

다층 리지스트 다층 기판 구조에서의 전자빔 리소그래피 공정을 위한 몬테카를로 시뮬레이터의 개발

손명식, 이진구, *황호정

동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터, *중앙대학교 전자전기공학부
전화: 02-2260-8699 / E-mail: sonms@dgu.edu

Development of a Monte Carlo Simulator for Electron Beam Lithography in Multi-Layer Resists and Multi-Layer Substrates

Myung-Sik Son, Jin-Koo Rhee, and *Ho-Jung Hwang
Millimeter-Wave INnovation Technology research center(MINT), Dongguk Univ.
*School of Electrical and Electronic Engineering, Chung-Ang Univ.
E-mail : sonms@dgu.edu

Abstract

We have developed a Monte Carlo (MC) simulator for electron beam lithography in multi-layer resists and multi-layer substrates in order to fabricate and develop high-speed PHEMT devices for millimeter-wave applications. For the deposited energy calculation to multi-layer resists by electron beam in MC simulation, we modeled newly for multi-layer resists and heterogeneous multi-layer substrates. Using this model, we simulated T-gate or Γ -gate fabrication process in PHEMT device and showed our results with SEM observations.

I. 서론

나노기술의 발전으로 전자빔을 이용한 직접 묘화 공정은 한층 그 사용 기술이 빈번해지고 있고, 0.1 μ m 이하의 나노 패턴 형성시의 근접 효과 등을 보정하기 위한 여러 가지 시도들이 행하여지고 있다. 국내에서는 서울대 전국진 교수 연구실에서 실리콘 기반 공정을 위한 전자빔 묘화 공정 몬테 카를로 분석 시뮬레이터를 개발하여 발표하였었고, 국외적으로는 근접 효과를 최소화하기 위한 많은 접근법들에 대한 논문들이

발표되었고, 상업용으로 SIGMA-C사의 SELID 프로그램(독일 제품)이 현재 판매되고 있다. SELID 프로그램은 몬테 카를로 모듈보다는 볼츠만(Boltzmann) 수송 방정식을 이용해 그 수행 시간을 단축하여 리지스트 전이 에너지를 계산함으로써 최적의 집적 묘화 공정에 대한 노광 및 현상 공정 조건을 찾아 주고 있다. 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터에서는 60 GHz 이상에서 구동하는 PHMET 및 MHEMT 제작을 위하여 가장 중요한 공정인 T-게이트 및 Γ -게이트 형성 공정을 전자빔 직접 묘화공정을 사용하여 제작하고 있다. T-게이트 헤드(head) 및 풋(foot)단을 형성하기 위해 3층 구조의 리지스트 시스템을 사용하여 GaAs 기판에 에피층을 형성한 60GHz이상에서 구동하는 PHEMT를 제작하고 있다. 이러한 다층 구조의 리지스트 및 에피층을 갖는 기판층에서의 전자빔 후방 산란 등을 고려하여 리지스트층에 전이되는 에너지 분포를 정확히 분석하여 근접 효과를 보정하고, 최적 노광 및 현상 조건을 제시하기 위해서는 기존의 단일 원자 시스템에서의 몬테카를로 산란 모델을 수정하여 새로운 다층 다원자 모델을 제시할 필요가 있다.

본 연구에서는 60GHz 이상에서 구동하는 PHEMT 제작 및 개발을 위한 sub-0.1 μ m 이하의 T-게이트 형성 공정 분석을 위한 다층 리지스트 구조 및 다원자 다층 구조에서의 새로운 접근 방법을 사용한 효율적인 몬테카를로 시뮬레이터 구성에 대해 발표한다.

II. 다원자 다층 기관 구조를 위한 몬테 카를로 시뮬레이션 모델

다원자 다층 기관 구조에서의 전자 산란 제적을 구하기 위한 몬테 카를로 모델은 복합 산란 모델을 고려하여, 4개의 산란 메커니즘이 고려되었다. 핵과의 탄성 산란 메커니즘과 비탄성 산란 메커니즘들인 내부 전자 셸들에 의한 산란 및 자유전자로 가정된 최외각 셸과의 산란, 그리고 플라즈몬 진동에 의한 에너지 손실 메커니즘을 모두 고려하였다. 효율적인 전자빔 산란 제적 계산 수행을 위하여 미리 에너지 및 층을 구성하는 개별 원자에 따른 비탄성 충돌 파라미터와 탄성 충돌 파라미터를 모두 계산하였고, 산란 제적 수행을 위한 루프에서는 미리 계산된 값을 불러서 사용토록 하였다. 리스트에 전이되는 정확한 에너지 분포를 계산하기 위하여 전자가 층을 바꾸어 산란되어 가는 경우에는 산란 제적을 층별로 구분하여 각 층에 맞는 산란 파라미터를 적용한 전이 에너지의 합으로 리스트 층의 전이 에너지를 구하는 알고리즘을 사용하였다. 비탄성 산란 중 내부 셸에 있는 전자와의 산란 메커니즘은 화합물에 대해 하나의 개별 원자처럼 취급할 수 있는 유효 전자번호를 이용하여 구할 수도 있으나 유효 전자를 사용하는 경우에는 각 셸들을 재조정하여 각 셸에 전자 수를 할당하여 주어야 하고, 이 과정에서 임의조정이라는 비물리적인 변수가 발생하게 되므로 이보다는 아래에서 설명하는 다원자 화합물층의 전체 산란 단면적 대 하나의 개별 원자에 대한 내부 셸들의 산란 단면적의 합의 확률을 이용해 구성 원자를 결정하는 알고리즘이 타당하다고 판단하여 새롭게 모델링 하였다. 이러한 새로운 접근법은 개별 원자들의 정확한 결합 에너지와 각 셸의 전자 수와 같은 보다 정확한 데이터를 이용할 수 있고, 비물리적인 변수를 제거할 수 있어 어떠한 화합물이라도 시뮬레이션이 용이하도록 구성할 수 있다.

2.1 탄성 산란 모델

탄성 산란을 위한 모델은 Mott 산란 단면적에 대한 해석 방정식인 Browning이 제안한 해석적 방정식 모델[1]을 사용하였다. 이 모델은 저에너지 및 높은 원자번호를 갖는 기관층 모델에 적합한 것으로 알려져 있으며, 30keV에서 100eV 에너지 영역에서 사용 가능한 것으로 알려져 있다. 이 방정식에서 Mott의 탄성 산란 단면적을 구하기 위한 원자 번호는 각 다원자층에서의 유효 원자번호[2]를 사용하여 계산하였으며, 사용자가 지정한 에너지 이상에서는 Rutherford 탄성 산란 단면적[3]을 사용토록 하였으나 시뮬레이션 결과는

모두 Mott의 탄성 산란 단면적만을 구하여 계산하였다.

2.2 비탄성 산란 모델

비탄성 산란 단면적은 최외각 전자 셸(자유 전자)과 내부 전자 셸(inner shell 전자)에 묶여 있는 전자들과의 충돌 메커니즘으로 가정한다. 최외각에 비교적 결합 에너지가 약한 자유 전자와의 산란을 위한 수정된 Moller 산란 단면적 방정식 및 강한 결합에너지로 핵에 묶여 있는 내부 전자 셸들과의 산란을 위한 Vriens 산란 단면적 방정식을 사용하여 계산하였다.

전자가 산란되어 들어가는 고체 기관이 금속인 경우 및 저 에너지 전자와 자유 전자와의 플라즈몬(plasmon) 진동 손실을 고려해야 하므로 플라즈몬 진동 산란 단면적은 참고 문헌 [4]를 사용하였다.

2.3 산란간 에너지 손실 및 전이 에너지 모델

CSDA(Continuous Slowing-Down Approximation) 가정에 의한 총 에너지 손실은 단위 길이(A)당 손실 에너지[eV/A] 계산을 위하여 Joy 및 Luo가 제안한 수정된 Bethe 방정식[1]을 사용하였으며, 계산시 다원자층에 대해서는 유효원자 번호를 이용하여 계산하였다.

비탄성 산란 메커니즘에 의한 자유전자, 내부 셸 전자 및 플라즈몬 진동에 의한 불연속적인 에너지 손실은 참고문헌 [5] 및 [1]의 관련식을 사용하였다.

각 산란 단면적에 의해 산란 확률이 계산되면, 이러한 불연속 에너지 손실분은 총 에너지 손실에서 각 불연속 에너지 손실 분을 뺀 나머지만이 각 층에 전이된 에너지로 계산된다.

2.4 다원자 다층 구조에서의 산란 모델링

위에서 언급된 바와 같이 다원자 다층 기관에서의 비탄성 산란 메커니즘을 결정하기 위하여 기본적으로는 참고 문헌 [1]을 이용하였으나, 각 층에서의 유효전자번호를 사용하는 경우에는 각 셸들에 전자들을 어떻게 배분하여 재배치하느냐는 문제에 이르게 된다. 이것은 굉장히 임의적이고, 또한 전자가 쪼개어지는 상태[6]에 이르게 되어 비물리적인 요소를 포함하고 있고 이것에 따른 결합 에너지의 결정 또한 쉽지 않은 문제이다. 이러한 문제를 해결하고 효율적으로 임의의 다원자 다층 기관에서도 물리적으로 타당하며, 시뮬레이션이 용이하도록 다음에 설명하는 방법을 이용하여 계산하였으며, 문헌 [1]에서의 5keV 전자빔 산란에 의한 전이 에너지 분포와 비교하여 유사한 분포를 얻게 됨을 확인하였다.

총 산란 단면적 σ_{tot} 은 탄성 산란 단면적 σ_{el} 및 비

탄성 산란 단면적 σ_{in} 의 합($\sigma_{tot} = \sigma_{el} + \sigma_{in}$)이므로 탄성 산란 확률 σ_{el}/σ_{tot} 및 비탄성 산란 확률 σ_{in}/σ_{tot} 을 손쉽게 구할 수 있다. 0과 1사이에 고르게 분포하는 난수(random number) 발생을 통해 탄성과 비탄성 산란을 결정할 수 있다. 비탄성 산란 단면적 σ_{in} 은 아래 식(1)과 같이 결정할 수 있다.

$$\sigma_{in} = \sum \sigma_k^{in} \quad (1)$$

$$\sigma_k^{in} = \sum N_k Z_k \sigma_i + N_k Z_k \sigma_f \quad (2)$$

여기서, k 첨자는 각 다원자 층의 개별 원자를 의미하며, i 첨자는 inner shell 전자를 f 는 최외각 쉘의 자유 전자를 의미한다.

따라서, 우리는 식 (1)과 (2)를 이용하여, 다원자층에서 한 원자와의 비탄성 산란을 결정할 수 있는 확률 $\sigma_k^{in}/\sigma_{in}$ 을 구할 수 있게 된다. 이렇게 한 원자가 결정되면 내부 쉘 전자와의 충돌 확률은 $\sum N_k Z_k \sigma_i / \sigma_k^{in}$ 이다. 또한, 한 내부 쉘의 결정은 $N_k Z_k \sigma_i / \sum N_k Z_k \sigma_i$ 확률을 통해 구할 수 있다. 자유전자는 구별 불가능한 것으로 가정하면 $\sum N_k Z_k \sigma_f / \sigma_{in}$ 으로 손쉽게 구할 수 있게 된다.

위에서 구한 확률들을 통해 비탄성 산란시 선택된 산란 비행 구간에 대해 선택된 단원자층에 의한 불연속적 에너지 손실[5]로 가정하여 다원자층의 각 원자 농도 N_k 및 전자 번호 Z_k 를 사용하고, 이미 알고 있는 각 원자에서의 결합 에너지 U_i 를 그대로 사용하여 에너지 손실을 바로 구할 수 있게 되므로, 유효전자 번호를 사용할 때의 내부 및 최외각 쉘 재배치 및 이에 따른 결합 에너지의 결정이라는 문제점들을 손쉽게 해결할 수가 있다.

2.1 효율적인 비탄성 산란시의 전이 비율 결정

2차 전자가 생성되어 전이하는 에너지를 정확히 계산하기 위하여 전이 비율은 문헌 [3]에서의 식에 따라 결정되나 효율을 위해 입사 전자 에너지를 미리 작은 에너지 단위로 나누어 계산할 경우 초기에 산란 궤적을 구하기 전에 시간이 많이 걸리게 되므로 아래 식과 같이 난수를 사용하여 전이 에너지를 구하도록 하였으며, 매우 효율적으로 계산 시간을 단축할 수 있었다.

자유전자와의 산란 전이 비율 ϵ_f 는 문헌 [2]에서의

결정식 (8.23)식을 사용하였으며, 내부 쉘에서의 전이 비율 ϵ_i 는 난수 R_n 을 이용하여 다음과 같이 경험식 (3)으로 제안하였다.

$$\epsilon_i = [(1. + U_i)/2 - U_i] \cdot R_n^3 \quad (3)$$

III. 시뮬레이션 결과 및 논의

효율적인 계산을 위하여, 산란 궤적을 구하기 전에 각 미소 증분 에너지에 따라 주입되는 전자의 모든 에너지에 대해 탄성 및 비탄성 산란 파라미터를 계산하여 산란 궤적을 구하는 루프 과정에서는 그대로 불러 사용하였다. 에너지 50 keV, 3층 구조의 리지스트 및 GaAs 기판에 대하여 100,000개의 전자 산란 궤적을 구하는 데 걸린 시간은 Intel Pentium4 1.6 GHz, 메모리 256 MBytes PC에서 9분 정도에 계산이 완료되었다.

그림 1.에서는 밀리미터파 응용을 위한 PHEMT의 T-게이트 제작을 위한 전자빔 리소그래피 공정에 대한 시뮬레이션 구조에서 산란 궤적을 나타내었다. 1차 생성 전자는 검은색으로 나타내었으며 2차 생성 전자들은 빨간색으로 나타내었다. T-게이트 형성을 위한 리지스트 및 기판구조는 PMMA/P(MMA-MAA)/PMMA/GaAs 구조를 고려하였다. 그림 2. 및 3.에서는 0.1 μ m T-게이트 공정에 대해 최적 조건을 잡기 위해 본 연구팀에서 실험한 데이터[7]와 비교하기 위해 헤드 형성을 위한 PMMA/P(MMA-MAA)/GaAs 층구조 및 풋단을 형성하기 위한 PMMA/GaAs 구조에서의 가우시안 노광 결과를 동시에 나타내었다. 노광에 대한 실험 조건은 표 1.에 정리하여 보였다. 그림 2.는 T-게이트 헤드와 풋단을 형성하기 위해 실험에서 사용한 전자빔 spot 직경에 따른 노광 비교 그림이다. 작은 쪽 그림은 풋단을 나타내며 게이트 라인에 대한 단면 노광 분포는 그림 3.에 현상된 기판과 리지스트 접합면에서 SEM으로 측정된 길이를 리지스트층에 전이된 에너지 분포도와 같이 나타내어 보였다. 정확한 비교를 위해서 현재 최종 현상 프로파일을 예측하기 위한 시뮬레이터를 실험과 함께 구성 중에 있으며, 현상 시간에 따라 나노 영역에서 예측 가능한 시뮬레이터를 구성하고 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 다층 리지스트 및 다원자 다층 기판 구조에서 전자빔 시뮬레이션을 위한 몬테 카를로 시뮬

레이터를 개발하였다. 또한, 모델 구성에 대하여 자세히 설명하였다. 또한, 제안된 모델을 통해 밀리미터파 응용 PHEMT 소자 개발을 위한 T-게이트 형성 공정을 위한 노광 공정에 적용하여 리지스트층에 전이된 노광 전이 에너지 분포를 물리적으로 타당하며 효율적으로 계산하였다. 현재 어떠한 에피층을 갖는 다층 다원자 기판 구조에서도 시뮬레이션을 할 수 있도록 구성되어 있으며, Visual C++로 Intel PC에서 수행되도록 코딩되었다. 노광 패턴 생성기 및 노광 후 리지스트 현상 공정에 대한 실험 및 코딩이 진행중이며, 근접 효과를 보정하여 최적 공정을 찾아 주는 알고리즘도 개발 중에 있다.

※ 이 연구는 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터를 통한 한국과학 재단의 우수 연구센터 지원 및 2001년도 한국학술진흥재단 신진교수연구과제 지원에 의하여 연구되었음.(KRF-2001-003-E00124).

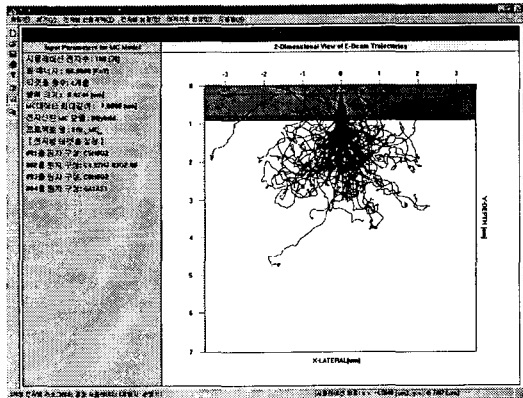


그림 1. PMMA/P(MMA-MAA)/PMMA/GaAs 시뮬레이션 구조에서의 산란계적

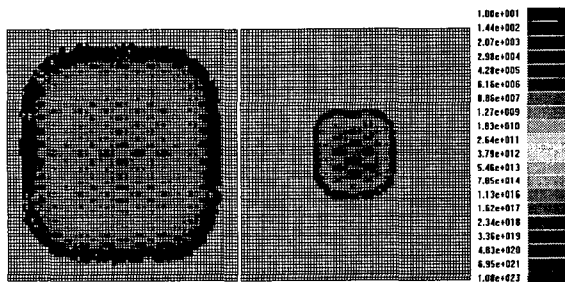
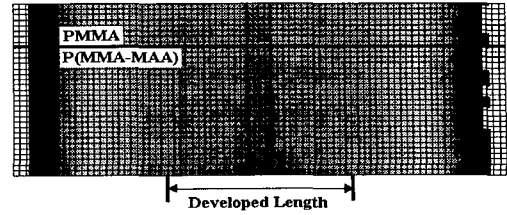


그림 2. 표 1.에서의 T-게이트 공정 조건에서 가우시안 빔 직경에 따른 리지스트층과 GaAs 기판 접합면에서의 리지스트에 전이된 에너지 분포도(크기는 $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ 이다.)



(a) 헤드 형성 노광시 리지스트에 전이된 에너지 분포(크기는 $2 \times 0.8 \mu\text{m}^2$ 이다.)



(b) 풋 형성 노광시 리지스트에 전이된 에너지 분포(크기는 $2 \times 0.1 \mu\text{m}^2$ 이다.)

그림 3. $0.1 \mu\text{m}$ T-게이트 형성 노광시 리지스트 전이 에너지 분포 결과 및 현상 후 SEM 측정에 의해 GaAs 및 리지스트층 접합면에서 측정된 현상 길이

표 1. T-게이트 헤드/풋단을 형성하기 위한 노광 조건

	Dose [$\mu\text{C}/\text{cm}^2$]	Resolution [nm]	Spot size [nm]
Gate Head	90	150	150
Gate Foot	900	50	60

참고문헌

- [1] Su-Hwan Kim *et. al*, "New Approach of Monte Carlo Simulation for Low-Energy Electron-Beam Lithography," *Microelectronic Engineering*, vol. 41/42, pp.179-182, 1998.
- [2] D. C. Joy, *Monte Carlo Modeling for Electron Microscopy and Microanalysis*, Oxford university Press, 1995.
- [3] 서태원, *전자빔 리토그래피에서 스트링 모델을 이용한 3차원 리지스트 프로파일 시뮬레이션*, 서울대학교 석사학위 논문, 1995.
- [4] Kamil A. Valiev, *The Physics of Submicron Lithography*, Plenum Press, 1992.
- [5] M. Yasuda *et. al*, "Study of the spatial distribution of backscattered electrons from a gold target with a new Monte Carlo simulation," *J. Appl. Phys.*, vol. 77, no. 9, pp.4706-4713, 1995.
- [6] Kang-Yoon Lee *et. al*, "Monte Carlo simulation energy dissipation in electron beam lithography including secondary electron generation," *J. Appl. Phys.*, vol. 67, no. 12, pp.7560-7567, 1990.
- [7] 임병욱 외, "전자선 묘화 장치를 이용한 비대칭적인 $0.1 \mu\text{m}$ T-게이트 PHEMT 공정 및 특성에 관한 연구", 2001년 대한전자공학회 하계학술대회 논문집, vol. 24, no. 1, pp.189-192, 2001.