

다층 리지스트 및 화합물 반도체 기판 구조에서의 전자 빔 리소그래피 공정을 위한 몬테 카를로 시뮬레이션 모델 개발

손명식†

동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터
(2003년 3월 19일 접수)

A Monte Carlo Simulation Model Development for Electron Beam Lithography Process in the Multi-Layer Resists and Compound Semiconductor Substrates

Myung-Sik Son†

Millimeter-wave Innovation Technology Research Center, Dongguk University
(Received March 19, 2003)

요 약

밀리미터파 대역용 고속 PHEMT 소자 제작 및 개발을 위하여 다층 리지스트 및 다원자 기판 구조에서 전자빔 리소그래피 공정을 분석할 수 있는 새로운 몬테 카를로 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 전자빔에 의해 다층 다원자 타겟 기판 구조에 전이되는 에너지를 정확하고 효율적으로 계산하기 위하여 다층 리지스트 및 다층 다원자 기판 구조에서 시뮬레이션 가능하도록 새로이 모델링하였다. 본 논문에서 제안 개발된 모델을 사용하여 PHEMT 소자의 전자빔 리소그래피에 의한 T-게이트 형성 공정을 시뮬레이션하고 SEM 측정 결과와 비교 분석하여 타당성을 검증하였다.

주제어 : 전자빔 리소그래피 공정, 몬테 카를로 시뮬레이션, PHEMT, 밀리미터파, T-게이트

Abstract

A new Monte Carlo (MC) simulator for electron beam lithography process in the multi-layer resists and compound semiconductor substrates has been developed in order to fabricate and develop the high-speed PHEMT devices for millimeter-wave frequencies. For the accurate and efficient calculation of the transferred and deposited energy distribution to the multi-component and multi-layer targets by electron beams, we newly modeled for the multi-layer resists and heterogeneous multi-layer substrates. By this model, the T-shaped gate fabrication process by electron beam lithography in the PHEMT device has been simulated and analyzed. The simulation results are shown along with the SEM observations in the T-gate formation process, which verifies the new model in this paper.

Key Words : Electron Beam Lithography, Monte Carlo Simulation, PHEMT, Millimeter-wave frequencies, T-shaped Gate

1. 서 론

전자빔을 이용한 패턴 전이를 위한 직접 리소그

래피 공정은 포토마스크 제작 이외에도 한층 그 사용 기술이 빈번해지고 있고, 나노 기술의 발전을 위해 0.1 μm 이하의 나노 패턴 형성시의 근접 효과 등

† E-mail : sonms@dgu.edu

을 보정하기 위한 여러 가지 시도들이 국내외적으로 연구되어지고 있다. 전자빔 리소그래피에 대한 몬테 카를로 방법은 다양한 타겟 기판 층에 대한 후방 산란 효과에 의한 패턴 근접 효과 등을 물리적으로 타당하며 보다 정확하게 예측할 수 있기 때문에 이에 대한 많은 모델들이 개발되어졌다 [1-9]. 대표적인 상업 제품으로는 SIGMA-C사의 SELID 프로그램(독일 제품) [10]이 현재 국내에서 판매되고 있으며, 이 제품은 몬테 카를로 모델 보다는 볼츠만(Boltzmann) 수송 방정식을 이용해 그 수행 시간을 단축하여 리지스트 전이 에너지를 계산함으로써 최적의 집적 리소그래피 공정에 대한 노광(exposure) 및 현상(development) 공정 조건을 찾아 주고 있다.

그러나 이러한 모델들의 대부분은 밀리미터와 대역용 GaAs 기판이나 InP 기판의 PHEMT 소자의 전자빔 리소그래피에 의한 T-게이트 형성 공정 [11-12]과 같은 GaAs 기판에 여러 에피층이 있고, 이 위에 2층, 3층 및 4층 리지스트 층들이 있는 구조에서의 시뮬레이션에는 그 적용이 부적합하다. 이러한 다층 구조의 리지스트 및 에피층들을 갖는 기판 층에서의 전자빔 후방 산란 등을 고려하여 리지스트에 전이되는 에너지 분포를 정확히 계산하여, 분석하고 근접 효과(proximity effect)를 보정하여 최적의 노광 및 현상 조건을 제시하기 위해서는 기존의 단원자 시스템에서의 몬테 카를로 산란 모델을 수정하여 새로운 다층 다원자 모델을 제시할 필요가 있다.

본 논문에서는 밀리미터와 대역용 고속 PHEMT 소자 제작 및 개발을 위해 sub-0.1 μm 급 T-게이트 형성 공정을 분석할 수 있는 다층 리지스트 구조 및 다원자 다층 기판 구조에서 새로운 접근 방법을 사용한 효율적인 몬테 카를로 시뮬레이션 개발 모델에 대해 설명하고자 한다.

2. 다원자 다층 기판 구조를 위한 몬테 카를로 시뮬레이션 모델

다원자 다층 기판 구조에서의 전자 산란 궤적을 구하기 위한 몬테 카를로 모델은 1차 및 2차 생성 전자들을 모두 고려한 복합 산란 모델을 토대로 하였으며, 리지스트 층에 전이 흡수된 정확한 에너지 분포를 구하기 위하여 전자의 모든 산란 메커니즘을

고려하였다. 핵과의 탄성 산란 메커니즘과 비탄성 산란 메커니즘들인 내부 셸(inner shells) 전자와의 산란 및 최외각 셸 전자(outermost shell) 전자에 대해 자유전자로 가정한 최외각 궤도의 자유 전자와의 산란, 그리고 자유 전자들에 의한 플라즈몬(plasmon) 진동에 의한 에너지 손실 메커니즘을 모두 고려하였다.

효율적인 전자빔 산란 궤적 계산 수행을 위하여 미리 에너지 및 층을 구성하는 개별 원자에 따른 비탄성 충돌 파라미터와 탄성 충돌 파라미터를 모두 계산하였고, 산란 궤적 수행을 위한 반복 루프 실행 과정에서는 미소 에너지 증분에 대해 미리 테이블화하여 메모리에 저장된 값을 불러서 사용토록 하였다. 리지스트에 전이되는 정확한 에너지 분포를 계산하기 위하여 전자가 층을 바꾸어 산란되어 가는 경우에는 산란 궤적을 층별로 구분하여 각 층에 맞는 산란 파라미터를 적용한 전이 에너지의 합으로 리지스트 층의 전이 에너지를 구하는 알고리즘 [6]을 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 임의 조정이라는 비물리적인 변수가 발생하게 되므로 이보다는 아래에서 설명하는 다원자 화합물 층의 전체 산란 단면적 대 하나의 개별 원자에 대한 내부 셸들의 산란 단면적의 합의 확률을 이용해 구성 원자를 결정하는 새로운 방법을 사용하여 모델링하였다. 이러한 새로운 접근법은 주기율표상의 모든 단일 원자들에 대한 결합 에너지와 각 셸의 전자 수에 대한 데이터 값들 [13]을 변형 없이 그대로 데이터를 이용할 수 있으므로 화합물 반도체에서 유효 전자번호를 사용했을 때의 비물리적인 요소(재배열 및 그에 따른 결합 에너지 결정)에 대한 오류를 제거할 수 있어 어떠한 화합물이라도 시뮬레이션이 용이하도록 구성할 수 있다.

2.1 탄성 산란

탄성 산란을 위한 모델은 Mott 산란 단면적에 대한 해석 방정식인 Browning이 제안한 해석적 방정식

모델 [14] 을 사용하였다. 이 모델은 저에너지 및 높은 원자 번호를 갖는 타겟 기관 모델에 적합한 것으로 알려져 있으며, 30 keV에서 100 eV 에너지 영역에서 사용 가능한 것으로 알려져 있다. 이 방정식에서 Mott의 탄성 산란 단면적을 구하기 위한 원자 번호는 각 다원자 층에서의 아래에 기술한 식 (1)의 유효 원자번호 [3] 를 사용하여 계산하였으며, 일정 에너지 이상에서는 Rutherford 탄성 산란 단면적 [4] 을 사용할 수 있도록 구성하였다.

본 논문에서의 시뮬레이션 결과는 모두 30 keV 이상 초과 에너지에 대해서는 Rutherford 탄성 산란 단면적을 사용하였으며, 그 이하에서는 Browning이 제안한 해석 방정식을 사용하였다.

2.2 비탄성 산란

비탄성 산란 단면적은 최외각 전자 셸(자유 전자로 가정)과 내부 셸 전자에 묶여 있는 전자들과의 충돌 메커니즘으로 가정한다. 최외각에 비교적 결합 에너지가 약한 자유 전자와의 산란을 위한 수정된 Moller 산란 단면적 방정식 [4-5] 및 강한 결합 에너지로 핵에 묶여 있는 내부 전자 셸들과의 산란을 위한 Vriens 산란 단면적 방정식 [4-5] 을 사용하여 계산하였다. 또한, 전자가 산란되어 들어가는 고체 기관이 금속인 경우 및 자유 전자 그룹과의 산란에 의한 아주 작은 산란각을 갖는 플라즈몬(plasmon) 진동 에너지 손실을 고려해야만 한다. 이 메커니즘을 고려하기 위한 플라즈몬 진동 산란 단면적 및 에너지 손실 식은 참고 문헌 [15]를 이용하였다.

2.3 산란간 에너지 손실 모델 및 전이된 에너지 계산

CSDA(Continuous Slowing-Down Approximation) 가정에 의한 총 에너지 손실은 Joy 및 Luo가 제안한 수정된 Bethe 방정식 [7] 을 사용하였으며, 각 화합물 층에 대해서 유효 원자번호를 이용하여 계산하였다. 비탄성 산란 메커니즘에 의한 자유전자, 내부 셸 전자 및 플라즈몬 진동에 의한 불연속적인 에너지 손실은 참고 문헌 [4-5] 및 [15] 의 관련 식들을 사용하였다. 각 산란 단면적에 의해 산란 확률이 계산되면, 이러한 불연속 에너지 손실분은 총 에

너지 손실에서 각 불연속 에너지 손실분을 뺀 나머지만이 각 층에 전이된 에너지로 계산된다.

2.4 다원자 층 구조에서의 산란 모델링

위에서 언급된 바와 같이 다원자 다층 기관에서의 비탄성 산란 메커니즘을 결정하기 위하여 기본적으로는 Vriens의 산란 단면적을 이용하였으나, 단일 원자와 같이 취급하기 위한 유효 전자번호를 사용하는 경우에는 각 셸의 전자들을 어떻게 배분하여 재배치하느냐는 문제에 이르게 된다. 이것은 시뮬레이션마다 굉장히 임의적인 오류를 낼 수 있고, 또한 전자가 쪼개어지는 사태 [2] 에 이르게 되어 비물리적인 요소를 포함하고 있고 이것에 따른 결합 에너지의 결정 또한 쉽지 않은 문제이다. 이러한 오류 발생 문제를 해결하고 효율적으로 임의의 다원자 다층 구조에서도 물리적으로 타당하며, 시뮬레이션이 용이하도록 아래 소절에서 설명하는 방법을 이용하여 계산하였다.

CSDA(Continuous Slowing-Down Approximation) 가정에 의한 총 에너지 손실 계산은 위에서 언급된 바와 같이 Joy 및 Luo가 제안한 수정된 Bethe 방정식을 사용하였으며, 화합물 층에 대해서는 아래 식 (1)에 의한 유효 원자번호 Z_{eff} 를 이용하여 계산하였다. 또한, 아래 식 (3)에 의해 유효 질량 M_{eff} 을 계산하여 다원자층에서의 유효 원자 농도(effective atom concentration [원자수/cm³])를 구하였다.

$$Z_{eff} = \sum_{i=1}^{i=n} c_i Z_i \tag{1}$$

$$c_i = a_i M_i / \sum_{i=1}^{i=n} a_i M_i \tag{2}$$

$$M_{eff} = \sum_{i=1}^{i=n} c_i M_i \tag{3}$$

여기서, 화합물에서의 각 원자 구성비에 대한 질량비 c_i 는 식 (2)과 같으며, $\sum_{i=1}^{i=n} c_i = 1$ 을 만족한다. M_i 는 각 원자의 질량이며, a_i 는 원자의 개수이다. n 은 화학식에서의 총 원자의 개수를 나타낸다.

2.4.1 다원자 층의 비탄성 산란 모델링

다원자로 구성된 화합물 각 층에서의 총 산란 단면적 σ_{tot} 은 탄성 산란 단면적 σ_{el} 및 비탄성 산란 단면적의 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 1사이에서 고르게 분포하는 난수(random number)를 발생시켜 탄성과 비탄성 산란 메커니즘을 결정할 수 있다.

각 층에서의 비탄성 산란 단면적 σ_{in} 은 각 층의 구성 개별 원자의 비탄성 산란 단면적 σ_k^{in} 의 합과 최외각 자유 전자셀에 대한 산란 단면적 σ_f , 그리고 플라즈몬 여기에 대한 산란 단면적 σ_{pl} 의 합으로 아래 식 (4)와 같이 결정할 수 있다.

$$\sigma_{in} = \sum_k \sigma_k^{in} + \sigma_f + \sigma_{pl} \quad (4)$$

$$\sigma_k^{in} = N_k \sum_i (Z_i^k \sigma_i^k) \quad (5)$$

$$\sigma_f = \sum_k (N_k Z_f^k \sigma_f^k) \quad (6)$$

여기서, 각 층의 구성 개별 단위자의 비탄성 산란 단면적 σ_k^{in} 은 단위자의 내부 셀 산란 단면적에 대한 총합으로서 식 (5)와 같이 결정되며, Z 는 셀의 전자수이고, N 은 원자 농도를 나타내며, σ 는 산란 단면적이다. k 아래 첨자는 각 화합물의 구성 개별 원자를 의미하며, i 아래 첨자는 각 k 원자에서의 내부 셀 전자를, f 첨자는 k 원자에서의 최외각 셀 전자(자유 전자로 가정)를 의미한다.

따라서 비탄성 산란이 일어나고 자유 전자는 구별 불가능하므로 자유 전자와의 산란 확률은 σ_f/σ_{in} 으로 구해지며, 플라즈몬 진동에 의한 산란 확률 σ_{pl}/σ_{in} , 그리고 각 층에서의 내부 셀 전자와의 산란 확률 $\sum_k \sigma_k^{in}/\sigma_{in}$ 을 구할 수 있다. 난수에 의해 각 층에서의 내부 셀 전자와의 산란이 결정되면 식 (5)를 이용하여 다원자 층에서 각 개별 원자 k 와의 비탄성 산란을 결정할 수 있는 확률 $\sigma_k^{in}/\sum_k \sigma_k^{in}$ 을 구할 수 있게 된다. 개별 원자 k 의 각 내부 전자 셀 전자와 충돌할 확률은 $Z_i^k \sigma_i^k / \sum_i (Z_i^k \sigma_i^k)$ 으로 구해지며, 이를 통해 산란 여부를 결정할 수 있게 된다.

이렇게 각 층에서 특정 개별 원자의 비탄성 산란 셀 전자 메커니즘이 결정되면 이전 산란 점에서부터 선택된 산란 비행 구간에 대해 특정 개별 단위자 층만 존재하는 것으로 가정하여 불연속적 에너지 손실 [5] 을 계산한다면 이미 잘 알고 있는 각 원자에서의 결합 에너지 U_i 데이터 [13] 를 화합물에 대하여도 변형 없이 그대로 사용하여 에너지 손실을 구할 수 있게 된다. 저 에너지 모델에서는 산란간 전자의 산란 길이가 매우 작으므로 화합물에 대하여 이렇게 가정하는 것은 타당할 것으로 여겨진다. 그러므로 유효 전자번호를 사용할 때의 내부 및 최외각 셀 재배치 및 이에 따른 결합 에너지의 결정이라는 어려운 과학 문제들을 손쉽게 해결할 수가 있다. 이러한 결과를 기존의 유효 전자번호를 사용한 모델과 비교하여 결론부에서 논의하였다.

2.4.2 효율적인 계산을 위한 비탄성 산란시의 전이 비율 결정

2차 전자가 생성되어 전이하는 에너지를 정확히 계산하기 위한 전이 비율은 문헌 [3,15] 에서의 관련 방정식에 따라 결정되나 이러한 전이 비율을 찾기 위한 루틴은 수행 시간을 증가시켜 계산 효율을 떨어뜨린다. 이러한 문제를 해결하기 위해 초기 입사 전자 에너지를 미리 작은 에너지 단위로 나누어 미리 계산하여 메모리 테이블에 저장하고 산란 궤적을 구하기 위한 반복 계산 루틴에서는 이것을 이용하여 계산 없이 바로 불러서 사용할 수 있도록 하였다. 자유 전자와의 산란 전이 비율 ϵ_f 는 문헌 [3] 에서의 결정식 (8.23)을 사용하였으며, 내부 셀 전자 산란에서의 전이 비율 ϵ_i 는 난수 R_n 을 이용하여 다음과 같이 식 (7)로 제안 적용하였다.

$$\epsilon_i = U_i + [(1 + U_i)/2 - U_i] \cdot R_n^{3.33} \quad (7)$$

여기서, U_i 는 산란 전자 에너지 E 로 나눈 원자의 i 번째 내부 셀 전자의 정규화 결합 에너지(binding energy)이다.

3. 시뮬레이션 결과 및 논의

효율적인 계산을 위하여, 산란 궤적을 구하기 전에

각 층에서의 각 미소 증분 에너지에 따라 주입되는 전자의 모든 시뮬레이션 에너지에 대해 탄성 및 비탄성 산란 단면적, 산란 메커니즘을 결정하는 확률, 각 층에서의 메커니즘에 따른 에너지 손실을 미리 계산하여 산란 궤적을 구하는 반복 루프 계산 과정에서는 그대로 불러 사용하도록 알고리즘을 적용하였다.

1차 및 2차 생성 전자는 모두 탄성과 비탄성 산란을 적용하였으며, 산란 궤적 계산은 표면을 벗어나거나 20 eV 이하로 떨어지면 중단하였다. 전자빔 입사 에너지 50 keV, GaAs 기판 위에 3층 구조로 0.2 μm PMMA/0.6 μm P(MMA-MAA)/0.1 μm PMMA 리지스트가 코팅된 구조에 대하여 100,000개의 전자 산란 궤적을 구하는 데 걸린 시간은 Intel Pentium VI 1.6 GHz PC에서 15분 47초 걸렸다. 산란 궤적을 구하기 위한 반복 루프에 들어가기 전에 미리 파라미터들을 계산하기 위한 미소 에너지 증분은 5 eV(초기 입사에너지/10,000개의 배열)로 설정하였으며, 위에서 언급된 탄성 및 비탄성 산란, 에너지 손실 등의 파라미터를 계산하는데 걸린 시간은 1초 정도였다. 그림 1에 100개의 산란궤적에 대한 결과 그림을 보

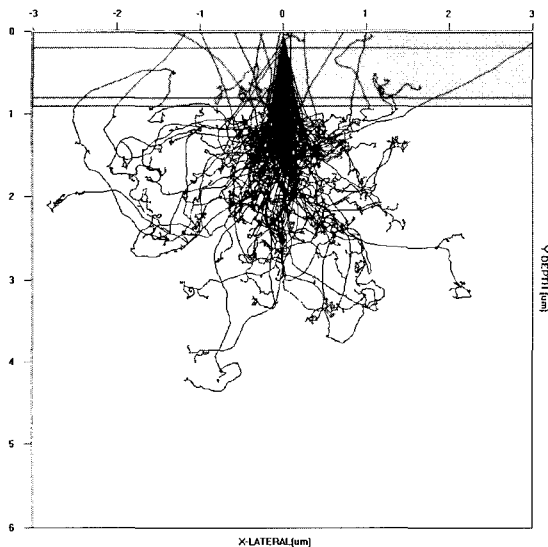


그림 1. 전자빔 에너지 50 keV에서 0.2 μm PMMA/0.6 μm P(MMA-MAA)/0.1 μm PMMA/GaAs 기판 시뮬레이션 구조에서의 산란궤적(검은색은 1차 전자의 산란 궤적이며, 빨간색은 2차 생성 전자의 산란 궤적을 나타냄.)

였으며, 검정색은 주입된 1차 전자에 대한 산란 궤적, 빨간색은 1차 전자에 의해 생성된 2차 전자의 산란궤적을 나타낸다.

그림 2에서는 개발된 시뮬레이터의 타당성을 검증하기 위하여 0.43 μm PMMA/Si기판 구조(그림 2(a)) 및 0.43 μm PMMA/GaAs기판 구조(그림 2(b))에서 내부 셀 전자와의 비탄성 산란 메커니즘에 대해서 다원자 층을 단일 원자로 취급하여 내부 셀 전자들을 재배열한 이전 문헌 [2,6] 에 방식에 의한 모델과 본 연구에서 제안한 각 원자의 각 내부 셀 전자의 산란 단면적에 의한 확률에 따른 비탄성 산란을 적용한 모델과의 차이점을 보이기 위한 비교 그림을 나타내었다. 그림 2(a)에서는 0.43 μm PMMA/Si기판 구조에서 초기 전자빔 입사 에너지 3, 5, 15 및 30 keV에 대해 리지스트 층에 전이 흡수된 1차원 에너지 깊이 분포를 나타내었으며, 그림 2(b)에서는 0.43 μm PMMA/GaAs기판 구조에서 전자 에너지 30, 50 및 100 keV에 대해 리지스트 층에 전이 흡수된 1차원 에너지 깊이 분포를 나타내었다. 이전 문헌 방식의 모델에서는 PMMA($\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$) 리지스트에 대해 유효 전자번호 3.6, 유효 질량 6.674467[g/mole], 전자 셀의 구조는 $1s^{0.93}(340\text{eV})$ 및 최외각 전자 $2s^{2.67}$ 을 사용 [2] 하였으며, GaAs는 유효 전자번호 32.036, 유효 질량 72.414544 [g/mole]을 사용하였으며, 이것은 Ge과 매우 유사하므로 Ge의 전자껍질 구조 [13] 를 사용하여 유사하게 $1s^2(11103.0\text{ eV})$ $2s^2(1414.6\text{ eV})$ $2p^2(1248.1\text{ eV})$ $2p^4(1217.0\text{ eV})$ $3s^2(180.1\text{ eV})$ $3p^2(124.9\text{ eV})$ $3p^4(120.8\text{ eV})$ $3d^4(29.8\text{ eV})$ $3d^6(29.2\text{ eV})$ 및 최외각 전자는 자유 전자로 가정하여 $(4s4p)^{4.036}$ 으로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 여기서, 괄호 안의 에너지는 내부 궤도 전자의 결합 에너지를 나타낸다.

그림 2(a)에서 실리콘 기판을 가정한 이유는 리지스트 층에 전이되는 에너지 분포에 관심이 있으므로 기판 층에 의한 제안된 모델에서의 후방 산란 효과를 배제하고 다원자 층인 PMMA 층에서의 제안된 새로운 모델과의 차이점을 비교하고자 함이었다. 새로운 모델은 3과 5 keV의 낮은 에너지에서 유효 전자번호와 유효 질량을 사용한 기존 방식의 모델과 큰 차이를 나타내고 있으나, 15 keV 이상의 결과에서는 거의 차이가 나타나지 않았다. 이것은 15 keV나 30 keV의 에너지 전자빔인 경우에는 내부

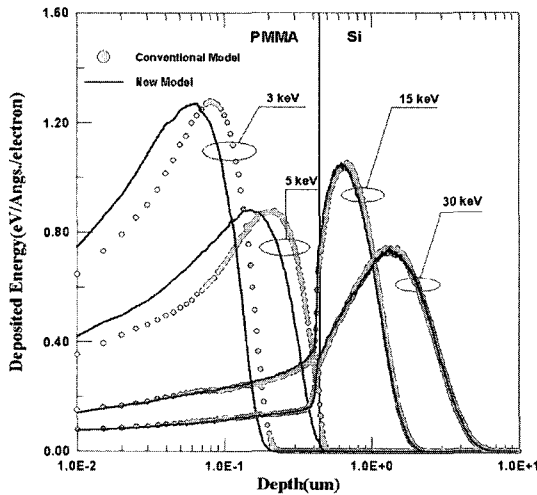
셀 전자에 의한 2차 전자 생성 효과에 의한 리지스트 층에 전이 흡수 에너지가 무시할 수 있을 정도로 작다는 것을 의미한다. 비교적 낮은 3 및 5 keV 시뮬레이션 결과에서는 비탄성 산란 메커니즘에 대해 새로이 제안 적용한 모델과 문헌 [2,6] 의 방식을 적용한 기존 모델이 큰 차이를 나타내고 있는데, 이는 PMMA 층에서의 전자꺾질 구조를 단일 원자로 취급하여 재배열한 전자꺾질 구조가 비탄성 산란 메커니즘을 표현하는 데 부정확한데서 기인하는 것으로 여겨진다. 이에 대한 근거로 플라즈몬 진동 산란 단면적과 Moller 산란 단면적에서 사용되는 최외각 자유 전자 농도를 나타내는 $\sum_k (N_k Z_k^2)$ 를 PMMA 층에 대해 계산해 보면 $(5.69 \times 1 + 3.55 \times 6 + 1.42 \times 4 = 32.67) \cdot 10^{22}/\text{cm}^3$ 이 된다. 그러나 유효 전자번호를 사용한 모델에서는 $(10.64 \times 2.67 = 28.4088) \cdot 10^{22}/\text{cm}^3$ 으로 $4.2612 \times 10^{22}/\text{cm}^3$ 정도의 큰 차이로 자유 전자 농도를 적게 계산하고 이로 인한 산란 단면적은 작게 계산되어 이 메커니즘들에 의한 비탄성 산란 확률이 줄어들게 된다. 따라서 본 모델보다도 표면으로부터 더 깊은 리지스트 층에 전이 흡수된 에너지 분포를 만들게 되고, 본 모델은 표면 쪽에 치우치게 되는 분포를 나타내게 된다. 이것은 두 모델간의 유효 전자 농도를 구하기 위한 전자꺾질 구조의 재배열 문제에서 기인한다.

그림 2(b)에서 0.43 μm PMMA/GaAs 기판에서의 비교적 높은 에너지인 30 keV, 50 keV 및 100 keV

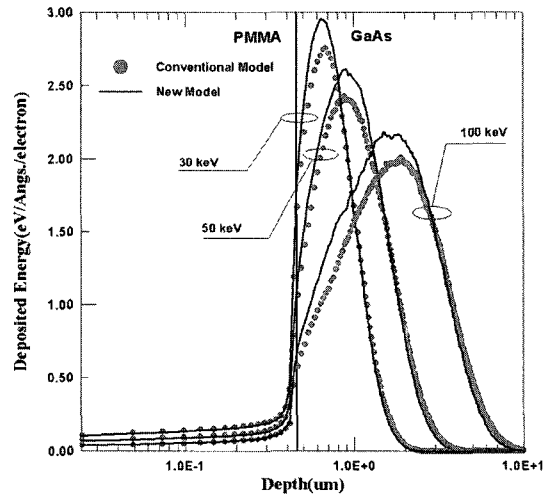
에너지에서의 리지스트 층에 전이 흡수된 1차원 에너지 분포를 보면 PMMA 보다는 GaAs 기판에서의 산란에 의한 1차원 전이 흡수된 에너지 분포가 본 모델이 약간 높게 계산되었다. 이는 본 모델이 GaAs 기판의 동일 깊이에 대한 측면 방향으로 전자가 더 많이 산란되어 깊이 방향으로 더 적게 들어감을 의미한다. 따라서 깊이 0.43 μm 인터페이스 면에서 본 모델의 결과가 후방 산란 효과가 약간 더 높게 나타났다. 이는 앞서 기술한 저 에너지에서의 자유 전자들과의 산란 메커니즘들에 기인한 차이라기보다는 Vriens의 모델을 다원자 층으로 새로이 확대 적용한 본 모델에서 내부 셀 전자 산란 메커니즘을 각 구성 원자의 결합 에너지를 그대로 이용한 산란 단면적 확률에 의해 결정된 모델링과 유효 전자번호를 사용한 평균 내부 셀 전자의 결합 에너지 차에 기인한 것으로 여겨진다.

이러한 차이점들을 화합물 타겟에 대해 기존 유효 전자번호 모델과 비교하였으며, 비교적 물리적으로 타당한 리지스트 층에 전이 흡수된 에너지 분포를 얻을 수 있으므로 해서 본 모델이 성공적으로 다층 리지스트 및 화합물 반도체 기판 구조에서 적용될 수 있음을 보였다.

그림 3에서는 GaAs 및 InP 기판 위에 T-게이트 형성을 위한 3층 리지스트 (0.2 μm PMMA/0.6 μm P(MMA-MAA)/0.1 μm PMMA)를 코팅한 후 시뮬레



(a) 0.43 μm PMMA/Si 기판



(b) 0.43 μm PMMA/GaAs 기판

그림 2. 제안된 새 모델(실선)과 유효전자번호 및 유효질량을 사용한 기존모델(점)과의 비교.

이전 결과를 비교한 그림이다. 전자 한 개당 전이된 에너지 분포로 나타내었기 때문에 그 차이가 작아 쉽게 구분되어 나타나지는 않지만, InP 기판에서의 리지스트 층에 전이 흡수된 에너지가 GaAs 기판 보다 약간 높에 나타났으며, 기판 층에서는 GaAs 기판이 높은 전이 에너지 분포를 나타내어, 기판과의 인터페이스 면에서는 GaAs 기판이 약간 높게 나타났다. 시뮬레이션 결과에서 리지스트 각 계면에서의 밀도 차이에 의한 분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 표면층인 0.2 μm PMMA층(1.18 g/cm^3)과 중간층인 copolymer 층(P(MMA-MAA))의 밀도(0.83 g/cm^3) 차이에 의해 이 두 층간 계면 근방에서의 전이 에너지 분포가 감소하는 현상을 보이고 있으며, 그 반대 경우인 0.1 μm PMMA층과 copolymer층 사이에는 분포가 GaAs나 InP 기판의 후방 산란 효과와 겹쳐 급격히 상승하는 분포를 보여 주고 있다. 이러한 분포는 T-게이트 폭단의 넓이 즉, 현상 후 T-게이트 길이를 결정하는 중요한 에너지 전이 분포가 된다. 이러한 1차원 분포는 다음 2차원 결과 그림에서 2차원적으로 확인할 수 있다.

그림 4에서는 3층 리지스트 구조에서 중간층인

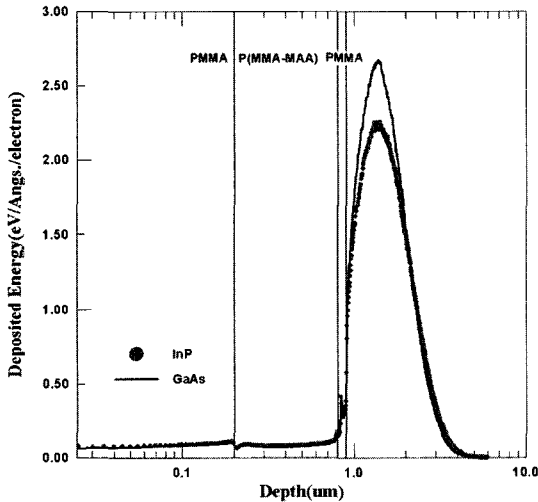


그림 3. 동일한 3층 리지스트(0.2 μm PMMA/0.6 μm P(MMA-MAA)/0.1 μm PMMA) 구조에서 GaAs 및 InP 기판 구조에서의 시뮬레이션 비교 결과.

copolymer 층의 두께를 0.4 μm 및 0.6 μm 설정한 후에 copolymer 층의 영향을 분석한 결과이다. 0.4 μm 의 두께를 갖는 copolymer 층이 0.6 μm 두께에 비해 리지스트 층에 더 많은 전이 흡수 에너지 분포를 나타내었다. 이것은 현상 공정 시에 헤드 층이 동일 조건의 현상 시간에 대해 더 넓고 깊게 현상되어 들어갈 수 있음을 의미한다. 중간층의 두께에 따른 후방 산란 효과를 잘 보여 주고 있다.

그림 5에서는 밀리미터파 주파수 대역용 PHEMT 소자의 T-게이트 제작을 위한 전자빔 리소그래피 공정 조건에 대한 3층 리지스트 구조에 대해 시뮬레이션을 수행한 후 리지스트 층에 전이 흡수된 에너지 분포를 나타낸 결과를 SEM 측정 결과와 비교하여 나타내었다. Leica EBP4-4HR 전자빔 노광 장비를 이용하여 전자빔 에너지 50 keV, T-게이트 형성을 위한 리지스트 및 기판구조는 0.2 μm PMMA/0.6 μm P(MMA-MAA)/0.1 μm PMMA/GaAs기판 구조가 고려되었으며, 표 1에 실험에 의해 최적화된 현상 공정 조건 [11] 을 정리하여 나타내었다. 가우시안 빔을 고려하였고, 산란 제적을 구한 후 가우시안 빔으로의 컨벌루션(convolution) 알고리즘 [4,8] 을 적용하였다.

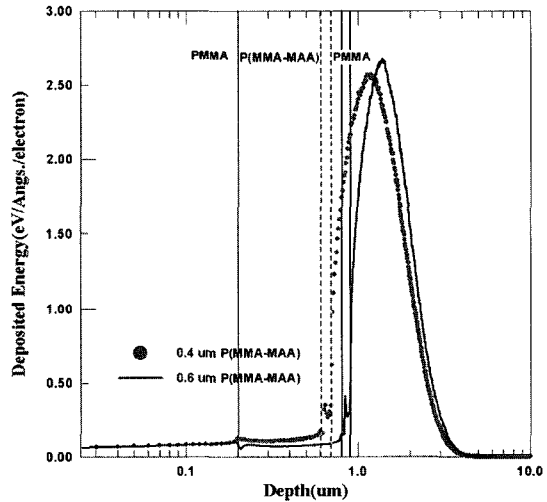
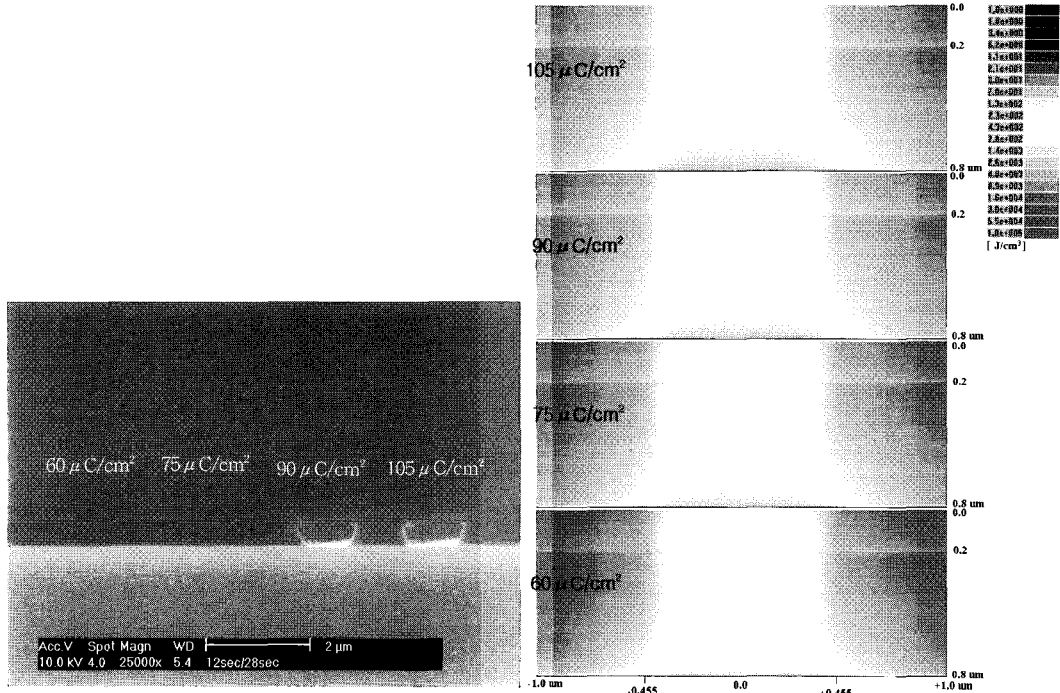
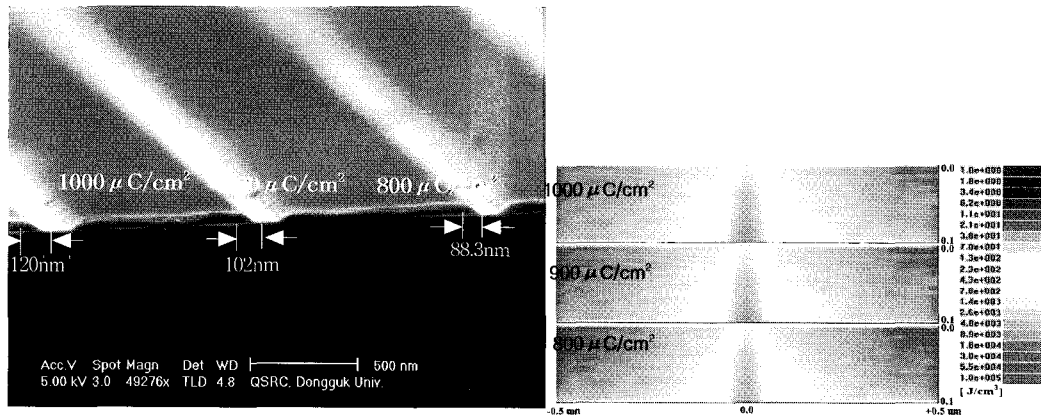


그림 4. GaAs 기판 위에 T-게이트 형성을 위한 0.2 μm PMMA /P(MMA-MAA)/0.1 μm PMMA 3층 리지스트로 코팅된 구조에서 중간층인 copolymer 층(P(MMA-MAA))의 두께를 0.4 μm 및 0.6 μm 설정시의 copolymer 층의 두께 효과를 보기 위한 시뮬레이션 비교 결과



(a) 헤드 형성을 위한 0.2 μm PMMA/0.6 μm P(MMA-MAA)/GaAs 기판에서 리지스트층에 전이 흡수된 에너지 분포



(b) 풋 형성을 위한 0.1 μm PMMA/GaAs 기판에서 리지스트 층에 전이 흡수된 에너지 분포

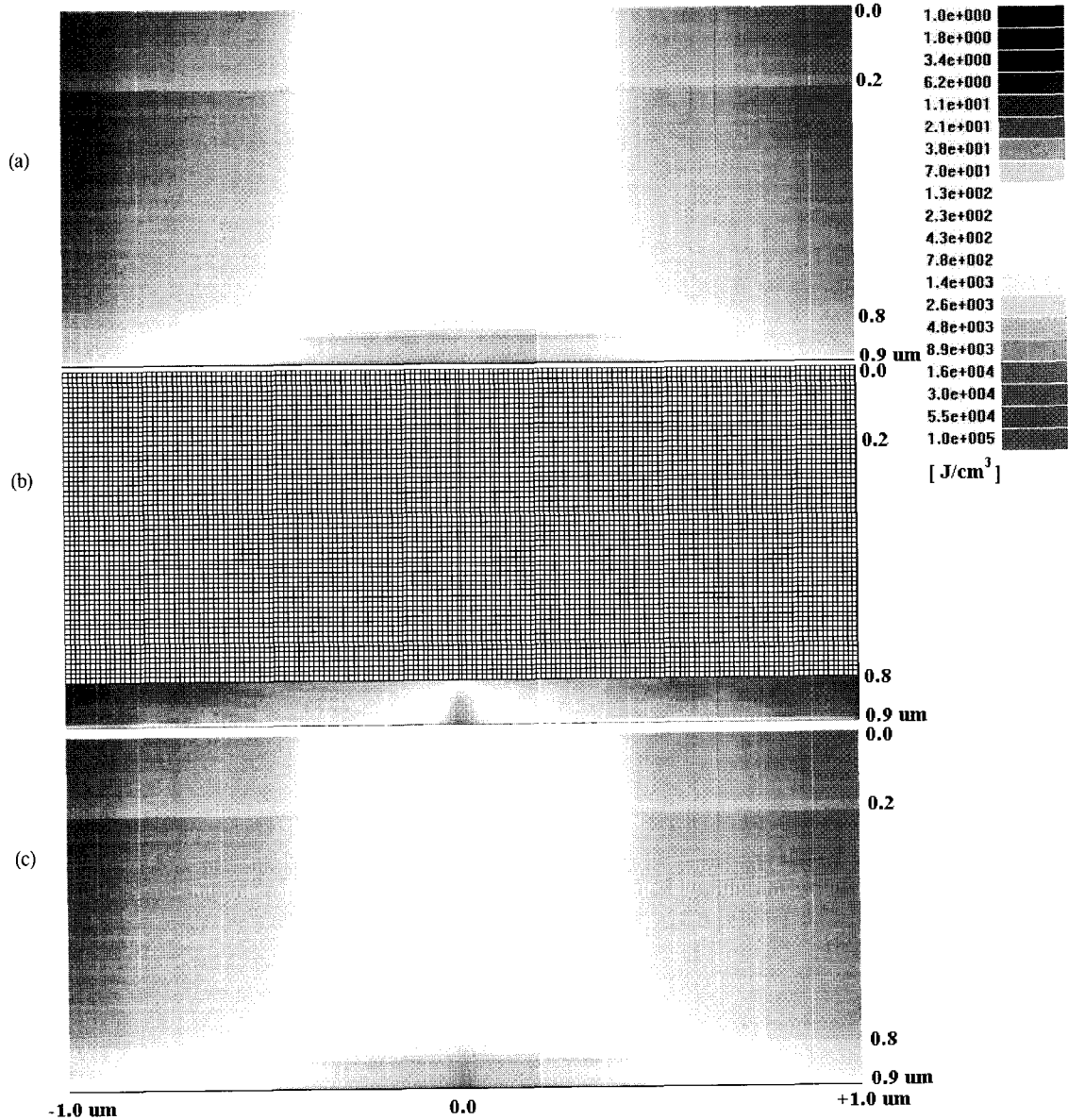
그림 5. 0.1 μm T-게이트 형성을 위한 (a) 1차 노광 및 (b) 2차 노광 최적 조건을 설정하기 위한 SEM 측정 결과와 시뮬레이션에 의한 리지스트에 전이 흡수된 에너지 분포 결과 비교

표 1. T-게이트 헤드 및 풋단을 형성하기 위한 노광 실험 조건.

	Dose[uC/cm ²]	Spot size[nm]	Pixel Step수	현상 공정
Gate Head	90	150	5	MCB (12초) 현상 후 Methanol:IPA = 1:1 (28초) 현상
Gate Foot	900	50	1	MIBK:IPA = 1:3 (120초) 현상

그림 5(a)에서는 T-게이트 헤드(head) 단($0.2 \mu\text{m}$ PMMA/ $0.6 \mu\text{m}$ P(MMA-MAA)/GaAs기판)을 형성하기 위한 최적 노광 조건을 찾기 위해 실험한 SEM 측정과 시뮬레이션한 전이 에너지 분포를 동시에 나타내었다. Dose $60 \sim 105 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 구간에 대해 $15 \mu\text{C}/\text{cm}^2$

차이를 두어 실험한 조건에서의 단일 라인의 2차원 단면 전이 에너지 분포로 나타내었다. 후방 산란에 의한 기판과의 인터페이스 부근에서 dose가 높아질수록 기판 경계면에서의 측면 전이 에너지 분포가 넓어짐을 확인할 수 있었다.



(c) 리지스트 층에 전이 흡수된 에너지 분포

그림 6. $0.1 \mu\text{m}$ T-게이트 형성을 위한 $0.2 \mu\text{m}$ PMMA/ $0.6 \mu\text{m}$ P(MMA-MAA)/ $0.1 \mu\text{m}$ PMMA/GaAs 기판의 구조에서 리지스트에 전이 흡수된 (a) 1차 노광 에너지 분포, (b) 2차 노광 후의 에너지 분포 및 (c) 1차 및 2차 노광 에너지 분포의 합으로서 시뮬레이션된 총 에너지 분포 결과

그림 5(b)에서는 T-게이트 풋(foot) 단($0.1 \mu\text{m}$ PMMA/GaAs기판)을 형성하기 위한 노광 조건을 실험한 SEM 측정과 시뮬레이션한 전이 에너지 분포를 나타내었다. 실험에서는 $0.1 \mu\text{m}$ 의 얇은 PMMA 층을 형성하기 위해 MCB를 혼합하여 사용하였으나, MCB는 상온에서 휘발성이 강하므로 PMMA 리지스트 코팅 및 베이킹(baking) 과정에서 전부 날라 간 것으로 가정하여 PMMA 층만 고려하였다. Dose $800 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, $900 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 및 $1000 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 에 대해 실험한 SEM 측정 결과와 시뮬레이션한 리지스트 층에 전이 흡수된 에너지 분포를 동시에 나타내었다. Dose가 높을수록 기판 경계면에서의 측면 전이 에너지 분포가 높게 나타남을 정량적으로 잘 보여주고 있다.

그림 6에서는 $0.1 \mu\text{m}$ T-게이트 형성을 위한 $0.2 \mu\text{m}$ PMMA/ $0.6 \mu\text{m}$ P(MMA-MAA)/ $0.1 \mu\text{m}$ PMMA/GaAs 기판 구조에서 리지스트에 전이 흡수된 (a) 1차 노광 에너지 분포, (b) 2차 노광 후의 에너지 분포 및 (c) 1차 및 2차 노광 에너지 분포의 합으로서 시뮬레이션된 총 에너지 분포 결과를 나타내었다. 시뮬레이션된 총 전이 흡수 에너지 분포는 1차 및 2차 노광의 결과로 더하여 지므로 풋단을 형성하기 위한 $0.1 \mu\text{m}$ PMMA/GaAs 기판 구조만 고려한 그림 5(b)에서의 dose $900 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 노광 공정 조건에 대한 에너지 전

이 분포 보다 높은 흡수 에너지 분포를 나타내 주고 있다. 이것은 풋단 형성을 위한 $0.1 \mu\text{m}$ PMMA 리지스트 층에서는 1차 및 2차 노광의 결과로 dose가 $900+90=990 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 정도가 되므로 최적 조건 설정 시에 이를 고려해 보정해 줄 필요가 있다.

그림 7에서는 sub- $0.1 \mu\text{m}$ 급 T-게이트 풋단을 형성하기 위해서는 $0.1 \mu\text{m}$ 정도의 얇은 PMMA 층에서의 전자빔 직경 효과를 고려할 필요가 있는데, 이를 위해 전자빔 spot 직경 20 nm , 50 nm 및 90 nm 에 대해 1 픽셀 라인에 대해 노광한 후 절단한 단면에서의 2차원 전이 에너지 분포 비교 결과이다. 전자빔 직경이 작을수록 패턴 전이 해상도가 높고 근접 효과(proximity effect)를 최소화할 수 있음을 잘 보여주고 있다.

이러한 리지스트에 전이 흡수된 에너지 분포 결과들로부터 현상액에 따른 현상 거동과 최적의 현상 시간을 찾을 수 있다면 sub- $0.1 \mu\text{m}$ 급 T-게이트 형성 공정을 최적화할 수 있으리라 여겨진다.

4. 결 론

본 연구에서는 밀리미터파 대역 통신을 위한 GaAs 기반의 PHEMT 소자의 T-게이트 형성 공정을 위해 화합물 반도체 기판 위에 다층 리지스트가 코

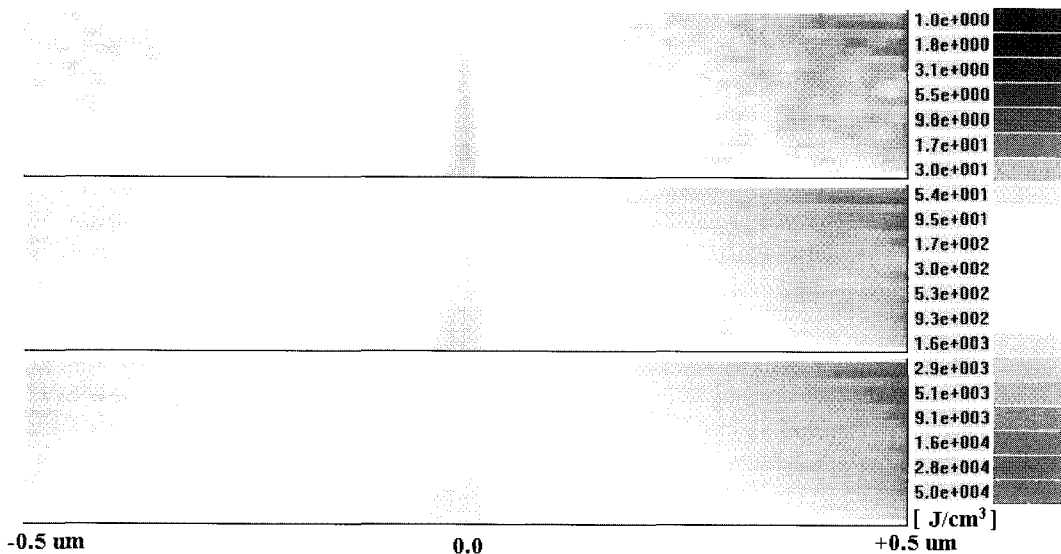


그림 7. Sub- $0.1 \mu\text{m}$ 풋단을 형성하기 위한 동일 Dose $900 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, 전자빔 에너지 50 keV , $0.1 \mu\text{m}$ PMMA/GaAs 기판구조에서 가우시안 빔에 따른 노광 전자빔 직경 효과(1 픽셀의 단일 라인에 대해 노광 후 절단한 2차원 단면에서의 노광 에너지 흡수 분포에 대한 결과이다.)

팅되어 있는 다원자 다층 타겟 구조에서 전자빔 리소그래피 공정 시뮬레이션을 수행할 수 있는 물리적 토대의 효율적인 몬테 카를로 시뮬레이터를 개발하였다. 새로이 제안 개발된 다원자 다층 구조 모델의 차이점을 기존 모델과 비교하였으며, 그 물리적 타당성에 대해 논의 하였다. 또한, 제안된 모델을 사용하여 밀리미터파 대역용 PHEMT 소자 개발에 필수적인 공정인 0.1 μ m T-게이트 형성 공정에 대한 전자빔 리소그래피 노광 공정에 적용하여 리지스트 층에 전이 흡수된 노광 에너지 분포를 물리적으로 타당하며, 정확하게 정량적으로 계산하였다. 1차 및 2차 노광에 의해 리지스트 층에 전이된 에너지 분포를 통하여 특정 현상액에서의 현상 경향을 분석할 수 있으므로 해서 최적의 T-게이트 노광 공정 조건을 찾는 데 도움이 되리라고 기대된다.

현재 다층 에피 구조를 갖는 다층 다원자 에피 성장 기관에서도 시뮬레이션을 할 수 있도록 구성되어 있으나 본 논문에서는 적용 가능성에 대해서만 논의하였다. T-게이트 형성 공정 분석과 같은 보다 더 검증된 모델을 수립하기 위해서는 현상 모델의 구축이 필수적이며 현재 이에 대한 연구가 진행 중에 있다.

감사의 글

이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 신진교수연구과제 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사를 드립니다(KRF-2001-003-E00124).

참 고 문 헌

[1] M. Kotera, J. Appl. Phys. **65**, 3991 (1989).
 [2] Kang-Yoon Lee, Guang-Sup Cho, and Duk-In Choi, J. Appl. Phys. **67**, 7560 (1990).
 [3] D. C. Joy, *Monte Carlo Modeling for Electron Microscopy and Microanalysis* (Oxford university Press, New York. 1995).
 [4] 서태원, 서울대학교 석사학위 논문, 1995.
 [5] M. Yasuda, H. Kawata, and K. Murata, J. Appl. Phys. **77**, 4706 (1995).
 [6] Y. M. Gueorguiev, D I Ibanov, and G M Mladenov, Vacuum **47**, 1227 (1996)
 [7] Su-Hwan Kim, Young-Mog Ham, Wongyu Lee, and Kukjin Chun, Microelectronic Engineering **41/42**, 179 (1998).
 [8] YoungJae Lee, Ph.D. thesis, Seoul National University, 2001.
 [9] X. Sun, Z. J. Ding, Q. R. Pu, H. M. Li, Z. Q. Wu, W. Q. Gu, K. W. Peng, G. J. Wu, F. A. Zhang, and N. K. Kang, J. Appl. Phys. **92**, 3641 (2002).
 [10] SIGMA-C company사의 <http://www.sigma-c.de/home.html> 홈 페이지 참조.
 [11] 임병욱, 김성찬, 김해성, 신동훈, 이진구, 2001년 대한전자공학회 하계학술대회 논문집 **24**(1), pp.189~192 (2001).
 [12] Frank Robin, Andrea Orzati, Otte J. Homan, and Werner Bachtold, J. Vac. Sci. Technol. B **18**, 3445 (2000).
 [13] Electron shell binding energy data taken from the web site <http://www.webelements.com/>
 [14] R. Browning, T. Z. Li, B. Chui, Jun Ye, R. F. W. Pease, Z.Czyzewski, and D. C. Joy, J. Appl. Phys. **76**, 2016 (1994).
 [15] Kamil A. Valiev, *The Physics of Submicron Lithography*, (Plenum Press, New York and London. 1992).