

PMMA/P(MMA/MAA) 구조에서 0.1 μ m T-gate 형성을 위한 전자빔 리소그래피 공정에 관한 연구

최상수 · 이진희 · 유형준 · 유기수* · 이상윤**

한국전자통신연구소 반도체연구단

*원광대학교 반도체과

**경북대학교 물리학과

A Study on Electron Beam Lithography for 0.1 μ m T-gate Formation at P(MMA/MAA)/PMMA Structure

Sang-Soo Choi, Jin-Hee Lee, Hyung Joun Yoo, Ki-Su Yoo*, Sang Yun Lee**

Semiconductor Division, ETRI, Taejeon, Korea

*Department of Semiconductor, Wonkwang University, Iri, Korea

**Department of Physics, Kyungpook National University, Taegu, Korea

초 록 30KV 전자빔리소그래피 장치를 사용하여 PMMA 3000 Å/P(MMA/MAA) 6000 Å의 이중 구조에서 foot width 0.1 μ m이하, head width 0.4 μ m의 T-gate를 형성하였다. PMMA/P(MMA/MAA)/GaAs 구조에 대한 Monte Carlo 시뮬레이션 결과, 산란반경 0.1 μ m에서 전방산란전자와 후방산란전자의 에너지 비는 19.5 : 1로 나타났다. 전자빔리소그래피 공정에 필요한 PMMA 및 P(MMA/MAA)의 열처리 조건, 설계 선폭에 대한 패턴감도를 구하였다. MIBK : IPA=1 : 1현상액에 대한 PMMA 및 P(MMA/MAA)의 감마값(γ value)은 2.3이었다. 광 및 전자빔리소그래피 장치의 혼합사용(mix-and-match) 결과 층간정렬도(alignment accuracy)는 0.1 μ m(3σ) 이하를 얻었다.

Abstract This article reports on the formation of T-gate with 0.1 μ m foot and 0.4 μ m head width at PMMA/P(MMA/MAA) resist structure using a 30KV electron beam lithography system. From the result of Monte Carlo simulation on PMMA/P(MMA/MAA)/GaAs, we obtain the dissipation energy ratio of forward-scattered electron and back-scattered electron within 0.1 μ m scattering radius is 19.5 : 1. 0.1 μ m T-gate has been formed with 30KV gaussian electron beam at a 440 μ C/cm² dosage. The gamma value of PMMA and P(MMA/MAA) at MIBK : IPA=1 : 1 developer was 2.3. The overlay accuracy(3σ) from mix-and-match of optical stepper and E-beam lithography system for fabricating HEMT device is accomplished below 0.1 μ m.

1. 서 론

GaAs의 HEMT(high electron mobility transistor) 소자의 고주파 성능(high frequency performance)을 증가시키기 위해서는 게이트 선폭을 줄여야 한다. 단층 레지스트 전자빔리소그래피 공정을 이용하면 게이트 선폭을 0.1 μ m이하로 줄일 수 있으나, 게이트 선폭의 감소에 따른 저항의 증가로 HEMT 소자의 특성이 오히려 나빠지게 된다. 이 문제를 해결하기 위해 소자의 게이트 선폭은 줄이고 단면적

을 증가시켜야 한다. 이를 위해서는 게이트 형태를 T 혹은 mushroom형태로 제작해야 한다.

일반적인 T-gate의 형성은 전자빔에 대한 하층 레지스트인 PMMA와 상층 레지스트인 P(MMA/MAA)의 감도 차이에 따라 동일한 전자 에너지를 흡수하여도 두 레지스트의 현상 선폭이 달라지는 것을 이용한 것으로 현상 후 T형태를 얻는다. 이를 위해서는 이중 레지스트 구조에서 상층 레지스트의 감도가 하층 레지스트의 그것보다 우수해야 한다^{1,2)}.

일반적으로 0.1 μ m T-gate를 제작하기 위해 전자빔 직경을 최소로 하고 근접효과를 제거하기 위해 가속전압 50KV 이상의 전자빔리소그래피 장치를 사용한다³⁾. 이때 PMMA/P(MAA/MMA)의 이중레지스트 구조를 사용하면 가속전압이 높아 입사전자의 입체각(solid angle)이 작기 때문에 레지스트 단면이 직각으로 형성된다. 이로 인해 게이트 metal 증착 후 lift-off가 되지 않기 때문에 공정이 복잡한 PMMA/P(MMA/MAA)/PMMA의 3층 레지스트를 사용하게 된다.

본 논문은 PMMA 3000 Å/P(MMA/MAA) 6000 Å의 이중 구조에서 30KV 가속전압의 전자빔리소그래피 장치를 이용하여 0.1 μ m T-gate를 제작하기 위한 전자빔리소그래피 시뮬레이션 및 공정 연구에 관한 것이다.

먼저 30KV 전자빔리소그래피 장치에서 0.1 μ m 패턴 형성을 위해 전자빔 직경(beam diameter)이 최소 0.1 μ m 이하가 되는 장치의 변수를 구하였다. 또 P(MMA/MAA)/PMMA/GaAs 구조에 대한 전자빔리소그래피 특성을 파악하기 위해 Monte Carlo 시뮬레이션, PMMA 및 P(MMA/MAA) 레지스트 특성, 선폭에 따른 전자빔의 패턴감도(pattern sensitivity) 및 노광에너지에 대한 선폭 변화 등의 실험결과를 기술하였다.

그리고 HEMT 소자 제작시 필요한 광 및 전자빔리소그래피 장치의 혼합사용(mix and match)을 위해 층간정렬도(alignment accuracy)를 분석하였으며, 본 실험으로 제작한 0.15 μ m HEMT 소자의 특성을 간략하게 언급하였다.

2. 실험

설계된 테스트 패턴은 최소 0.05 μ m(2pass line)에서 0.25 μ m까지 0.025 μ m 단계로 증가하도록 설계하였다. 실험은 Fig. 1과 같은 공정으로 진행하였고, 본 실험에 사용된 전자빔리소그래피 장치는 Leica에서 제작한 EBML 300 system이다. 전자빔 직경을 0.1 μ m 이하로 조정하기 위하여 전자빔리소그래피 장치의 변수를 고정시켰다. 레지스트의 두께는 3000 Å 게이트 금속막 증착 후 lift-off를 고려하여 PMMA 3000 Å/P(MMA/MAA) 6000 Å의 구조를 사용하였다. PMMA계열의 일반적인 연

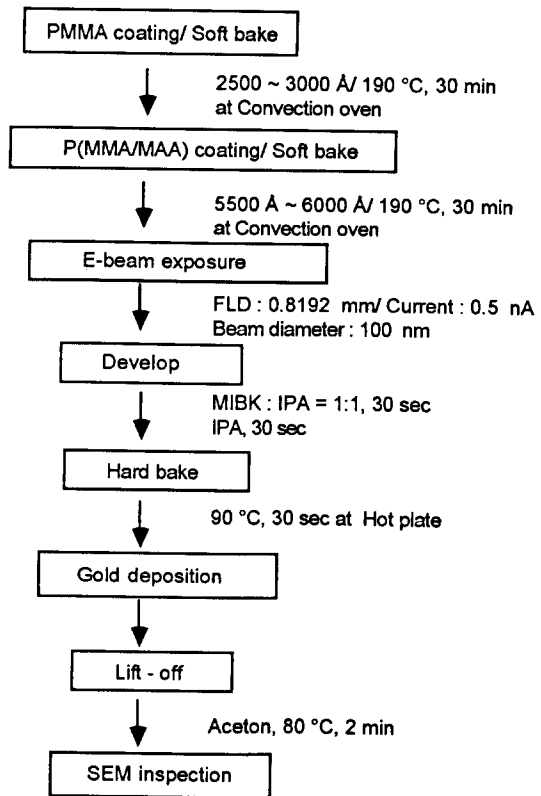


Fig. 1. Process procedure for T-gate.

조(soft bake) 조건인 150 $^{\circ}$ C, 30분을 사용하면 증착시 챔버 및 기판의 온도 상승으로 인해 PMMA/P(MMA/MAA)가 수축되어 레지스트가 변형되는 현상이 가끔 발생하였다. 이러한 변형을 막기 위해 PMMA 및 P(MMA/MAA)의 연화건조 온도를 190 $^{\circ}$ C로 상향 조정하였고, 금속막도 3회로 나누어 증착하였다. P(MMA/MAA)/PMMA의 lift-off는 80 $^{\circ}$ C로 아세톤을 끓여 2분 동안 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. PMMA/P(MMA/MAA)/GaAs 구조에 대한 Monte Carlo시뮬레이션

Fig. 2는 P(MMA/MAA)/PMMA/GaAs 구조에서 전자 50개를 가속전압 30KV, 빔직경 0.1 μ m로 입사할 때 전자의 자취를 나타낸 것이다⁴⁾. 후방산란원천(backscattering source)은 PMMA 표면에서 1.2~1.8 μ m지점인 GaAs내부임을 알 수 있다. Fig. 3은 가속전압에 따른 후방산란계수를 나타내는 것으로 10KV일 때는 가속전압이 낮아 GaAs기판에 도달하기

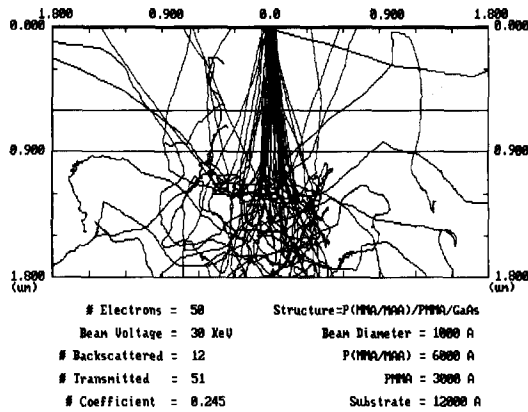


Fig. 2. Electron trajectories in P(MMA/MAA)/PMMA/GaAs structure at 30KV.

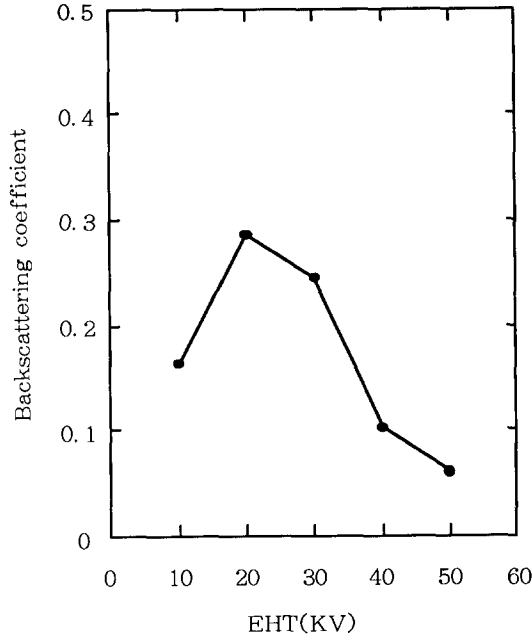


Fig. 3. Backscattering coefficient with the change of acceleration voltage.

전에 전자의 에너지가 모두 소모되어 후방산란계수가 적다. 20KV~50KV에서는 가속전압이 증가할수록 후방산란계수가 감소함을 알 수 있다. 이것은 가속전압이 높을수록 산란단면적(scattering cross section)이 작기 때문이다. Fig. 4는 GaAs기판과 PMMA와의 경계면에서 가속전압이 30KV일 때의 입사전자빔을 중심점으로 하는 산란반경에 따른 전자빔의 에너지손실밀도(energy dissipation density)를 나타낸 것이다. 산란반경 0.1 μ m 이내에서 전방

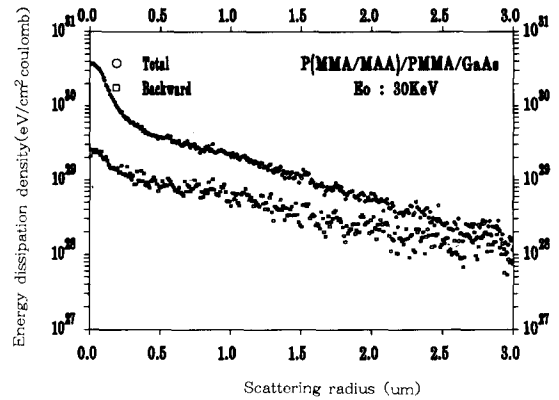


Fig. 4. Energy density dissipation with the change of scattering radius on 30KV acceleration voltage.

산란전자와 후방산란전자의 에너지 비는 19.5 : 1로 나타났다. 따라서 0.1 μ m패턴형성시 주로 전방산란전자에 의해서 레지스트가 영향을 받을 것으로 생각된다. 그러나 산란반경이 크면 후방산란전자의 영향이 증가됨을 볼 수 있다. Fig. 5는 GaAs와 PMMA 경계면에서의 가속전압에 따른 임의의 산란반경에서의 후방산란전자의 에너지손실밀도를 나타낸 것으로 가속전압이 낮을수록 후방산란전자에 의한 에너지손실밀도가 커진다. 40, 50KV에서는 산란반경에 따른 후방산란전자의 에너지손실밀도의 변화가 크지 않지만 20, 30KV에서는 산란반경에 따른 후방전자의 에너지손실밀도의 감소 폭이 심하게 나타남을 알 수 있다. 이것으로 낮은 가속전압일 경우 인접패턴 사이에서 적정에너지의 변화 즉 근접효과(proximity effect)가 심하게 나타남을 알 수 있다^{5, 6)}.

3.2. 리소그래피 공정

전자빔을 노광하기 위해 사용된 EXEL(exposure element)은 (식1)과 같이 정의된다.

$$EXEL(\mu m) = \frac{\text{Field size}(mm)}{32768} \quad (\text{식1})$$

만약 필드를 3.2768mm로 한다면 EXEL은 0.1 μ m의 단위가 된다. 본 실험에 사용된 필드 0.8192mm를 사용하면 EXEL은 0.025 μ m가 된다. 필드의 크기는 생산성(throughput) 및 빔 직경과 매우 밀접한 관계가 있으므로 용도에 따라서 잘 선택하여 사용하여야 한다. 필드의 크기가 작아질수록 stage의 움직임이 많아지므로 생산성은 떨어진다. Fig. 6은 30KV 가속

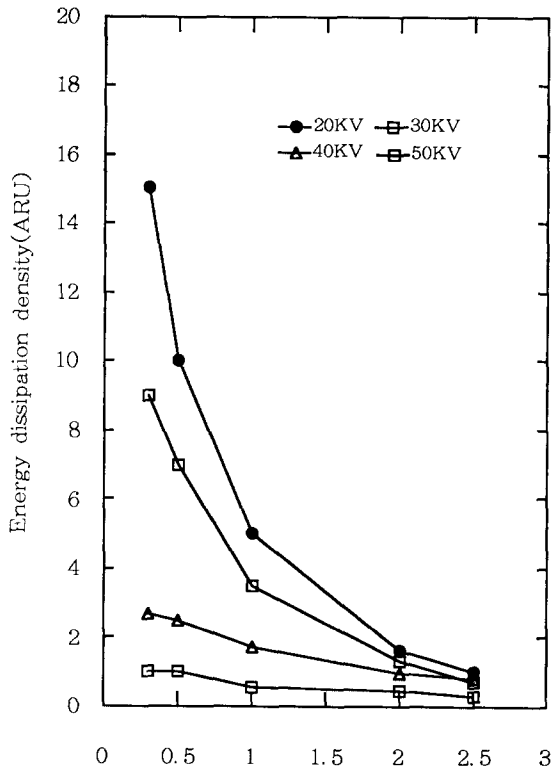


Fig. 5. Energy density dissipation with the change of scattering radius.

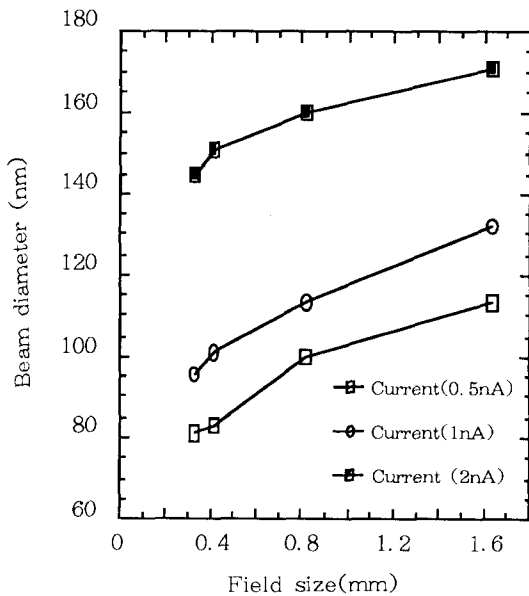


Fig. 6. Beam diameter with the change of field size and current.

가속전압에서 전류 및 필드에 따른 빔직경을 나타낸 것이다. 필드나 전류의 증가에 따라 빔직경은 커짐을 보여준다. 이것은 필드가 커짐에 따라 deflection coil의 noise가 증가하고, 전류가 증가함에 따라 S/N ratio가 증가하기 때문이다. 본 실험은 Fig. 6에 나타난 것과 같이 0.1 μ m 빔직경을 얻기 위해 필드를 0.8192mm로 고정시키고 0.5nA의 전류를 사용하였다.

본 실험에 사용된 PMMA 496K 4%와 P(MMA/MAA) type III 10%의 도포(coating)특성을 알아보기 위해 회전 속도에 대한 PMMA와 P(MMA/MAA)의 두께를 측정된 결과 Fig. 7과 같이 나타났으며, 회전속도가 증가함에 따라 레지스트의 두께가 감소함을 알 수 있다. PMMA 3000Å을 위해서는 4000RPM, P(MMA/MAA) 6000Å을 위해서는 4000RPM으로 도포하였다.

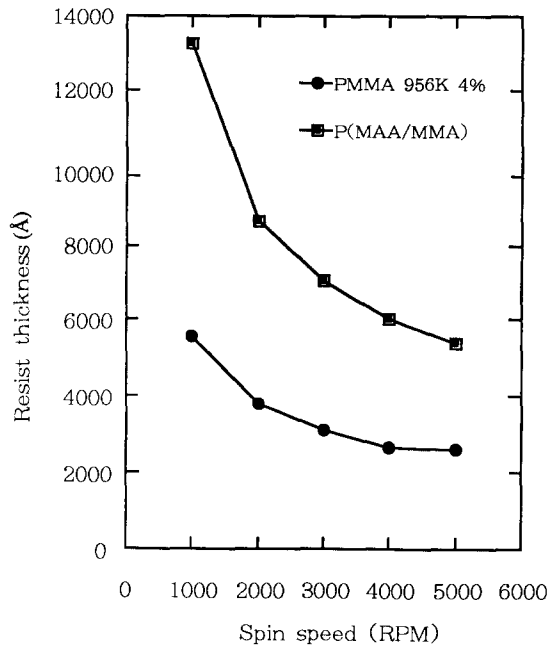


Fig. 7. Coating characteristics of PMMA and P(MMA/MAA).

패턴감도를 lift-off시킨 후 T-gate를 형성할 수 있는 최소 에너지로 정의할 때, Fig. 8은 설계된 T-gate의 foot width에 따른 패턴감도를 나타낸 것으로, EXEL의 수가 작을수록 설계된 패턴은 전방산란전자에 의한 영향만을 받으므로 패턴감도가 감소하고, EXEL의 수가 증가함에 따라 인접 EXEL에서 발생하는 후

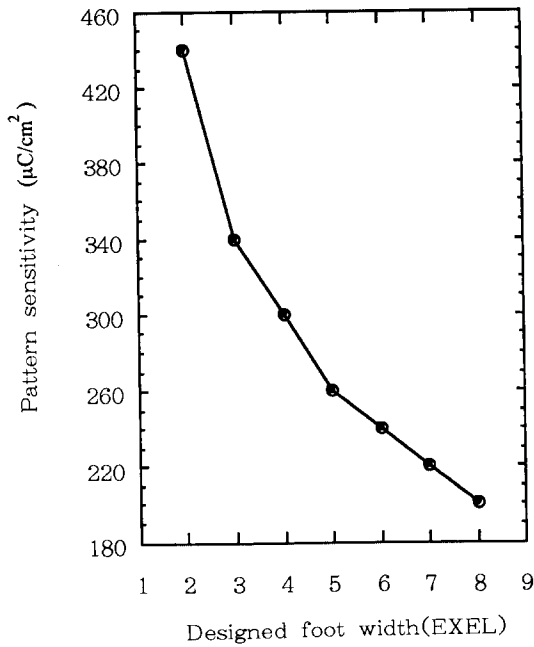


Fig. 8. Pattern sensitivity with the change of designed foot width.

방 산란전자의 영향으로 패턴감도가 증가함을 알 수 있다. Fig. 9는 2, 3, 4 pass line에 따라 dose의 증가에 따른 T-gate foot width의 변화를 나타낸 것으로, dose가 $20 \mu C/cm^2$ 증가함에 따라 약 $0.025 \mu m$ 씩 선폭이 커짐을 알 수 있다.

Fig. 10은 MIBK : IPA=1 : 1 현상액에서 $1000 \mu m \times 1000 \mu m$ 패턴에 대해 측정한 PMMA 및 P(MMA/MAA)의 감마곡선이다⁷⁾. 두 레지스트 모두 감마값은 2.3으로 $0.1 \mu m$ 급 패턴 형성을 위해 충분한 선폭형성 특성을 가진다고 생각된다. MIBK : IPA=1 : 1 현상액에서 1분 현상했을 경우 PMMA는 $34 \mu C/cm^2$, P(MMA/MAA)의 감도는 $14 \mu C/cm^2$, 2분 현상했을 경우 PMMA의 감도는 $28 \mu C/cm^2$ 그리고 P(MMA/MAA)의 경우는 $8 \mu C/cm^2$ 로 나타났다. 이것은 P(MMA/MAA)의 감도가 PMMA보다 2.5배 정도 민감함을 말해준다. 이것으로 P(MMA/MAA)/PMMA는 T-gate를 형성할 수 있는 레지스트계임을 확인할 수 있었지만, head부위를 크게 하는 데는 한계가 있다.

Fig. 11은 현상 후 금속막 증착 전 T-gate 현상 단면을 알아 보기 위해 단면을 촬영한

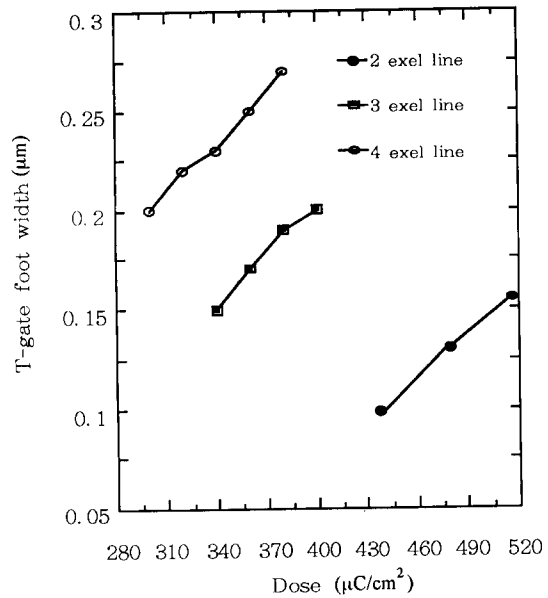


Fig. 9. T-gate foot width with the change of dosage.

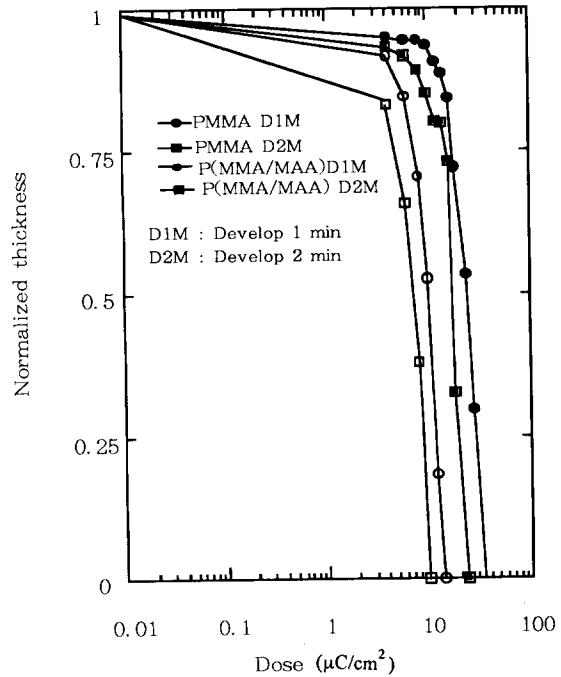


Fig. 10. Gamma curve of PMMA and P(MMA/MAA).

사진으로 첫번째 단면은 이상적으로 형성되었으나, 나머지 단면은 dose가 적정하지 못하여 PMMA가 완전히 현상되지 않은 것을 볼 수 있다. 이런 경우 금속막 증착 후 lift-off시 금

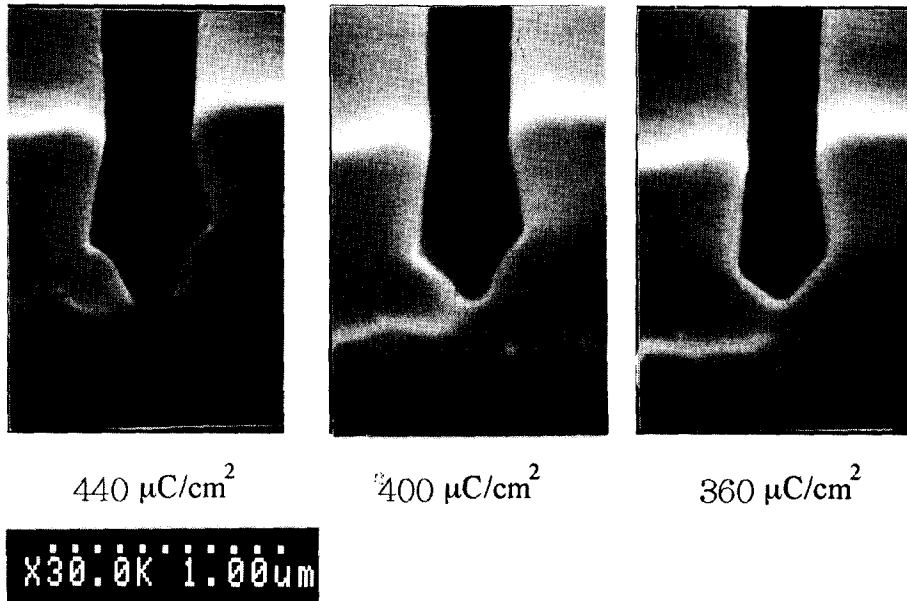


Fig. 11. Cross-sectional view of P(MMA/MAA)/PMMA on 2 pass line with the change of dosage.

속막이 모두 PMMA와 같이 제거되어 T-gate를 형성하지 못하게 된다. Fig. 12는 T-gate의 SEM사진으로 T-gate의 형태는 이상적으로 형성되었으며 dose의 증가에 따른 T-gate foot width의 변화를 알 수 있다.

3.3. HEMT 소자의 충전정렬도 및 특성

전자빔으로 게이트 부분을 형성하기 위해서 광스텝퍼(GCA Auto Step 200)로 ohmic layer에 형성한 정렬마크를 사용했다. Fig. 13은 2900 Å gold로 형성된 정렬마크 위에 P(MMA/MAA) 6000 Å 및 PMMA 3000 Å이 도포된 상태에서의 정렬신호(alignment signal)를 나타낸 것으로 정렬신호의 S/N ratio는 4로 정렬마크를 인식하는 데는 어떤 문제도 없었다. Fig. 14는 충전정렬을 하기 위해 정렬마크를 전자빔으로 scan하고 난 뒤 현상 후 찍은 현미경 사진으로 x축이 y축보다 scan length가 2배 정도 크게 나타나 있고, 정렬마크 부위에 다시 fine scan한 자취를 볼 수 있다. 이는 전자빔이 임의로 주어진 정렬마크의 위치에서 정확한 정렬 마크의 중심 위치를 찾기 위해 2단계로 정렬한 결과이다. 먼저 정렬마크를 x축으로 coarse scan하여 x위치를 인식하고 난 뒤, x축으로 scan한 거리의 1/2만큼 y축으로 coarse scan하여 정렬마크의 기본위치를 1차적으로 인식한 후 정렬마크 크기의 2배로 x,

y축 각각 30번씩 fine scan하도록 한 결과이다⁵⁾. Fig. 15는 T-gate 제작 후 측정한 충전정렬도로 3 σ 가 0.1 μ m이하가 됨을 알 수 있었다.

전자빔리소그래피로 형성한 T-gate의 공정 검정을 위해서 0.15 μ m HEMT(high electron mobility transistor) 소자를 제작하였다. 전자빔리소그래피를 사용하여 에피기판에 0.15 μ m 게이트를 형성한 후 리세스(recess) 식각을 선택적으로 수행하고 염산세정을 하여 Ti/Pt/Au로 구성된 게이트 금속을 증착하였다. 측정한 소자의 주요 특성은 잡음지수가 12GHz에서 0.46dB, 상호전달전도도(transconductance)가 475mS/mm, 차단주파수(cutoff frequency) f_c 가 80GHz인 좋은 특성을 얻었다.

4. 결 론

30KV 전자빔리소그래피 장치를 사용하여 PMMA 3000 Å/P(MMA/MAA) 6000 Å의 이중 구조에서 foot width 0.1 μ m이하 head width 0.4 μ m의 T-gate를 형성하였다. PMMA/P(MMA/MAA)/GaAs 구조에 대한 Monte Carlo 시뮬레이션 결과 30KV에서의 후방산란 계수는 0.25, 산란반경 0.1 μ m에서는 전방산란 전자와 후방산란전자의 에너지 비는 19.5 : 1로 나타났다. MIBK : IPA=1 : 1 현상액에서의 PMMA 및 P(MMA/MAA)의 감마 값은

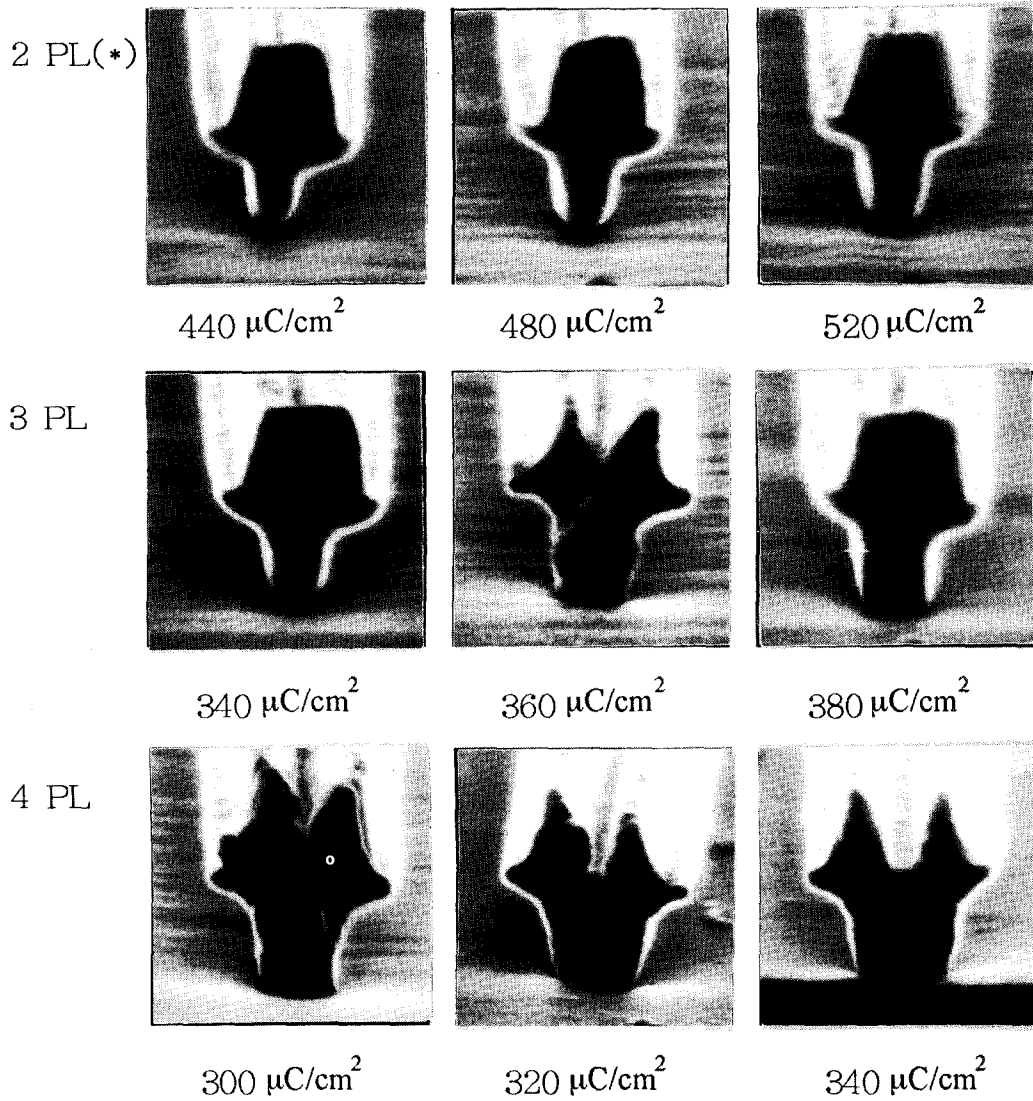


Fig. 12. T-gate with the change of pass line and dosage.

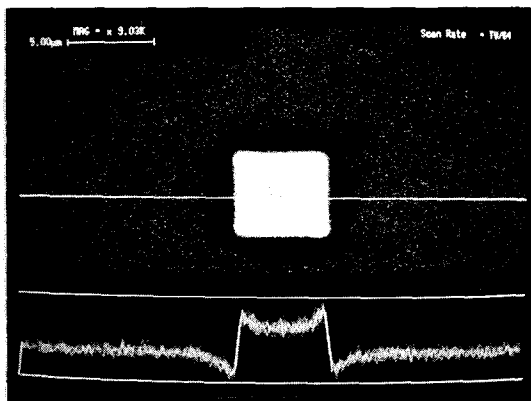


Fig. 13. Alignment signal on P(MMA/MAA)/PMMA/Au structure.

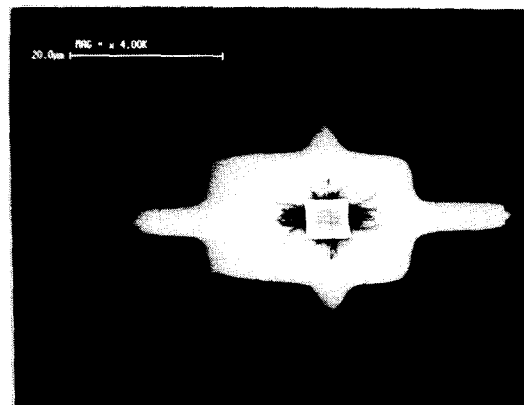


Fig. 14. Align mark after alignment and development.

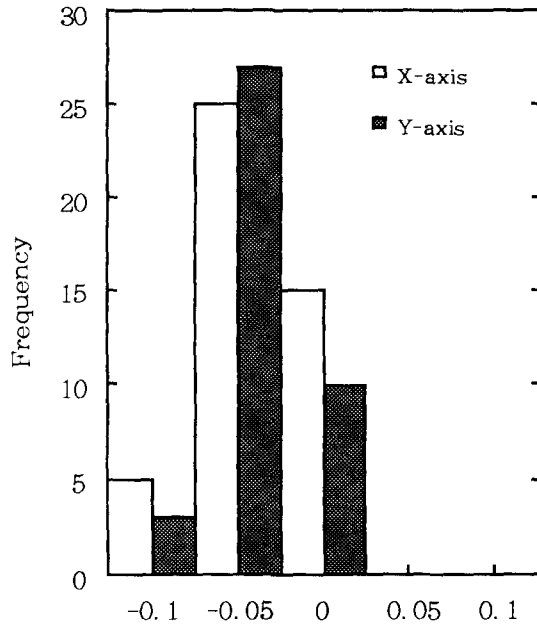


Fig. 15. Overlay accuracy after fabricating T-gate.

2.3, 그리고 $0.1\mu\text{m}$ T-gate를 형성하는데 필요한 전자빔의 적정에너지는 $440\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 로 나타났다. 본 실험 결과를 활용하여 mix-and-match 방식으로 HEMT소자를 제작하였는데

총간정렬도(3σ)는 $0.1\mu\text{m}$ 이하를 얻었다.

참 고 문 헌

1. A. Chisholm, S. Sainson, M. Feuillade and A. Clei, *Microelectronic Engineering*, 11, pp. 97~100, (1990)
2. N. Samoto, Y. Makino, K. Onda, E. Mizuki and T. Itoh, *J. Vac. Sci. Technol.*, B8(6), pp.1335~1338, (1990)
3. E. A. Dobisz, et al., *J. Vac. Sci. Technol.*, B11(6), pp.2733~2740, (1993)
4. "Electron-Beam Technology in Microelectronic Fabrication", edited by G. R. Brewer (Academic, New York, 1980), pp.60~79
5. Alec N. Broers, *IEEE Trans.*, ED 28, No.11, pp.1268~1277, (1981)
6. Mihir Parikh, *J. Appl. Phys.*, 50, No.6, pp. 4383~4387, (1979)
7. "Introduction to microlithography", edited by L. F. Thompson, C. G. Willson and M. J. Bowden, pp.166~170, (1983)
8. M. J. Penberth and N. F. Rix, *Microelectronic Engineering*, 6 pp.135~140, (1987)