[논 문] 한국재료학회지
Korean Journal of Materials Research
Vol. 14, No. 3 (2004)

초소형 전자칼럼의 제작 및 특성 연구

안승준† · 김대욱 · 김영철 · 안성준* · 김영정** · 김호섭
선문대학교 자연과학부 신소재과학과/차세대반도체기술연구소
*선문대학교 전자정보통신공학부
**선문대학교 공과대학 재료공학부

New Fabrication Method of the Electron Beam Microcolumn and Its Performance Evaluation

S. Ahn†, D. W. Kim, Y. C. Kim, S. J. Ahn*, Y. J. Kim** and H. S. Kim
Department of Physics and Advanced Material Science, Sun Moon University
*Division of Electronics, I & C Engineering, Sun Moon University
**Division of Materials Engineering, Sun Moon University

(2003년 11월 27일 받음, 2004년 2월 16일 최종수정본 받음)

Abstract An electron beam microcolumn composed of an electron emitter, micro lenses, scan deflector, and focus lenses have been fabricated and tested in the STEM mode. In this paper, we report a technique of precisely aligning the electron lenses by the laser diffraction patterns instead of the conventional alignment method based on aligner and STM. STEM images of a standard Cu-grid were observed using a fabricated microcolumn under both the retarding and accelerating modes.

Key words electron beam microcolumn, laser diffraction pattern, electron optics, laser alignment, electron beam lithography

1. 서 론

최근에 이르러 나노가공 및 공정기술, 미세전자공학, 그리고 레이저 미세가공기술 등과 같은 분야에 많은 연구자들의 관심이 높아짐에 따라 리소그라피, 전자현미경, wafer inspection, metrology, testing, recording 등에 활용할 수 있는 저전압 구동 전자빔 장치나 이온빔 장치에 대한 수요가 증가되고 있다. 이러한 장치들의 핵심 부품인 초소형 전자칼럼(microcolumn)은 10여 년 전부터 연구가 진행되어 차세대 리소그라피 기술로서 가능성이 입증되고 있다.[1-5]

반도체 분야에서는 차세대 리소그라피 기술로서 극자외선(EUV: extremely ultra violet) 리소그라피와 전자빔 리소그라피 기술(EPL: electron-beam projection lithography, EBDW: electron-beam direct write)을 가장 유력한 기술로 예측하고 있다. 극자외선 리소그라피 기술은 메모리 소자의 대량생산에 초점을 두고 개발을 하는 반면, 전자빔 리소그라피는 소량의 다품종 소자 생산을 위한 기술에 역점을 두고 있다.

B.J. Lin은 전자빔 리소그라피 장비가 300 mm 웨이퍼 생산에서 시간 당 25장 이상의 생산성을 갖게 된다면, 시설 투자 및 공정비용에 있어서 극자외선 리소그라피 기술의 고정비용보다 저렴하게 되어 메모리분야의 생산에도 경쟁력이 있을 것으로 예측하였다.[6] 또한, 개발되는 소자들의 고집적화와 미세화로 인하여 공정과정에서 사용되는 계측 및 측정기술이 광학계 장비에서 전자빔장비로 이동하고 있어, 전자빔기술의 수요가 빠르게 증가되고 있다. 초소형 전자빔원 기술은 전자빔 리소그라피, CD-SEM(critical dimension scanning electron microscope), V-SEM, wafer inspection 등의 반도체산업 분야뿐만 아니라 전자현미경(SEM, TEM, STEM) 등에 적용되는 등 제반 산업 분야 및 현대과학의 전 영역에서 중요한 핵심 기술로서 이용될 것으로 전망된다.

초소형 전자칼럼은 전자칼럼의 길이를 정교하게 최소화하여 광학 수차 값을 최소화함으로써 성능을 향상시킬 수 있다. 또한, 저 전압으로 구동하여도 고 밀도의 전자빔 전류를 얻을 수 있고, 소형이며 경량화 된 구조는 멀티빔 구조가 가능하며, sample 전류의 값이 일반적인 SEM보다 약 10~100배 정도 높기 때문에 생산력이 높은 멀티 전자빔 리소그라피로서 적용이 가능하다.

본 연구에서는 반도체 공정으로 제작된 초소형 전자렌즈들을 assemble 하기 위하여 레이저 회절무늬를 이용하여 초소형 전자칼럼을 제작한 다음 STEM(scanning transmission microscope) mode로 작동시켜 동작특성을 평가하였다.[7]

†E-Mail : sjan@sunmoon.ac.kr

2. 초소형 전자칼럼의 제작과 구조

초소형 전자칼럼은 전자 방출원(emitter), 전자렌즈(마이크로 렌즈), scan deflector, focus 렌즈(Einzel 렌즈), detector 등으로 이루어져 있다.[8] Fig. 1은 5 mm 길이의 초소형 전자칼럼의 개요도와 실제 조립된 전자칼럼을 보여주고 있다. 전자렌즈와 focus 렌즈는 실리콘과 pyrex의 적층 구조로서, anodic bonding 기법으로 정교하게 결합되어 있다.[9,10] 전자빔을 scan하는 deflector는 Mo (molybdenum) rod를 이용하여 double deflector 형태로서, 비점수차(stigmatism)의 조절을 원활히 하기 위하여 octupole 구조로 설계하여 제작하였다. Double deflector는 전자빔의 scan 영역을 확장하는 기능이 있으며, 두 개를 동시에 또는 각각을 개별 동작으로 작동할 수 있다. 전자칼럼의 작동 실험을 위한 Cu(copper)-grid sample (Fig. 6 참조)은 focus 렌즈에서 1.2 mm 지점에 위치하고 있다.

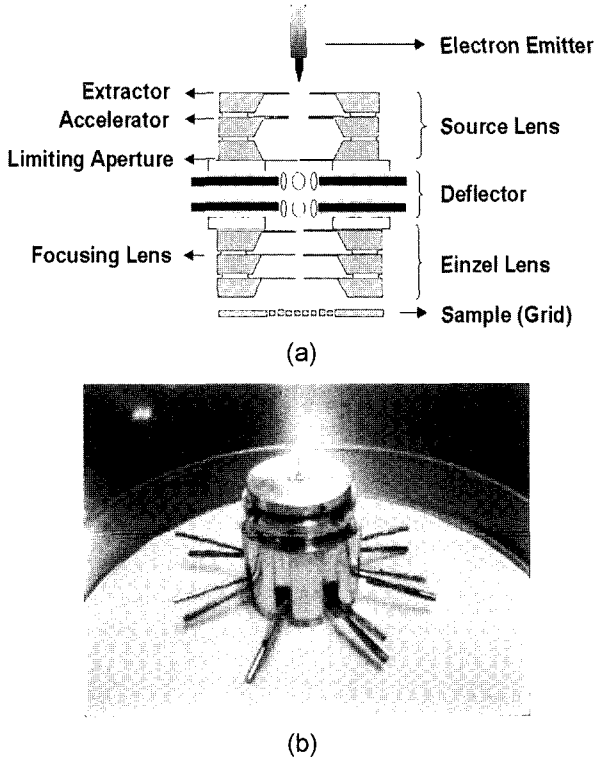

Fig. 1. (a) Schematic diagram and (b) photograph of the assembled microcolumn.

전자방출원은 텅스텐을 재질로 제작되었고 예리한 정침(tip)[11,12]을 가지고 있다. 정침은 일정한 길이의 텅스텐 wire를 KOH 수용액에 넣어 electro-chemical etching 방법을 사용하여 제작하였다. 제작된 정침의 길이는 약 300 μm 정도이며 정침 끝의 반경은 약 12~40 nm로 측정되었다. Fig. 2는 본 실험에 사용된 전자 방출원의 SEM 사진이며, 전자방출원은 전자렌즈의 첫번째 렌즈(extractor)와 100 μm 정도의 거리에 위치하고 있다. 전자렌즈는 정밀한 원형의 aperture(이심률: ~95% 이상)를 형성하기 위해 반도체 공정을 통해 제작을 하였다. 실리콘 웨이퍼에 B(boron) 이온을 high doping 시킬 경우, B 이온이 high doping된 layer는 KOH 수용액을 이용한 wet etching 공정에서 etching stop layer로 이용할 수 있다.[13,14] 본 연구에서는 이러한 wet etching 공정을 이용하여 350 μm 두께의 실리콘 웨이퍼로부터 2 μm 두께의 얇은 막인 membrane을 형성한 다음, RIE(reaction-ion etching) 장비로 직경이 5, 10, 100, 200 μm의 aperture를 제작하였다.

일반적으로 전자렌즈는 aligner나 STM과 같은 고가의 장비를 이용하여 정렬을 하지만 본 실험에서는 파장이 6328 Å인 He-Ne 레이저로부터 관찰된 레이저 회절무늬를 이용하는 새로운 방법으로 전자렌즈를 정렬하였으며, anodic bonding을 통해 전자렌즈와 Einzel 렌즈를 완성하였다. 이 렌즈들의 두께는 약 1 mm이며, 각 전극의 절연체로는 두께 150 μm의 pyrex를 사용하였다. Fig. 3은 aperture의 크기가 100 μm인 전자렌즈들의 정렬과정에 있어서 정렬된 렌즈들이 만든 레이저 회절무늬와 현미경 사진을 보여주고 있으며, Fig. 4는 정렬이 완료된 전자렌즈와 Einzel 렌즈의 구조도이다.

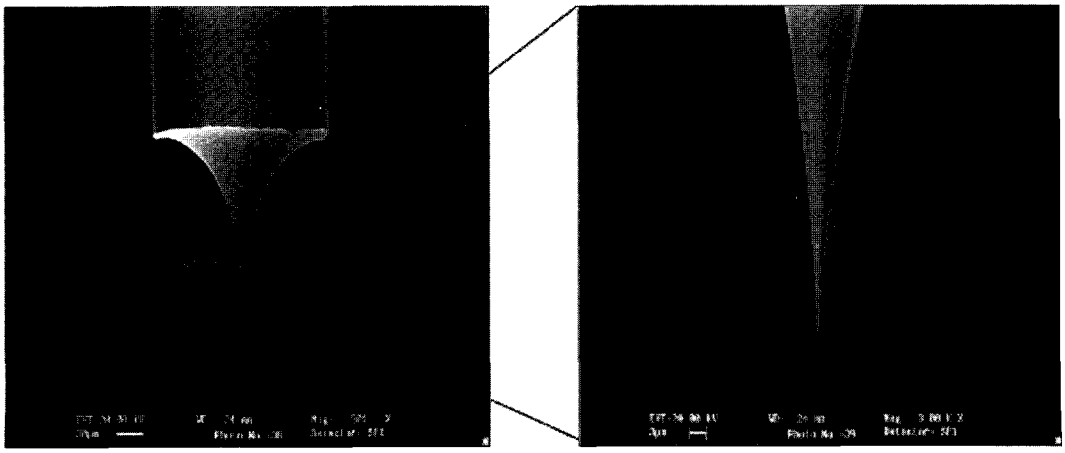

Fig. 2. SEM image of a tip fabricated by electro-chemical etching.

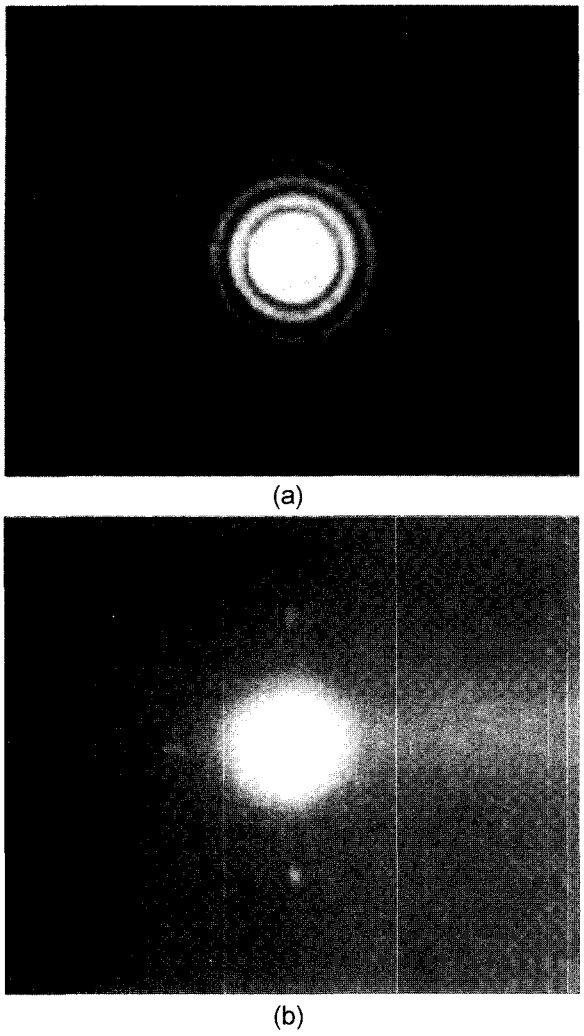

Fig. 3. (a) Laser diffraction pattern observed through the assem-bled electron-lens system. (b) Optical microscope image of the aperture when the microscope is focused on the top lens.

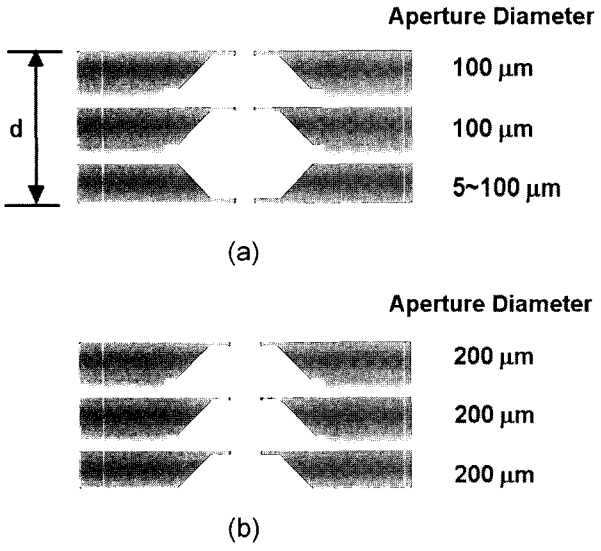

Fig. 4. Schematic diagram for (a) the micro electron lens and (b) the Einzel lens.

3. 초소형 전자칼럼의 특성

전자 방출원은 전자칼럼의 구조 및 특성에 많은 영향을 주며 특히, 초소형 전자칼럼에서는 저에너지 구동을 위하여 정침이 매우 작아야 한다. 이상적인 전자방출원의 특성으로는 안정된 전자방출, 높은 휘도(brightness), 작은 크기의 전자방출원, 낮은 전자 에너지 분포, 그리고 긴 수명 등의 특성을 갖추어야 한다. 본 실험에서는 전자방출원의 전압과 extractor에서 측정한 전류 값에 의한 I-V 특성곡선(Fig. 5(a) 참조)을 토대로 작성한 Fowler-Nordheim plot으로부터 정침의 반경이 ~12 nm인 것을 알 수 있었다.[11] 그리고 Fig. 5(b)에서 보는 바와 같이 안정하게 전자가 방출됨을 볼 수 있었다.

초소형 전자칼럼의 정렬상태는 전자칼럼의 전자방출원에 전압을 인가하여 extractor(마이크로 전자렌즈의 첫 번째 렌즈)에서 측정한 전류(total current) 값과 전자빔이 전자칼럼을 통과하여 Cu-grid sample(Fig. 6 참조)에 집속됨으로써 측정되는 전자빔 전류 값을 비교하여 평가된다. 일반적으로 Cu-grid sample에서 측정된 전자빔 전류 값이 extractor에서 측정한 전류 값의 1/1000~1/10000일 경우, 전자칼럼의 정렬상태가 우수하다고 판정할 수 있다.[15,16] 본 연구에서는 -300 V의 전압을 제작된 초소

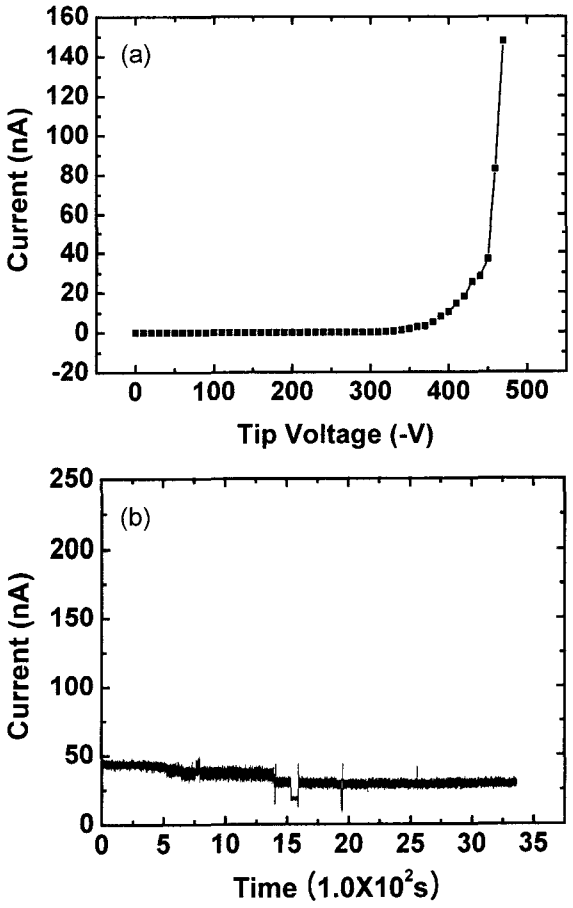

Fig. 5. (a) Characteristics of I-V and (b) emission stability for the electron emitter.

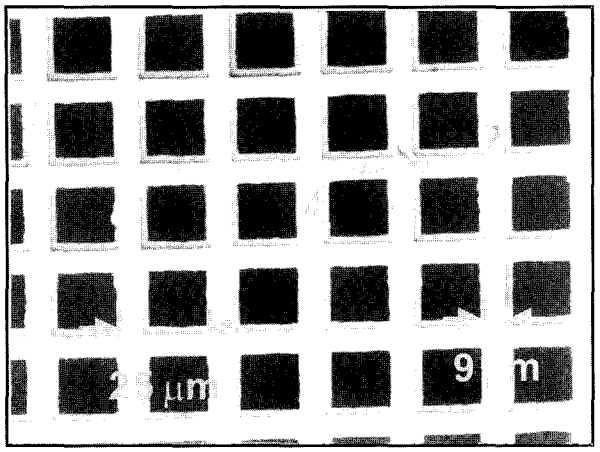

Fig. 6. SEM image of the Cu-grid sample (mesh 1000).

형 전자칼럼의 전자방출원에 인가하여 extractor에서 약 0.6 μA의 전류 값을 얻었으며, 전자칼럼을 통과한 전자빔을 Cu-grid sample에 집속하여 0.3 nA의 전류 값을 얻었다. 이것으로부터 제작된 전자칼럼의 정렬상태가 우수하다는 것을 알 수 있었다.

전자칼럼은 ~1×10^{-7} torr 정도의 고진공에서도 작동이 가능하지만, 제작된 초소형 전자칼럼에 대한 정확한 특성파악과 측정을 위해 초고진공(5×10^{-10} torr) system을 구축하였다. 이차 전자(secondary electron)를 감지하여 측정하는 일반적인 SEM의 경우와는 달리, 전자 방출원에서 방출된 전자가 sample에 도착되어 외부로 흐르는 전류 값을 측정하여 상(image)을 얻는 방식을 사용하였으며, Einzel 렌즈에 (-) 전압을 인가하여 집속렌즈 부분에서 전자들의 운동 속도를 감소시키는 retarding mode와 (+) 전압을 인가하여 전자들의 운동을 가속하여 집속하는 accelerating mode인 두 가지 mode를 사용하였다.

Retarding mode에서 렌즈에 인가한 전압은 -155 V에서 sample의 상이 나타나기 시작하여 -162 V에서 최적의 상(Fig. 7(a) 참조)이 관찰되었으며 accelerating mode에서는 retarding mode 보다 높은 전압을 인가하여 상을 측정하였다. 즉, +385 V에서 관측이 가능한 상이 나타났으며, +410 V에서 집속된 상(Fig. 7(b) 참조)을 얻었고 분해능은 수 백 nm의 값을 보여 주고 있다. 두 결과를 비교해 보면, retarding mode는 낮은 인가전압으로 전자 집속이 가능한 반면, 분해능 측면에서는 accelerating mode가 더 우수한 특성을 보이는 것을 알 수 있다.

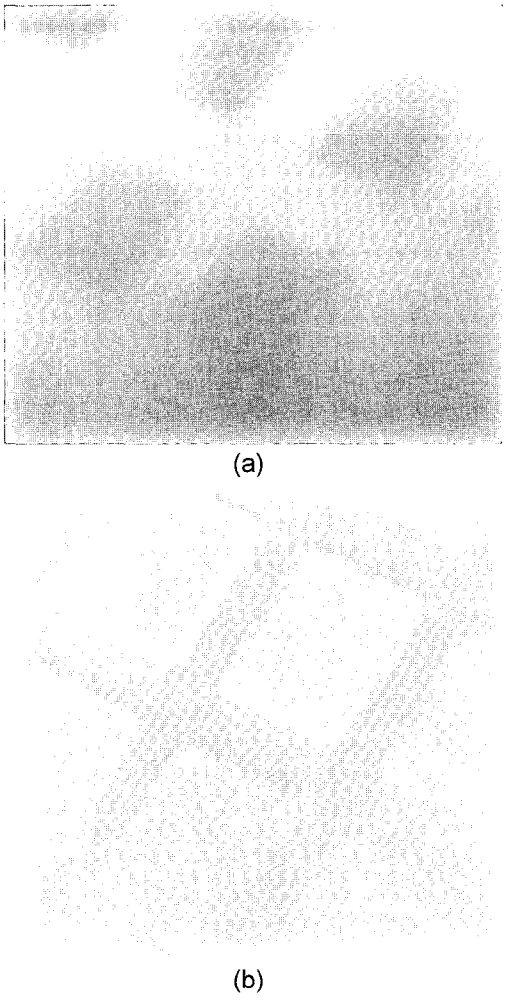

Fig. 7. STEM images obtained using (a) the retarding mode (focusing voltage ≃ -162 V) and (b) the accelerating mode (focusing voltage ≃ +410 V).

4. 결 론

파장이 6328 Å인 He-Ne 레이저의 회절무늬를 이용하여 초소형 전자칼럼을 assemble한 다음, Cu-grid sample에서 전자빔 전류 값을 측정하여 초소형 전자칼럼의 정렬상태를 확인하였다. Sample의 I-V 특성을 기반으로 작성한 Fowler-Nordheim plot으로부터 정침의 유효반경이 ~12 nm인 것을 알았다. 제작된 전자칼럼의 동작특성을 STEM mode로 작동시켜 평가한 결과, retarding mode로 구동하여 -162 V에서 최적의 상을 얻었다. 또한 accelerating mode로 구동한 경우에는 +410 V에서 최적의 결상을 얻었으며, 분해능은 모두 수백 nm이다. 이 결과로부터 retarding mode에서는 낮은 인가전압으로 전자 집속이 가능하지만 분해능은 오히려 accelerating mode가 더 우수하다는 것을 확인하였다.

전자칼럼의 구조를 최적화 하고 전자렌즈의 편평도, roundness, 정렬상태 등을 개선한다면 수십 nm 급 분해능과 높은 전자빔 전류를 얻을 수 있을 것으로 생각한다.

참 고 문 헌

1. C. Stebler, T. Pfeffer, U. Staufer, and N. F. de Rooji, Microelectronic Eng., **46**, 401 (1999).
2. Y. C. Kim, D. W. Kim, S. J. Ahn, H. S. Kim, W. K. Jang, Optical Society of Korea, **13**, 314 (2002).
3. J. Park, J. D. Lera, M. A. Yakshin, S. S. Choi, Y. Lee, K. J. Chun, J. D. Lee, D. Jeon, and Y. Kuk, J. Vac. Sci. Technol. B, **15**, 2749 (1997).

4. Y. J. Lee, S. H. Kang, D. H. Kim, J. Park, H. H. Choi, Y. Kuk, and K. Chun, Microelectronic Eng., **41/42**, 485 (1999).
5. D. W. Kim, Y. Kim, Y. C. Kim, H. S. Kim, S. Ahn, Y. Y. Park. D. W. Kim, Jpn, J. Appl. Phys., **42**, 3842 (2003).
6. B. J. Lin, MNC2002 Conference Processing, 28 (2002).
7. S. Ahn, D.W. Kim, H. S. Kim, S. J. Ahn, J. Cho, Microelectronic Eng., **69**, 57 (2003).
8. H. S. Kim, M. L. Yu, E. Kratschmer, B. W. Hussey, M. G. R. Thomson, and T. H. P. Chang, J. Vac. Sci. Technol. B, **13**, 2468 (1995).
9. M.G.R. Thomson, J. Vac. Sci. Technol. B, 14, 3802 (1996).
10. T. H. P. Chang, M. G. R. Thomson, M. L. Yu, E. Kratschmer, H. S. Kim, K. Y. Lee, S. A. Rishton, S. Zolgharnain, Microelectronic Eng., **32**, 113 (1996).
11. H. S. Kim, M. L. Yu, U. Staufer, L. P. Muray, D. P. Kern and T. H. P. Chang, J. Vac. Sci. Technol. B, **11**, 2327 (1993).
12. M. L. Yu, B. W. Hussey, H. S. Kim, and T. H. P. Chang, J. Vac. Sci. Technol. B, **12**, 3431 (1994).
13. E. Bassous, IEEE Trans. Electron Devices, ED-25, 1178 (1978).
14. K. Y. Lee, S. A. Rishton, and T. H. P. Chang, J. Vac. Sci. Technol. B, **12**, 3425 (1994).
15. E. Kratschmer, H. S. Kim, M. G. R. Thomson, K. Y. Lee, A. S. Rishton, M. L. Yu, and T. H. P. Chang, J. Vac. Sci. Technol. B, **13**, 2498 (1995).
16. E. Kratschmer, H. S. Kim, M. G. R. Thomson, K. Y. Lee, A. S. Rishton, M. L. Yu, and T. H. P. Chang, J. Vac. Sci. Technol. B, **12**, 3503 (1994).