이온화 모델이 적용된 임팩트이온화율(b), 임팩트이온화 파라미터와 임팩트이온화계수를 조정한 임팩트이온화율(c)
또한 그림 1.1(b)는 임팩트이온화 모델이 적용되

면 드레인 영역에서 약간의 임팩트이온화가 발생함을 알 수 있고, 그림 1.1(c)는 표 1에서 보여준 임팩트이온화의 파라미터와 임팩트이온화 계수를 조정하였을 때 더욱 많은 임팩트이온화가 일어남을 알 수 있다. 따라서 소자의 전자전송 특성을 해석하기 위해서는 임팩트이온화모델이 필수적임을 알 수 있다.

본 연구에서는 게이트전압(V_{gs})을 0V에서 3V까지 변화시키면서 임팩트이온화의 파라미터와 계수 값이 조정된 경우를 시뮬레이션 한 결과를 그림 1.2에 나타내었다.

(a)

(b)

(c)

그림 1.2 임팩트이온화의 파라미터와 계수가 조정된 상태에서 게이트전압 V_{gs} 를 0V에서 3V까지 조정한 임팩트이온화율

그림 1.2에서 알 수 있듯이 임팩트이온화현상이 많이 발생하는 상태에서 게이트전압을 0V에서 3V까지 변화시켰을 때 드레인 영역과 소스 영역에서 활발하게 임팩트이온화가 발생함을 알 수 있다.

III. 결론

본 연구에서는 nMOSFET의 임팩트이온화현상을 고찰하기 위하여 Micro-Tec 시뮬레이터를 이용하여 임팩트이온화 모델이 적용되지 않은 경우와 임팩트이온화 모델이 적용된 경우 그리고 임팩트이온화의 파라미터값들과 임팩트이온화 계수값들을 조정하여 임팩트이온화현상을 분석하였다.

그 결과 전자전송특성을 해석하기 위해서는 임팩트이온화모델이 필수적이며 보다 정확한 임팩트이온화 모델, 즉 적당한 임팩트이온화의 파라미터 값과 임팩트이온화 계수값들이 소자의 시뮬레이션에 사용되어야함을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] R. H. Dennard et al., IEEE Journal of Solid-State Circuits, SC-19, 256, October 1974
- [2] T. Kunikiyo, M. Takenaka, Y. Kanakura, M. Yamaji, H. Mizuno, M. Morifuji, K. Taniguchi, and C. Hamaguchi, "A Monte Carlo simulation of anisotropic electron transport in silicon including full band structure and anisotropic impact ionization model." J. Appl. Phys. vol. 75, pp.297-312, 1994
- [3] E. O. Kane. Phys. Rev., vol. 129, p.624, 1967
- [4] L. V. Keldysh. Concerning the theory of impact ionization in semiconductor, Soviet Physics JETP, vol. 21, no.6, pp.1135-44, 1965
- [5] A. G. Chynoweth, "Ionization rates for electrons and holes in silicon", Phys. Rev., vol. 109, pp.1537-40, 1958