

論文98-35D-9-6

마이크로 전자빔 시스템을 위한 전자광학렌즈의 제작에 의한 나노 패턴 형성

(Nano-scale pattern delineation by fabrication of electron-optical lens for micro E-beam system)

李龍宰*, 朴正英**, 全國鎭*, 鞠梁**

(Yongjae Lee, Jungyeong Park, Kukjin Chun, and Young Kuk)

요 약

현재의 전자빔 묘화의 한계를 극복할 수 있는 마이크로 전자빔 시스템의 전자 광학 렌즈를 제작하였고 전자빔 묘화실험을 통하여 이를 검증하였다. 마이크로머시닝기술을 이용하여 실리콘 전극을 제작하고 이를 양극 접합을 통해 조립하여 다층 전극의 전자 광학 렌즈를 제작하였다. 완성된 전자 광학 소자를 초고진공 챔버에 장착하여, STM(Scanning Tunneling Microscope) 팁에서 방출된 전자빔의 focusing 특성을 관찰하였으며 전자를 집속하여 리소그래피를 수행하였다. E-beam 감광막은 PMMA(Poly-methylmethacrylate)를 사용하였고 0.13 μ m의 패턴을 형성시킬 수 있었다.

Abstract

We have fabricated electron-optical lens for micro E-beam system that can overcome the limitation of current E-beam lithography. Our electron-optical lens consists of multiple silicon electrodes which were fabricated by micromachining technology and assembled by anodic bonding. The assembled system was installed in UHV chamber to observe the emission characteristics of focused electrons by the electro-optical lens. We used STM(Scanning Tunneling Microscope) tip for electron source. By performing lithography with the focused electrons with PMMA(poly-methylmethacrylate) as E-beam resist, We could draw 0.13 μ m nano-scale lines.

I. 서론

현재 VLSI의 제작을 위하여 광리소그래피(optical lithography)가 사용되어 왔으나 해상력의 한계로 이를 대체할 수 있는 기술에 대한 연구가 활발히 진행되

고 있다. 그 중에서도 전자빔리소그래피(electron beam lithography)는 높은 해상력, 마스크 없는 공정, 그리고 X-ray에 비해 전자빔을 쉽게 얻을 수 있는 점등의 장점을 가지고 있어 이에 대한 많은 연구가 진행되어지고 있다. 그러나, 이를 대량 생산에 적용시키기 위하여서는 극복해야 할 몇 가지 문제점이 있다. 첫째, 노광하는데 시간이 너무 오래 걸려 생산성의 제약이 있다. 이를 해결하기 위하여 cell projection 등의 사용이 거론되고 있으나^[1] 마스크 제작의 어려움 등으로 인하여 아직은 실험 단계에 머물고 있는 실정이다. 둘째, 근접효과로 인하여 패턴이 왜곡될 수 있다. 이를 위하여 공정^[1]이나 소프트웨어의 변조^[2]를 통하여 해결을 시도하고 있지만 근본적인 해결책은 되지 못하

* 正會員, 서울대학교 電氣工學部, 半導體共同研究所
(Inter-university Semiconductor Research Center (ISRC) and School of Electrical Engineering, Seoul National University)

** 正會員, 서울대학교 物理學科
(Dept. of Physics, Seoul National University)

接受日字:1997年12月15日, 수정완료일:1998年7月28日

고 있다. 전자빔리소그래피의 이런 문제점들을 해결하기 위하여 제안된 시스템으로는 마이크로컬럼(microcolumn)이 있는데^{[3] [4] [5] [6]}, 이는 전체 시스템을 밀리미터 스케일로 소형화시켜 1 keV의 저에너지 영역에서 전자빔리소그래피를 수행하는 것이다. 마이크로컬럼을 array로 배치하면 컬럼의 수에 따라 생산성의 급격한 증가를 가져올 수 있고, 저에너지를 사용하므로 전자들의 후방산란(backscattering)이 현저히 줄어들어 근접효과(proximity effect)가 감소하므로 앞에서 기술된 전자빔리소그래피의 단점을 해결할 수 있다. 마이크로컬럼은 또한 시스템의 소형화로 인하여 수차가 감소하여 높은 해상도를 얻을 수 있다. 마이크로컬럼의 전체 시스템은 그림 1에 나타나 있는 것과 같이 STM 전계 방출 팁(STM field emission tip), source lens, micro-deflector, Einzel lens로 구성되어 있다. STM tip에는 x, y, z piezo scanner가 장착되어 있고 feedback 원리를 이용하여 source lens의 5 μ m 구멍과 정렬시 키게 된다. Source lens는 5 μ m 구멍의 extractor와 100 μ m 구멍의 accelerator로 구성되어 있다. 정렬된 팁에서 전계 방출로 전자들이 방출된 후 micro-deflector를 통과하여 최종적으로 100 μ m 구멍이 형성되어 있는 3개의 전극으로 구성된 Einzel lens에서 집속이 이루어진다. 전체 시스템은 1 cm 이하의 크기로 구성된다.

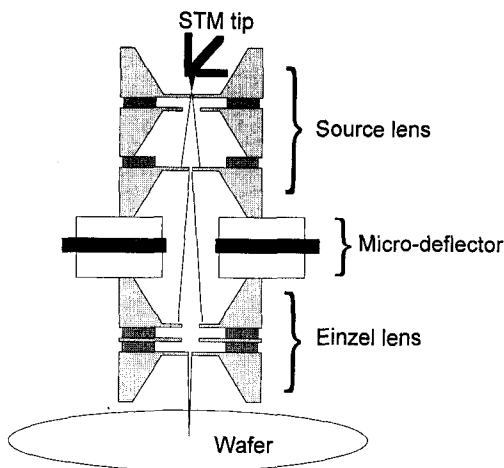


그림 1. 마이크로컬럼 전자빔 묘화 시스템
Fig. 1. Microcolumn E-beam lithography system.

본 논문은 마이크로컬럼의 전자광학소자인 마이크로렌즈(source lens와 Einzel lens)를 제작하는 방법과

제작 결과 그리고 이를 이용하여 리소그래피를 수행한 결과를 기술한다. 마이크로렌즈는 실리콘 전극과 Pyrex glass와의 다층 양극 접합(multi-layer anodic bonding)을 이용하여 제작하였고 이를 STM tip이 장착된 UHV chamber에 설치하여 전자의 방출 특성을 관찰하였으며 E-beam resist인 PMMA에 리소그래피를 수행하였다.

II. 마이크로렌즈 제작

마이크로렌즈의 실리콘 전극을 제작하는 방법은 다음과 같다. 기판 물질은 p-type (100) 4 in. 실리콘 웨이퍼를 사용하였는데, 후에 실리콘을 습식식각할 때 식각 정지를 위해서 웨이퍼의 앞면을 1150 $^{\circ}$ C의 온도로 11시간 동안 붕소(boron)로 높게($\sim 10^{20}/\text{cm}^3$) 도핑(doping)하였다. 이는 실리콘을 알칼리수용액(KOH, EDP, TMAH 등)에서 습식식각할 때 붕소로 높게 도핑된 지역에서 식각정지가 이루어지는 것이 실험적으로 입증된 바 있기 때문이었다^[7]. 이후의 공정은 그림 2에 나타나 있다. 질화막과의 스트레스(stress) 완충을 위한 100nm의 열산화막(thermal oxide)을 기르고(a) 200nm LPCVD 질화막(nitride)을 증착한 후 (b), 앞면의 산화막과 질화막을 건식식각공정(reactive ion etching)에 의하여 제거하였다(c). 남겨둔 뒷면의 질화막은 후에 실리콘을 KOH와 EDP 수용액에서 습식식각할 때 식각 보호를 위해 사용된다. 실리콘이 드러난 웨이퍼의 앞면에 알루미늄을 sputter로 500nm의 두께로 증착하고 APCVD를 이용하여 PSG(Phospho-Silicate Glass)를 300nm의 두께로 증착하였다 (d). 구멍 패턴이 그려져 있는 첫번째 마스크로 PSG에 패턴을 형성하고 건식식각공정을 통하여 PSG와 알루미늄을 식각한 후 실리콘을 식각하여 구멍 트렌치(trench)를 4 μ m 깊이로 형성하였다(e). 이 때 PSG는 실리콘의 식각시 식각마스크 역할을 한다. PSG를 BHF로 제거하고(f) 알루미늄에 두번째 마스크를 사용하여 양면 정렬 마크를 형성한 후(g), 앞면 보호용으로 PSG를 1 μ m의 두께로 다시 증착하였다(h). 알루미늄 정렬마크로 양면을 정렬하여 웨이퍼의 뒷면에 실리콘 습식식각 패턴을 형성한 후 질화막과 산화막을 건식식각하였다(i). 이후 82 $^{\circ}$ C의 온도에서 40wt.% KOH 수용액으로 실리콘을 습식식각하여 다이어프램(diaphragm)을 형성했고(j) PSG를 BHF로 제거하여

실리콘 전극을 완성하였다. 제작된 다이아프램의 두께는 $3\mu\text{m}$ 이고 이의 가장자리를 SEM(Scanning Electron Microscopy)으로 관찰한 사진이 그림 3에 나타나 있으며 이의 뒷면을 현미경으로 관찰한 사진이 그림 4에 나타나 있다. 그림 4의 (a)는 $100\mu\text{m}$ 구멍이고 (b)는 $5\mu\text{m}$ 구멍을 보여 준다. 이 현미경 관찰을 통하여 다이아프램에 전자빔이 통과할 수 있는 구멍이 형성되어 있는 것을 확인할 수 있었다.

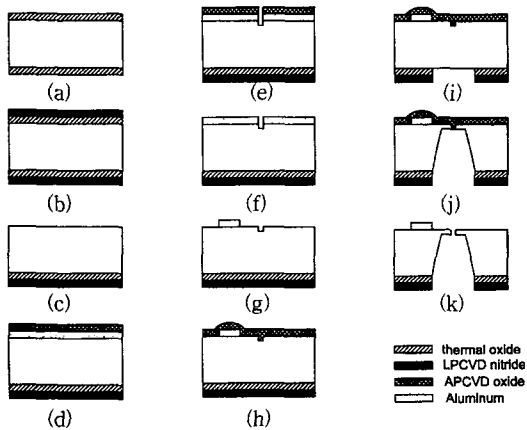


그림 2. 실리콘 전극 제작 공정 흐름도
Fig. 2. Process flow for the fabrication of silicon electrode.

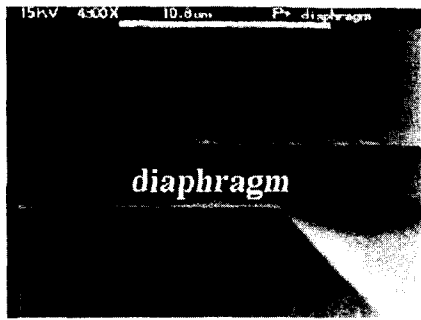


그림 3. 다이아프램의 가장자리 사진
Fig. 3. The edge picture of diaphragm.

다층 전극구조의 마이크로렌즈를 구성하기 위해 실리콘 전극을 Pyrex glass #7740과 양극 접합^[8]으로 접합하였다. Pyrex glass에는 EDM(Electrical Discharge Machining)^[9]에 의하여 전자가 통과할 수 있는 구멍을 형성하였다. 그림 5에서 보는 바와 같이 두 전극 구조로 구성된 source lens는 두 번의 양극 접합이 수행되었고, 세 전극 구조로 구성된 Einzel lens는 네 번의 양극 접합이 수행되었다. 양극 접합은

비가역반응이기 때문에 이전의 접합이 그 다음 접합 과정 중에 아무런 영향을 받지 않았다. 이 때 구멍간의 정렬은 광학현미경을 통하여 이루어졌으며 정렬 오차는 $10\mu\text{m}$ 이내로 조절되었다.

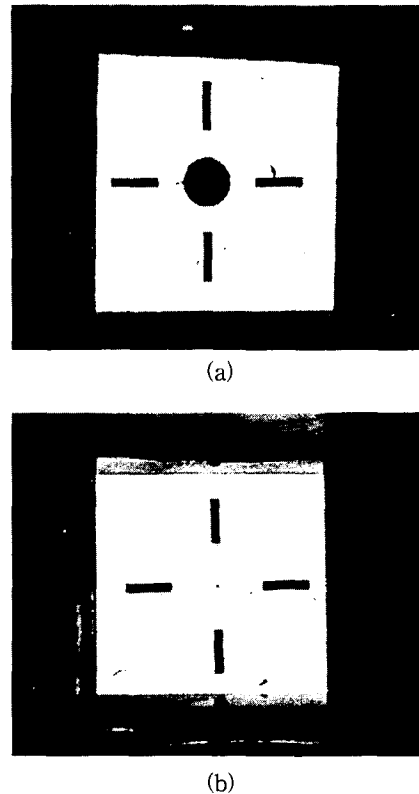


그림 4. 제작된 다이아프램 뒷면의 현미경 사진 (a) $100\mu\text{m}$ 구멍, (b) $5\mu\text{m}$ 구멍
Fig. 4. Backside picture of fabricated diaphragm. (a) $100\mu\text{m}$ hole, (b) $5\mu\text{m}$ hole

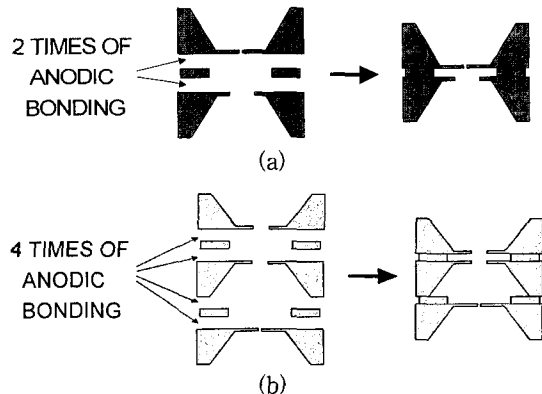


그림 5. 마이크로렌즈 조립 (a) source lens, (b) Einzel lens
Fig. 5. Microlens assembly. (a) source lens, (b) Einzel lens

III. 방출 전류 특성과 리소그래피

제작된 마이크로렌즈를 그림 6에서 보여지는 바와 같이 초고진공(UHV) chamber에 장착 하여 전류 방출 특성을 extraction current(I_{ext} : source lens의 extractor에서 측정되는 current)와 sample current (I_{sample} : focal plane에 놓여진 TEM grid에서 측정되는 current)를 측정함으로써 알아 보았다. Tip 전압의 변화에 따른 각 전류의 변화를 보여주는 그림이 그림 7의 (a)에 나타나 있다. Sample current는 전류가 작을 때는 큰 흔들림을 보이지만 어느 정도 이상 값이 되면 전압의 증가에 따라 상당히 안정하게 증가하고 extraction current와 비슷한 경향을 가지면서 증가함을 알 수 있다. 이 그림에서 확인할 수 있듯이 같은 전압에서 transmission (extraction current에 대한 sample current의 비)이 약 10-3임을 알 수 있다. 1 시간 동안 전류를 측정하여 전류의 안정성(stability)도 아울러 측정하였는데 그 결과가 그림 7의 (b)에 나타나 있다. 두 전류는 처음에 어느 정도의 흔들림을 보이다가 약 1분 후부터는 상당히 안정된 값을 보였다. 10시간 동안 측정한 결과 current fluctuation은 5%이내로 측정되었다.

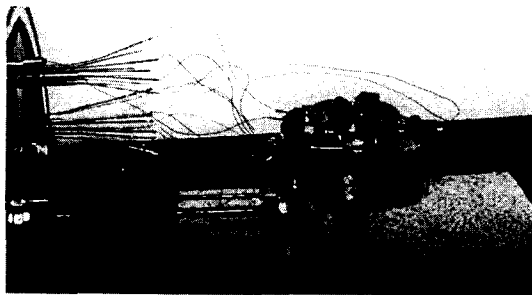
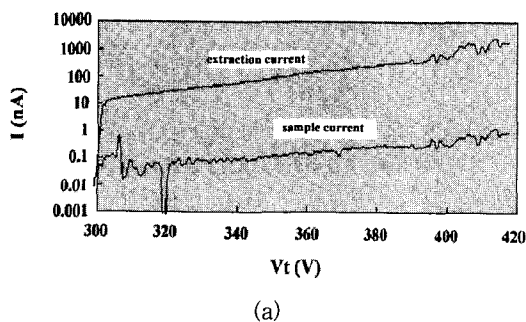
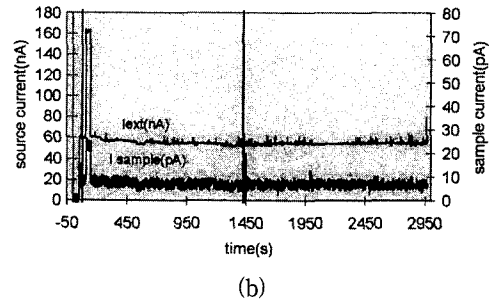


그림 6. Microcolumn 시스템 사진
Fig. 6. The picture of microcolumn system.



(a)



(b)

그림 7. 마이크로컬럼의 방출 전류 특성 (a) extraction current & sample current, (b) 안정성
Fig. 7. Emitted current characteristic of micro-column. (a) extraction current & sample current, (b) stability

마이크로컬럼 전자원을 이용하여 직접 묘화 실험을 하였다. 이 때 chamber의 base pressure는 5×10^{-9} torr였고 extraction current는 약 60nA에서 실험하였으며 이 경우 sample current는 10pA의 값을 가졌다. Sample 뒷면에 두개의 piezo tube를 직렬로 연결하여 고정하고 이를 raster scanning으로 주사하였다. Resist는 positive type의 E-beam용 resist인 PMMA를 사용하였다. 전자의 투과 깊이는 1 keV인 경우 organic polymer에서 60nm 정도이기 때문에^[10] resist를 얇게 해 줄 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 PMMA 와 MCB(Monochloro-benzene)를 1:1.5의 비율로 혼합하고 이를 7000rpm의 속도에서 40초간 고속 스핀(spin)하여 50nm의 두께를 얻었다. 그리고나서 160°C의 온도에서 4분간 soft bake를 수행하고 chamber 내에서 직접 묘화를 수행하였으며 MIBK:IPA=1:3의 용액에서 90초간 현상(develop)한 후 2분간 IPA로 rinse를 실시하였다. 이에 얻어진 패턴을 SEM으로 관찰한 사진이 그림 8에 나타나 있다. 그림에서 line의 선폭은 0.13 μ m로 측정되었다.

형성된 패턴을 실제 소자에 적용시키는 경우 본 연구에 사용된 resist의 두께는 기판 식각과 step coverage 등의 문제가 있기 때문에 적절하지 못하다고 생각한다. 그러나 단층(single layer) 감광막이 아닌 다층(multi-layer) 감광막^[11] (PMMA-Ge-AZ PR)을 사용하여 이런 문제들을 해결할 수 있으리라 생각한다. 다층 감광막은 imaging layer(PMMA)와 conducting layer(Ge), 그리고 planarizing layer(AZ PR)로 구성된다. 이는 두께가 얇은 imaging layer에 전자빔을 노광하고 건식식각으로서 con-

ducting layer와 planarizing layer에 패턴을 전이시키는 공정이다. 두꺼운 planarizing layer가 기판의 식각시 마스크 역할을 하게 되어 기판 식각과 step coverage의 문제를 해결할 수 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 마이크로컬럼시스템의 전자광학소자를 제작하고 이를 이용하여 리소그라피를 수행하였다. 전자광학소자의 제작에는 실리콘 마이크로머시닝공정과 CMOS 단위 공정 등을 이용하였고, 다층 양극 접합을 이용하여 조립하였다. 그리고 이를 이용하여 E-beam resist 상에 리소그라피를 수행한 결과 0.13 μm 의 선폭을 갖는 패턴을 형성할 수 있었다.

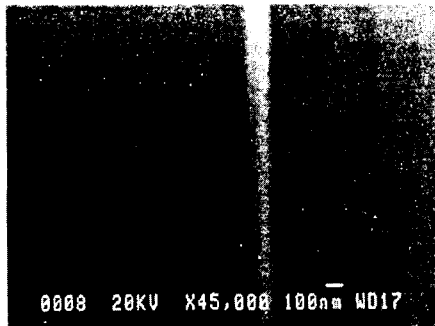


그림 8. 0.13 μm line의 SEM 사진
Fig. 8. SEM image of 0.13 μm line.

본 논문의 결과로 마이크로컬럼시스템으로 나노소자를 제작할 수 있는 가능성이 제시되었다고 본다. 실제 소자 제작에 적용하기 위하여서는 arrayed lithography가 필요하고 컬럼간의 균일한 특성이 필수적인 컬럼의 집적화가 요구되고 있으므로 본 논문에서 보여준 바와 같이 마이크로머시닝기술이 이를 구현하기 위한 중요한 핵심기술이 되리라고 예상한다.

감사의 글

※ 본 연구를 수행하는데 도움을 주신 서울대학교 반도체 공동 연구소의 직원분들께 감사를 드린다. 본 연구는 차세대 반도체 기반기술 개발사업의 일환으로 (주)삼성전자의 지원을 받아 수행되었다.

참고 문헌

[1] T. Fujino, S. Takeuchi, H. Morimoto, Y.

Watakabe, H. Abe, M. Koshiba, M. Murata, and S. Kawamura, "The surface silylating process using chemical amplification resist for electron beam lithography" *J. Vac. Sci. Technol. B* 8(6), pp. 1808-1813, Nov/Dec 1990.

- [2] S. Y. Lee, J. C. Jacob, C. M. Chen, J. A. Mcmillan, and N. C. MacDonald, "Proximity effect correction in electron-beam lithography : A hierarchical rule-based scheme-PYRAMID" *J. Vac. Sci. Technol. B* 9(6), pp. 3048-3053, Nov/Dec 1991.
- [3] L. P. Muray, U. Staufer, E. Bassous, D. P. Kern and T. H. P. Chang, "Experimental evaluation of a scanning tunneling microscope-microlens system" *J. Vac. Sci. Technol. B* 9(6), pp. 2955-2961, Nov/Dec 1991.
- [4] T. H. P. Chang, D. P. Kern, L. P. Muray, "Arrayed miniature electron beam columns for high throughput sub 100nm lithography" *J. Vac. Sci. Technol. B* 10(6), pp. 2743-2748, Nov/Dec 1992.
- [5] E. Kratschmer, H. S. Kim, M. G. R. Tomson, K. Y. Lee, S. A. Rishton, M. L. Yu and T. H. P. Chang, "Sub 40nm resolution 1 keV scanning tunneling microscope field-emission microcolumn" *J. Vac. Sci. Technol. B* 12(6), pp. 3503-3507, Nov/Dec 1994.
- [6] T. H. P. Chang, L. P. Muray, U. Staufer and D. P. Kern, "A scanning tunneling microscope based microcolumn system" *Jpn. J. Appl. Phys.* vol. 31, pp. 4232-4240, December 1992.
- [7] H. Seidel, "The mechanism of anisotropic silicon etching and its relevance for micromachining" *Transducers 87, Rec. of the 4th Int. Conf. On Solid-State Sensors and Actuators*, pp. 120-125, 1987.
- [8] G. Wallis et al., "Field assisted glass-sealing" *Electrochem. Sci. and Technol.* 2, pp. 45-53, 1975.
- [9] Shuichi Snon and Masayoshi Esashi, "Photoetching and electrochemical discharge drilling of Pyrex glass" *Technical*

- Digest of the 9th Sensor Symposium, 1990.
- [10] P.A. Peterson, Z.J. Radzimski, S.A. Schwalm, and P.E.Russell, "Low-voltage electron beam lithography" *J. Vac. Sci. Technol. B* 10(6), pp. 3088-3093, Nov/Dec 1992.
- [11] 배용철, 서태원, 전국진 "삼층감광막구조를이용한 미세패턴의 전자빔 묘화" *전자공학회논문지* 31A(10), pp. 1358~1364, 1994

저 자 소 개



李 龍 宰(正會員)

1970년 5월 23일생. 1994년 서울대학교 전자공학과 학사. 1996년 서울대학교 전자공학과 석사. 1996년 ~ 현재 서울대학교 전기공학부 박사과정 재학. 주관심분야는 실리콘 마이크로머시닝, 전자빔묘화

朴 正 英(正會員)

1970년 8월 28일생. 1993년 서울대학교 물리학과 학사. 1995년 서울대학교 물리학과 석사. 1995년 ~ 현재 서울대학교 물리학과 박사과정 재학. 주관심분야는 표면 물리

全 國 鎮(正會員) 第 29卷 A編 第 5號 參照

1955년 3월 24일생. 1977년 서울대학교 전자공학과 학사. 1981년 University of Michigan 석사. 1986년 University of Michigan 박사. 1986년 ~ 1989년 워싱턴 주립대학 조교수. 1989년 ~ 현재 서울대학교 전기공학부 부교수. 주관심분야는 실리콘 마이크로머시닝, 전자빔묘화

鞠 梁(正會員)

1953년 2월 5일생. 1975년 서울대학교 물리학과 학사. 1997년 서울대학교 물리학과 석사. 1981년 Pennsylvania State University 물리학 박사. 1981년 ~ 1991년 AT&T Bell Lab. Researcher. 1991년 ~ 현재 서울대학교 물리학과 교수. 주관심분야는 표면 물리