

# 개선된 Wigner 함수 수치 모델을 이용한 양자소자의 과도응답해석

## (Transient Response Analysis of Quantum Devices Using Improved Numerical Model of Wigner Function)

金京濂\*, 權宅靖\*, 李竝浩\*

(Kyoung-Youm Kim, Taek-jung Kwon, and Byoungho Lee)

### 요 약

기존의 Wigner 함수 이산 모델이 갖게 되는 수치 에러를 보완하면서 동시에 유효질량의 공간적 변화의 영향을 포함하는 새로운 수치 모델을 제안하고 이 모델을 이용하여 공명터널링 다이오드의 과도응답 특성을 해석한다.

### Abstract

Discretization method and numerical calculations of Wigner function to introduce the influence of spatially varying effective mass as well as to reduce the errors involved in the conventional discretization model are presented. Using this new discrete model, the transient responses of resonant-tunneling-diode are analyzed.

### I. 서 론

반도체 제조 공정이 발달함에 따라 소자의 크기가 작아지면서 소자 특성에서 양자역학적 효과가 차지하는 비중이 점점 더 크게 되었다. 고전적인 범주의 반도체 소자를 분석할 때 사용되던 Boltzmann 전송 방정식은 이런 양자역학적 현상이 지배적인 미세 구조 소자에 대해서는 정확한 기술을 할 수 없다. 이런 양자소자들을 해석하기 위한 양자역학에 바탕을 둔 전송 이론으로 Wigner 함수 모델<sup>[1]</sup>이 제안되었으며 최근 양자소자, 특히 공명터널링 다이오드(RTD)의 동작 특성 해석에 사용되어 그 유용함이 증명되었다<sup>[2-4]</sup>. Wigner 함수 모델은 RTD의 정상상태의 해석과 과도 응답 해석을 모두 수행할 수 있다. 정상상태의 해

석은 전류-전압 특성 곡선(current-voltage(I-V) characteristic curves) 계산의 형태로 수행되는 데 기존의 여러 수치 모델을 이용한 I-V 곡선의 계산 결과는 순수한 양자역학적 결과인 부정 저항 구간(negative differential-conductance regions)의 존재를 보여주지만 실험치와의 주요 비교 대상(figure of merit)이 되는 peak-to-valley 전류비율(PVR)은 터널링 이론을 이용한 결과나 실험치보다 작았다<sup>[5]</sup>. Tsuchiya 등은 유효질량의 공간적 변화를 Wigner 함수 모델에 도입하여 PVR을 개선했다<sup>[3]</sup>. 하지만 그들은 수치모델로 기존의 first-order upwind-downwind 미분 방식(UDS; upwind-downwind differencing scheme)을 사용했는데, Buot와 Jensen은 UDS가 갖게 되는 수치 에러가 상당히 크다는 것을 이미 보였다<sup>[4]</sup>. Buot와 Jensen은 유효질량이 일정하다는 가정하에 second-order 미분 방식(SDS; second-order differencing scheme)을 사용한 수치 모델을 이용하여 RTD의 정상상태와 과도 응답을 계

\* 正會員, 서울大學校 電氣工學部

(School of Electrical Engineering, Seoul National University)

接受日字:1997年2月28日, 수정원료일:1997年12月30日

산했는데<sup>[4]</sup>, 그 결과 계산된 PVR은 터널링 이론을 사용한 기존의 이론 결과와 상당히 잘 일치하지만 여전히 실험치보다는 작았다. 최근에 저자들은 유효질량의 공간적 변화를 포함하면서 동시에 SDS에 바탕을 둔 Wigner 함수의 새로운 수치 모델을 제안했다<sup>[6]</sup>. 그리고 SDS 뿐만 아니라 유효질량의 공간적 변화가 Wigner 함수 수치 모델에 포함되어야만 실험값을 잘 예측할 수 있음을 보였다<sup>[6]</sup>. 즉, 유효질량의 공간적 변화가 소자의 특성에 큰 영향을 미친다는 것을 보였다.

이 논문에서는 최근 저자들이 새롭게 제안한 모델을 이용하여 RTD의 과도응답을 해석하려고 한다. SDS 뿐만 아니라 유효질량의 공간적 변화가 RTD의 과도응답에 어떤 역할을 하게 되는지 살펴보고자 한다. Buot와 Jensen<sup>[4]</sup>은 SDS를 이용한 수치 모델을 통한 RTD의 과도응답해석에서 기존의 UDS에 바탕을 둔 모델링에 비해 정상상태에 이르는 시간(settling time)이 상당히 길다는 것을 보였는데, 이는 UDS 모델에서는 수치 에러 때문에 무시되는 국부적인 전류밀도의 동요(local fluctuation) 때문이다. 여기서는 유효질량의 공간적 변화 역시 추가적인 전류밀도의 동요를 주게 되어 정상상태에 도달하는 시간이 이를 고려하지 않은 경우<sup>[4]</sup>에 비해 상당히 길어짐을 보일 것이다.

## II. 개선된 Wigner 함수 수치 모델

유효질량의 공간적 변화를 포함하는 Wigner 함수는 다음과 같이 주어진다<sup>[3]</sup>.

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(x, k, t)}{\partial t} = & \hbar \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dk'}{8\pi} M_1(x, k-k') \frac{\partial f(x, k', t)}{\partial x} \\ & - \hbar \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dk'}{4\pi} k' M_2(x, k-k') f(x, k', t) \\ & + \hbar \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dk'}{16\pi} M_3(x, k-k') \left[ \frac{\partial^2 f(x, k', t)}{\partial x^2} - 4k'^2 f(x, k', t) \right] \\ & - \hbar \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dk'}{4\pi} k' M_4(x, k-k') \frac{\partial f(x, k', t)}{\partial x} \\ & - \frac{1}{\hbar} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dk'}{2\pi} V(x, k-k') f(x, k', t). \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $f(x, k, t)$ 는 Wigner 함수이고

$$M_1(x, k-k') = 2 \int_0^{\infty} d\xi \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{m^+(x, \xi)} \right) \sin[(k-k')\xi], \quad (2a)$$

$$M_2(x, k-k') = 2 \int_0^{\infty} d\xi \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{m^+(x, \xi)} \right) \cos[(k-k')\xi], \quad (2b)$$

$$M_3(x, k-k') = 2 \int_0^{\infty} d\xi \frac{\sin[(k-k')\xi]}{m^-(x, \xi)}, \quad (2c)$$

$$M_4(x, k-k') = 2 \int_0^{\infty} d\xi \frac{\cos[(k-k')\xi]}{m^+(x, \xi)}, \quad (2d)$$

$$V(x, k-k') = 2 \int_0^{\infty} d\xi \left[ v(x+\frac{1}{2}\xi) - v(x-\frac{1}{2}\xi) \right] \sin[(k-k')\xi], \quad (3)$$

$$\frac{1}{m^-(x, \xi)} = \frac{1}{m(x+\frac{1}{2}\xi)} - \frac{1}{m(x-\frac{1}{2}\xi)}, \quad (4a)$$

$$\frac{1}{m^+(x, \xi)} = \frac{1}{m(x+\frac{1}{2}\xi)} + \frac{1}{m(x-\frac{1}{2}\xi)}, \quad (4b)$$

이다. 위의 식에서  $v$ 와  $m(x)$ 는 각각 포텐셜 에너지와 공간적으로 변하는 유효질량이다. 자세한 것은 참고문헌 3에 설명되어 있다.

식 (1)의 수치해는 유한 차분법(finite-difference method)을 통해 수치적으로 구할 수 있다. 위치좌표인  $x(0 \leq x \leq L, L$ 은 소자의 길이)는 mesh spacing이  $\Delta_x (= L/(N_x-1))$ 로 균일하게 주어지도록  $N_x$ 개의 mesh point로 나누고, 파동함수 혹은 연산자는 이 mesh point 위에서만 정의된다고 생각한다. 포텐셜이  $\Delta_x$ 의 정수 배의 위치에서만 정의되므로 식 (3)의 포텐셜 연산자가 의미를 지니려면 상대좌표인  $\xi$ 는 mesh 간격이  $2\Delta_x$ 로 균일하게 주어지도록 나누어야 한다.  $\xi$ 에 대해 Fourier 변환을 취했으므로  $k$ -공간 ( $-\pi/2\Delta_x \leq k \leq \pi/2\Delta_x$ )에 대해서는  $\Delta_k = \pi/N_x\Delta_x$ 로 주어지도록  $N_k$ 개의 mesh point로 나눈다( $k_j = \pi/\Delta_x[(j-0.5)/N_k-0.5], j=1, 2, \dots, N_k$ ).

식 (1)의 미분 연산자를 discretize할 때 UDS의 경우에는

$$\frac{\partial}{\partial x} f(x, k, t) = \pm \left[ \frac{f(x \pm \Delta_x, k, t) - f(x, k, t)}{\Delta_x} \right], \quad (5)$$

를 이용하며<sup>[2]</sup>(여기서 부호는 각각 upwind-downwind direction<sup>[2]</sup>을 의미한다.) SDS의 경우

$$\frac{\partial}{\partial x} f(x, k, t) = \mp \left[ \frac{3f(x, k, t) - 4f(x \pm \Delta_x, k, t) + f(x \pm 2\Delta_x, k, t)}{2\Delta_x} \right]. \quad (6)$$

를 이용한다<sup>[4]</sup>. SDS를 사용하면 식 (1)-(4)는 다음과 같이 바뀐다<sup>[6]</sup>.

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \hbar \sum_k \frac{M_1(x, k-k')}{2\Delta_x}$$

$$\begin{aligned}
& \times \begin{cases} -3f(x, k') + 4f(x + \Delta_x, k') - f(x + 2\Delta_x, k'), & k' < 0 \\ 3f(x, k') - 4f(x - \Delta_x, k') + f(x - 2\Delta_x, k'), & k' > 0 \end{cases} \\
& - \hbar \sum_k k' M_2(x, k - k') f(x, k') \\
& + \hbar \sum_k \frac{M_3(x, k - k')}{\Delta_x^2} [f(x + \Delta_x, k') \\
& - 2(1 + 2\Delta_x^2 k'^2) f(x, k') + f(x - \Delta_x, k')] \\
& - \hbar \sum_k \frac{k' M_4(x, k - k')}{2\Delta_x} \\
& \times \begin{cases} -3f(x, k') + 4f(x + \Delta_x, k') - f(x + 2\Delta_x, k'), & k' < 0 \\ 3f(x, k') - 4f(x - \Delta_x, k') + f(x - 2\Delta_x, k'), & k' > 0 \end{cases} \\
& - \frac{1}{\hbar} \sum_k V(x, k - k') f(x, k') \\
& \equiv \mathcal{T} f(x, k), \tag{7}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_1(x, k - k') &= \frac{1}{4N_k \Delta_x} \sum_{\xi} \sin[(k - k')\xi] \\
& \times \begin{cases} \frac{3}{m^-(x, k')} - \frac{4}{m^-(x - \Delta_x, k')} + \frac{1}{m^-(x - 2\Delta_x, k')}, & k' < 0 \\ -\frac{3}{m^-(x, k')} + \frac{4}{m^-(x + \Delta_x, k')} - \frac{1}{m^-(x + 2\Delta_x, k')}, & k' > 0 \end{cases}. \tag{8a}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_2(x, k - k') &= \frac{1}{2N_k \Delta_x} \sum_{\xi} \cos[(k - k')\xi] \\
& \times \begin{cases} \frac{3}{m^+(x, k')} - \frac{4}{m^+(x - \Delta_x, k')} + \frac{1}{m^+(x - 2\Delta_x, k')}, & k' < 0 \\ -\frac{3}{m^+(x, k')} + \frac{4}{m^+(x + \Delta_x, k')} - \frac{1}{m^+(x + 2\Delta_x, k')}, & k' > 0 \end{cases}. \tag{8b}
\end{aligned}$$

$$M_3(x, k - k') = \frac{1}{4N_k} \sum_{\xi} \frac{\sin[(k - k')\xi]}{m^-(x, \xi)}, \tag{8c}$$

$$M_4(x, k - k') = \frac{1}{N_k} \sum_{\xi} \frac{\cos[(k - k')\xi]}{m^+(x, \xi)}, \tag{8d}$$

$$V(x, k - k') = \frac{2}{N_k} \sum_{\xi} \sin[(k - k')\xi] [v(x + \frac{1}{2}\xi) - v(x - \frac{1}{2}\xi)]. \tag{9}$$

식 (7)에서 Wigner 함수  $f(x, k, t)$ 를 편의상  $f(x, k)$ 로 나타내었다.

위의 수치 모델이 유효질량이 일정할 경우 참고문헌 4에서 제시된 모델과 같아져야 한다는 조건<sup>[3]</sup>을 만족시키기 위해 우리는  $M_4$ 를 DC와 AC 부분으로 다음과 같이 나누었다<sup>[6]</sup>.

$$M_4(x, k - k') = \frac{1}{N_k} \sum_{\xi} \frac{\cos[(k - k')\xi]}{m^+(x, \xi)}$$

$$\begin{aligned}
& = \frac{1}{N_k} \sum_{\xi} \cos[(k - k')\xi] \left\{ \frac{1}{m^+(x, \xi)} - \frac{1}{M_c} \right\} \\
& + \frac{1}{N_k} \sum_{\xi} \cos[(k - k')\xi] \cdot \frac{1}{M_c}. \tag{10}
\end{aligned}$$

여기서  $M_c$ 는  $1/m^+(x, \xi)$ 의 일정한 non-zero offset 값이고 우리가 가정한 소자(다음장에서 설명되고 있다)에서는  $2/m_{GaAs}$ 에 해당한다. DC 부분에는  $k = k'$  일 경우  $N_{\xi}$ 를  $N_k/2$ 로,  $k \neq k'$ 일 경우  $N_k$ 로 두었고, AC 부분에는  $N_{\xi}$ 를  $N_k/2$ 로 두었다.  $k \neq k'$ 일 경우 DC 부분은 0이 되는데 이는

$$\begin{aligned}
\sum_{\xi} \cos[(k - k')\xi] &= \sum_{\xi} \cos \left[ \frac{\pi}{\Delta_x} \cdot \frac{n_k - n_{k'}}{N_k} \cdot 2\Delta_x n_{\xi} \right] \\
&= \sum_{n_{\xi}} \cos \left[ \frac{2\pi}{N_k} \cdot (n_k - n_{k'}) \cdot n_{\xi} \right] = 0, \tag{11}
\end{aligned}$$

이기 때문이다.(여기서  $k = \pi/\Delta_x \cdot [(n_k - 0.5)/N_k - 0.5]$ ,  $\xi = 2\Delta_x \cdot n_{\xi}$ 가 사용되었으며  $n_k$ 와  $n_{k'}$ 는 양의 정수이다).

전류밀도는 다음과 같이 non-local한 형태로 정의된다<sup>[6]</sup>.

$$\begin{aligned}
j(x + \frac{1}{2}\Delta_x, t) &= e \frac{A_k}{4\pi} \sum_{k, k'} \hbar k' M_4(x, k - k') \\
& \times \begin{pmatrix} 3f(x + \Delta_x, k', t) - f(x + 2\Delta_x, k', t), & k' < 0 \\ 3f(x, k', t) - f(x - \Delta_x, k', t), & k' > 0 \end{pmatrix}. \tag{12}
\end{aligned}$$

이제 과도응답해석을 위한 수치모델에 대해 살펴보자. 식 (1)의 시간에 대한 미분을 역시 SDS에 의해 이산화하면,

$$\left( \frac{3}{2\Delta_t} - \mathcal{T} \right) f(x, k, t) = \frac{4}{2\Delta_t} f(x, k, t - \Delta_t) - \frac{1}{2\Delta_t} f(x, k, t - 2\Delta_t), \tag{13}$$

이 된다. 여기서  $\mathcal{T}$ 는 식 (7)에 정의된 연산자이고  $\Delta_t$ 는 계산에 사용된 시간간격이다. 수치해석의 안정성(stability)을 위해 식 (13)을 유도하는 과정에서 음의 차분법을 사용하였다.

### III. 시뮬레이션 결과

계산을 위한 parameter의 값은  $N_x = 80$ ,  $N_k = 60$ ,  $\Delta_t = 1\text{fs}$ 이다<sup>[2,3]</sup>. 이 경우  $\Delta_x = 0.565\text{nm}$ 이고 이 값은 (Al,Ga)As 계의 원자층 간격과 거의 같은 크기의 두 계를 지닌 layer를 가정하는 것이다<sup>[2]</sup>. RTD는

4.5nm 두께의 GaAs 양자우물이 각각 폭같이 2.8nm 두께의  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  장벽(barrier) 층으로 둘러싸인 모형을 사용하였다<sup>[2-4]</sup>. 17.5nm의 GaAs 전극이 양 쪽에서 장벽과 연결되어 있다. 전도대(conduction-band) 불연속(discontinuity)은 0.27eV<sup>[2,3]</sup>로 두었 으며 전자의 유효질량(effective mass)은 GaAs에서 0.067 $m_0$ ,  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 에서 0.092 $m_0$ 로 두었다<sup>[3]</sup>. Scattering은 무시했으며 모든 계산은 상온인 300K 에서 이루어졌고 경계에서의 Fermi 준위는 reservoir에 서의 전자농도가  $2 \times 10^{18} cm^{-3}$ 이 되도록 정하였다<sup>[2-4]</sup>.

수치모델에 도입하는 영향이 상당히 크지만 공간적으 로 변화하는 유효질량이 미치는 영향도 결코 무시할 수 없으며, 따라서 정확한 소자의 해석을 위해서는 SDS뿐만 아니라 유효질량의 공간적 변화도 고려한 Wigner 함수의 수치모델이 필요함을 보여주고 있다.

그림 2에 peak 바이어스에서 valley 바이어스로 의 부 전압이 순간적으로 변화했을 때의 RTD의 과도응 답을 기존의 모델의 결과와 비교하여 나타내었다. 그림 2.(a)는 참고문헌 2의 모델링(UDS, 일정한 유효질 량을 가정), 그림 2.(b)는 참고문헌 4의 모델링(SDS, 일정한 유효질량을 가정), 그림 2.(c)는 2절에서 제시 한 새로운 모델링을 이용한 RTD의 과도응답을 나타 낸다. 그림에서 알 수 있는 것 처럼 UDS의 경우 150fs 후에 정상상태에 도달하는 결과를 보여주지만 SDS를 이용한 모델링의 경우(그림 2.(b)) 전류밀도의 동요<sup>[4]</sup> 때문에 약 450fs 후에 정상상태에 도달하게 된다. 하지만 SDS에 공간적으로 변화하는 유효질량의 영향을 고려할 경우 1ps 정도 후에야만 정상상태에 도달하게 된다.

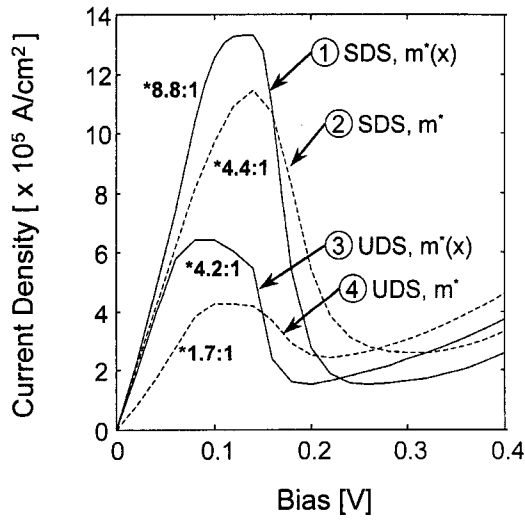
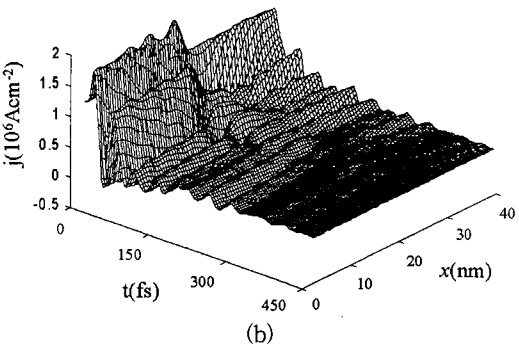
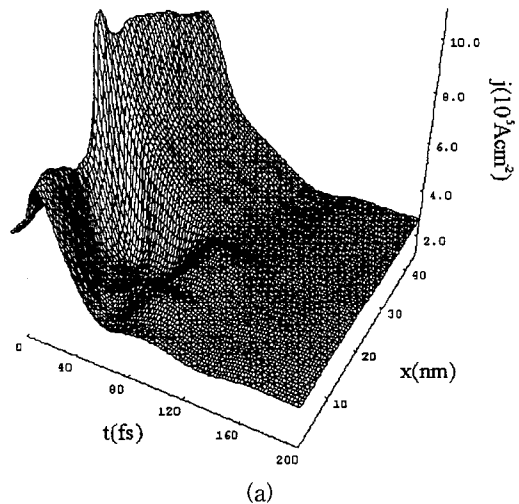


그림 1. 여러 수치 모델을 이용한 RTD의 전류-전압 곡선. \*표시된 숫자는 계산된 PVR을 나타낸다. ① 공간적으로 변화하는 유효질량의 영향이 포함된 SDS 모델, ②  $m^*=0.067m_0$ 로 일정하다고 가정한 SDS 모델, ③ 공간적으로 변화하는 유효질량의 영향이 포함된 UDS 모델, ④  $m^*=0.067m_0$ 로 일정하다고 가정한 UDS 모델

Fig. 1. Comparison between the I-V characteristics calculated by the UDS and SDS methods with constant and spatially varying effective masses. Starred(\*) numbers show peak-to-valley ratios. ① SDS calculation with spatially varying effective mass, ② SDS calculation with constant effective mass  $m^*=0.067m_0$ , ③ UDS calculation with spatially varying effective mass, ④ SDS calculation with constant effective mass  $m^*=0.067m_0$ .

그림 1에 이 논문에서 사용한 모델을 이용한 RTD의 전류-전압 곡선과 PVR을 다른 모델<sup>[2,3,4]</sup>의 결과와 비교하여 나타내었다<sup>[6]</sup>. SDS를 Wigner 함수의



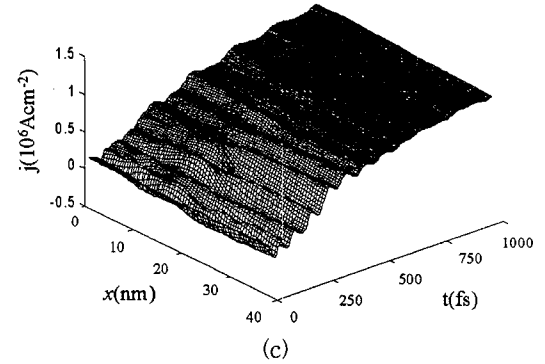
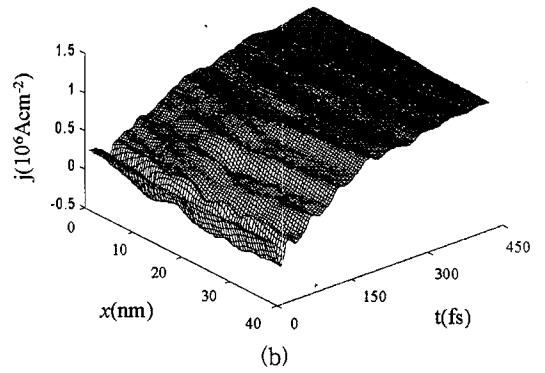
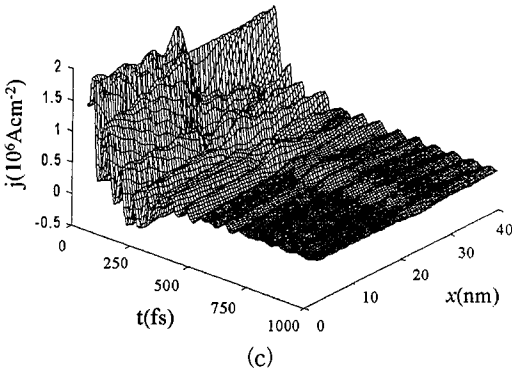


그림 2. (a) 참고문헌 2의 모델링에 바탕을 둔 peak 바이어스에서 valley 바이어스로 외부 전압이 순간적으로 변화했을 때의 RTD의 과도응답 (b) 참고문헌 4의 모델링에 바탕을 둔 peak 바이어스에서 valley 바이어스로 외부 전압이 순간적으로 변화했을 때의 RTD의 과도응답 (c) 새로운 모델링에 바탕을 둔 peak 바이어스에서 valley 바이어스로 외부 전압이 순간적으로 변화했을 때의 RTD의 과도응답

Fig. 2. (a) The transient response of RTD when the bias is suddenly changed from the peak bias to valley bias using the discrete model in Ref. 2. (b) The transient response of RTD when the bias is suddenly changed from the peak bias to valley bias using the discrete model in Ref. 4. (c) The transient response of RTD when the bias is suddenly changed from the peak bias to valley bias using the new discrete model in this paper.

이는 유효질량의 공간적 변화가 소자의 특성에 아주 중요한 역할을 한다는 것을 보여주고 있으며 정상상태 뿐만 아니라 과도응답 해석에 있어서도 공간적으로 변화하는 유효질량의 효과를 포함한 모델링의 중요성을 보여준다.

그림 3. (a) 참고문헌 2의 모델링에 바탕을 둔 valley 바이어스에서 peak 바이어스로 외부 전압이 순간적으로 변화했을 때의 RTD의 과도응답 (b) 참고문헌 4의 모델링에 바탕을 둔 valley 바이어스에서 peak 바이어스로 외부 전압이 순간적으로 변화했을 때의 RTD의 과도응답 (c) 새로운 모델링에 바탕을 둔 valley 바이어스에서 peak 바이어스로 외부 전압이 순간적으로 변화했을 때의 RTD의 과도응답

Fig. 3. (a) The transient response of RTD when the bias is suddenly changed from the peak bias to valley bias using the discrete model in Ref. 2. (b) The transient response of RTD when the bias is suddenly changed from the peak bias to valley bias using the discrete model in Ref. 4. (c) The transient response of RTD when the bias is suddenly changed from the peak bias to valley bias using the new discrete model in this paper.

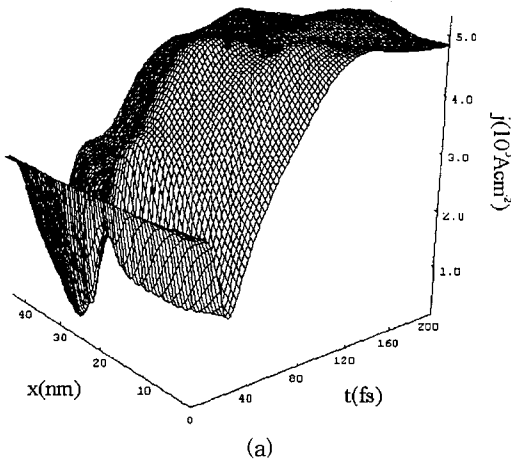


그림 3에는 valley 바이어스에서 peak 바이어스로 외부 전압이 순간적으로 변화했을 때의 RTD의 과도응답을 기존의 모델의 결과와 비교하여 나타내었다. 그림 3(a)는 참고문헌 2의 모델링(UDS, 일정한 유효질량을 가정), 그림 3(b)는 참고문헌 4의 모델링(SDS, 일정한 유효질량을 가정), 그림 3(c)는 2절에서 제시한 새로운 모델링을 이용한 RTD의 과도응답을 나타

낸다. 여기서도 앞의 경우와 마찬가지로 SDS를 이용한 모델링이 UDS를 이용한 모델링에 비해 긴 settling time을 주고 유효질량의 공간적 변화 역시 추가적인 전류밀도의 동요를 주게 되어 정상상태에 도달하는 시간을 더욱더 길게함을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

유효질량의 공간적 변화를 포함하면서 동시에 SDS에 바탕을 둔 Wigner 함수의 새로운 수치 모델을 제안하고 이 모델을 이용하여 RTD의 과도응답을 해석하고 기존의 결과와 비교하였다. RTD에 인가하는 바이어스를 급격하게 바꾸어줄 때 SDS를 이용한 수치 모델은 UDS 모델에서 수치 에러 때문에 무시되는 국부적인 전류밀도의 동요때문에 정상상태에 이르는 시간이 상당히 길어지는 결과를 보여주는데, 유효질량의 공간적 변화를 동시에 포함시킬 경우 이 영향이 추가적인 전류밀도의 동요를 주게 되어 정상상태에 도달하는 시간을 더욱더 길게함을 보였다.

#### 참 고 문 헌

[1] E. Wigner, "On the quantum correction for thermodynamic equilibrium," *Phys. Rev.*,

vol. 40, pp. 749-759, June 1932.

[2] W. R. Frensley, "Wigner-function model of a resonant-tunneling semiconductor device," *Phys. Rev. B*, vol. 36, pp. 1570-1580, July 1987.

[3] H. Tsuchiya, M. Ogawa, and T. Miyoshi, "Simulation of quantum transport in quantum devices with spatially varying effective mass," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 38, pp. 1246-1252, June 1991.

[4] F. A. Buot and K. L. Jensen, "Lattice Weyl-Wigner formulation of exact many-body quantum-transport theory and applications to novel solid-state quantum-based devices," *Phys. Rev. B*, vol. 42, pp. 9429-9457, November 1990.

[5] W. R. Frensley, "Quantum transport," in *Heterostructures and Quantum Devices*, edited by N. G. Einspruch and W. R. Frensley, Academic Press, New York, 1994, Chap. 9.

[6] K.-Y. Kim and B. Lee, "Simulation of Quantum Transport by Applying Second-Order Differencing Scheme to Wigner Function Model Including Spatially Varying Effective Mass"(in submission).

#### 저 자 소 개

金 京 濂(正會員) 第 34卷 D編 第 3號 參照

현재 서울대학교 전기공학부 석사과정

李 竝 浩(正會員) 第 34卷 D編 第 12號 參照

현재 서울대학교 전기공학부 조교수

權 宅 靖(正會員)

1973년 2월 6일생. 1995년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업(공학사). 1997년 2월 서울대학교 대학원 전기공학부 졸업(공학석사). 현재 삼성전자 기업네트워크사업부 LAN개발팀 주임연구원