

◆특집◆ 최첨단 가공 NTRM

초미세 공정 및 장비 기술의 국가 기술 로드맵

이응숙*, 박철우**

The National Technology Roadmap of Nano-scale Processing and Equipments

Eung-Sug Lee*, Cheol Woo Park**

Key Words : Nanotechnology (나노기술), NTRM(National Technology RoadMap(국가기술지도), Nano-Mechatronics(나노 메카트로닉스)

1. 서론

1959 년 양자역학 분야에서 노벨상을 수상한 리처드 파인만이 미국 물리학회 강연에서 나노 세계를 언급하고, 1992 년 에릭 드렉슬러의 노력으로 인해 미국의 나노 기술 계획(NNI)이 발표된 이후 나노 기술은 “트랜지스터와 인터넷이 정보 시대를 개막한 것과 같은 방식으로 21 세기에 혁명을 일으킬” 새로운 기술로 주목 받고 있다. 2000 년대부터 시작된 국내의 나노 기술 개발은 정부의 대형 국책 과제를 통한 소재, 공정, 장비 기술의 개발을 필두로 세계 최고의 반도체 공정 기술을 가진 국내의 우수 산업계 쪽에서는 차세대 반도체, 디스플레이, 화학 신소재 개발 등에 박차를 가하고 있다.

나노 기술의 필요성은 앞으로 10 년 후 전통 기계산업 및 6T 산업 분야에서 필요로 하게 될 미래 첨단 제품들의 특징에서 찾아볼 수 있는데, 이러한 제품들의 특징은 극초미세화, 다기능화, 저전력화, 저가격화 일 것으로 예측되며 이에 전략적

으로 대응하기 위해서는 초미세 공정 기술과 정밀 제조 기술의 초정밀화와 초미세화를 기반으로 마이크로 단위에서 나노 단위에 이르는 산업용 부품의 설계/제어/측정/제조 분야에서 저비용, 고생산성, 고정밀화를 추구하는 혁신기술이 절실히 요구된다.

이러한 바탕 위에서 초미세 공정 및 장비 기술이란 “나노 기술(NT)을 기반으로 하여 IT, BT, ET, RT, ST 분야에서 신규 창출되는 극미세, 극초정밀의 생활, 산업 용품을 제조하기 위한 공정 및 장비 기술과 공정 관련 해석, 설계, 제어, 측정, 조립 기술의 총칭”으로 정의된다. 즉, 나노 기술의 핵심 분야인 나노 공정, 장비, 재료, 소자 기술을 유기적으로 연결하고, 기존 전통 산업의 공통 핵심 기술과 신산업 분야의 기술 혁신을 이루어낼 수 있는 종합적인 기술이며, 물리, 화학, 생명, 전기전자 및 기계 메커니즘을 접목한 새로운 기술을 의미한다.

그림 1 은 나노 기술이 가지는 파급 효과를 보여준다. 이 그림에서 보듯이 나노 메카트로닉스 기술은 향후 21 세기 신산업을 이끌어갈 차세대 성장 동력으로서 국가적 차원의 연구 개발이 이루어져야 할 필요가 있다

본 원고에서는 전세계적인 나노 기술 특히 나노 메카트로닉스 기술의 개발 방향과 시장성 그리

* 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부

** 한국산업기술대학교 기계공학과

Tel. 042-868-7140, Fax. 042-868-7150

Email les648@kimm.re.kr

제조시스템의 초정밀, 초미세, 지능화 연구에 주력하고 있으며, 특히 초정밀연마기술, 나노임프린팅 관련연구를 수행하고있다

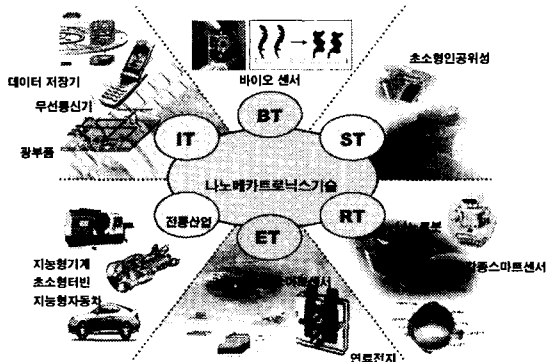


Fig. 1 Application Field of Nano Technology

고 초미세 공정 및 장비 기술에 대한 국가의 기술 지도(NTRM)에 대하여 기술한다.

2. 관련 산업 동향

2.1 산업동향

2.1.1 미국

미국 정부의 나노 분야에 대한 투자는 3~5 년 후 산업계 응용 분야의 확대와 함께 기반 기술에 대한 선점을 목표로 하고 있다. 특히 2000 년 2 월 국가 나노 기술 과제(National Nanotechnology Initiative: NNI) 선언 후 제조 공정 분야, 화학적/생물적/방사성/폭발성 탐지 및 보호 분야, 나노 스케일 조작 및 계측 분야에 집중적으로 투자하고 있다.

이러한 투자는 NSF 를 통하여 체계적으로 관리되는데, NSF 에서 투자하는 대표적인 분야는 단일 세포 조작용 로봇 분야(Cell Robotics), 로봇 메커니즘 및 End-Effector 및 매니플레이션 분야 (PolyTec, PI, Zygo, Berkeley Univ., North Carolina Univ., 위스콘신 대학 등), 매니플레이션 모니터링 분야(Zeiss, Bio-Rad, IBM, Stanford Univ. 등), 대용량 정보 저장 기기 분야(IBM) 등이 있다.

2.1.2 일본

일본은 정부와 민간 단체의 주도하에 나노 분야에 대한 기술 개발 및 투자를 1980 년대부터 수행하고 있다. 대표적인 정부 주도 기술 개발 프로그램으로는 아래 표 1 과 같다.

일본 산업계에서는 미쯔비시, 히다치, NEC, NTT, 후지 등이 나노 기술 개발에 적극적이며, 특히 벤처 창업을 장려하며, 80%정도의 벤처 기업들

Table 1 Investment Plan in NanoTechnology

이름	기관	특징
ERATO	JST	IT, 바이오, 에너지 분야를 나노 기술로 Breakthrough 한다는 전략. 5~10 년에 상품화를 목표로 하는 Flagship 형, 기반기술개발을 위한 challenge 형, 기초 연구 분야로 분리하여 추진
아스카		2001 년부터 5 년간 1,000 억엔 규모로 추진. 100nm~70nm 세대 반도체 기술 개발
반도체 기술 개발	METI	2001 년부터 70nm 이하 반도체 기술 개발 추진. 재료, 리소그래피, 회로 설계 등 다양한 연구분야를 포함

이 향후 5 년 내 제품화를 목표로 연구 개발을 수행 중에 있다. 대표적인 연구 분야로는 마이크로-나노 로봇 메커니즘 및 시스템, End-Effector 및 매니플레이션, 매니플레이션 모니터링 기술, HDDS 시스템, DVD, PDP, LCD 등이 있다.

2.1.3 유럽

EU 는 에너지, 환경, 생명공학, 유전 공학에 집중하고 전자 공학 분야의 비중을 줄이는 차별화 전략을 수립하고 있다. 또한 6th Framework Programme 를 통하여 2002 년부터 2006 년까지 나노 기술, 지식 기반 재료, 신사업 프로세스 분야에 년 평균 4 억 7 천만 달러를 투자할 계획이다. 이 6th Framework Programme 에서의 개발 우선 순위는 생명과 관련된 유전체학과 BT, 정보 사회 기술, NT, 재료, 신공정 기술의 순이다. 이밖에도 다양한 연구소, 대학, 기업들이 나노 분야 기술 개발을 수행하고 있으며, 대표적인 프로젝트로는 100nm 이하 반도체 공정을 위한 나노 임프린트 공정 개발, 신개념 디스플레이 등이 있다.

2.2 시장 예측 및 산업 발전 전망

나노 메카트로닉스 기술은 향후 국가 기술 개발의 핵심 기술로서 다양한 산업 분야에 적용될 것이다.

그림 2 는 나노 메카트로닉스 기술이 산업계 전반에 걸쳐 미치는 파급 효과를 보여준다. 주된

응용 분야로는 반도체/디스플레이/정보통신 분야, 메모리/비메모리, 차세대 정보 저장 기기, 광통신 부품, 소자, 바이오 산업, 에너지/환경 분야, 차세대 광통신 분야, 매니플레이터 등을 들 수 있다.

미국, 일본, 독일 등 선진국들은 전술한 산업 분야에서 향후 NT 기술이 핵심 기반 기술이 될 것으로 예측하여 치열한 기술 경쟁을 벌이고 있으며, 산업 자원부에서도 나노 기술을 기반으로 한 신기술 산업이 향후 10 년간 연평균 7.7% 성장할 것으로 예측하고 있다. 표 2 는 차세대 유망 산업 분야에 대한 시장성을 예측한 것이다.

대체적인 시장에 대한 전망은 재료 및 전자 제품을 시작으로 의료, 환경, 에너지 분야로 실용화가 진행될 것으로 예측되며, 2005 년 경에 성장기에 진입하여 2010 년을 전후로 본격적인 성장이 예상된다.

2.3 기술 개발 동향 및 기술 수준

2.3.1 기술 개발 추세

초미세 공정 및 장비 기술이란 기계, 전기, 전자의 3 축 복합 기술에 기반하고, 최근 산업화로의 기술이전이 가속화되고 있는 물리, 화학, 생명 기술이 새롭게 융합된 실용화 기술이라 할 수 있다. 이러한 신 기술로는 나노 패터닝, 나노 공정, 생체 적합 나노 물질 각인 공정, 나노 스케일 병렬 조립 기술 등 다양한 기술의 개발이 필요하다. 이중 현재 국가의 기반 산업이라 할 수 있는 반도체 산업에서는 고성능화, 고집적화의 추세에 맞추어 초미세 패터닝이 필요하지만, 현재 광학적 방식의 한계로 인하여 100nm 이하의 패터닝은 어려운 상태이다. 그러므로 반도체 산업에 국한된 나노 기

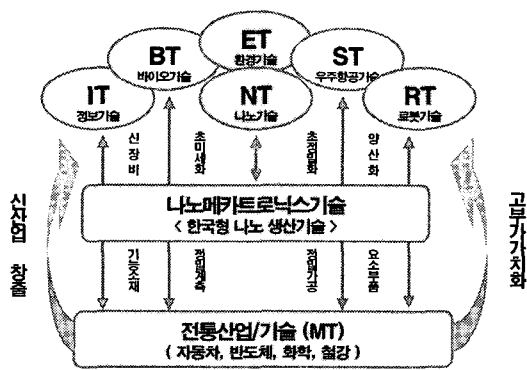


Fig. 2 Spreading Effect of Nano Mechatronics

술 개발은 여러 재질에 적용 가능하고, 최소 수치가 10nm 이며, 생산성이 월등한 신개념 공정 및 장비 기술이라 할 수 있다.

2.3.2 국외동향

미국은 96~98 년 나노 기술의 파급 효과에 대한 각인 이후 2000 년부터 National Nanotechnology Initiative 프로그램을 통하여 연간 5 억불의 투자를 하고 있다. 미국을 비롯한 일본, 유럽에서 활발히 수행하는 연구 과제는 탄소 나노 튜브를 이용한 신제품 및 공정 기술 개발, C₆₀ 초미세 구조물을 이용한 목표 지향적 약물 전달 시스템, 유기 분자 전자 소자, HDDS 등의 차세대 대용량 정보 저장 기기, 정보 통신용 반도체 소자, 초고속 광통신, 디스플레이, 마이크로-나노 로봇을 이용한 나노 단위 공정 제어 및 생물학 분야 등이 있다.

2.3.3 국내동향

2000 년부터 본격적으로 진행된 나노 관련 연구는 현재 정부 주도의 대형 국책 과제에서 다양한 연구를 수행 중에 있다.

표 3 은 현재 추진중인 대표적인 연구 과제이며 이외에도 다양한 사업을 통하여 나노 기술 확보에 주력하고 있으며, 이외에도 나노 사업화 지원 센터와 같은 인프라를 구축하여 국내 나노 산

Table 2 Application Market of Nano Technology

구분	적용분야	시장규모(단위 10 억불)		
		2000	2010	2020
반도체, 전기전자	반도체, 디스플레이, 정보저장기기, 전자기기, 반도체제조장비	413	1537	2281
정보, 통신기기	통신기기, 시스템, 소프트웨어, 정보서비스	1172	3442	5457
광산업	광통신기기, 광응용기기, 광정밀기기, 광소재	89	278	499
바이오 산업	신약, 신식품, 농업/해양, 화학, 신소재	302	766	1009
환경/에너지	오염방지, 신에너지, 신소재	138	722	1275
기간산업	자동차, 로봇, 자동화기기	285	902	1402

미쯔비시(연), 21 세기 기술과 산업(1999)

업 확대에도 노력하고 있다.

삼성전자를 비롯한 대기업에서는 주로 반도체 공정 분야를 중심으로 신공정 및 소재, 차세대 디스플레이 개발을 추진 중에 있다.

3. 국가 기술 지도

3.1 핵심 분야

초미세 공정 및 장비 기술 개발은 크게 2 가지 기술 분야를 포함하는데, 첫째는 10nm~100nm 나노 패턴에 대한 양산 공정 및 장비 기술 개발과 두번째는 20nm 이하의 초미세 나노 선, 점, 3D 형상을 제조할 수 있는 공정 및 장비 개발 기술로 분류할 수 있다. 그리고 이를 구현하기 위한 신개념 공정, 고속화, 나노 부품 조립 및 생산 공정, 나노 분해능의 제어, 측정/분석, 나노 매뉴플레이션 기술 등을 포함하고 있다. 이를 위한 핵심 세부 기술로는 접촉식/비접촉식 리소그래피, 원자 분자 레벨 물질 조작, 초미세 구조물 제작, 계면 혹은 표면의 나노 구조물 제작, 나노 구동 및 정렬, 나노 조작, 조립, 측정/분석, 모사 기술로 분류한다.

3.2 기술 영역 및 요소 기술

초미세 공정 및 장비 기술에 대한 국가 지도에서는 앞에서 설명한 핵심 기술을 기술 영역 별로 구분한 후 이를 구현하기 위한 요소 기술을

표 4 와 같이 분류하였다.

표 4 에서 보듯이 요소 기술은 100nm 이하의 패터닝 공정 기술, 10nm 이하 패터닝을 위한 프로브 응용기술, 그리고 이를 구현하기 위한 소재, 장

Table 4 Government Project for Nanotechnology

기술영역	핵심 기술 내용	요소기술
나노패터닝	접촉식 Lithography	· Imprint Stamping, Embossing, Injection Molding, 미세액적제어, 대면적화기술
	비접촉식 Lithography	· e-Beam, FIB, X-Ray Source 기술, EUV 광원설계기술 및 응용기술
나노프로브 응용공정	원자분자레벨물질 조작	· Nano Probe 설계 및 제작기술, 나노프로브 제어기술 및 병렬화 기술 · 병렬정보 인식기술 및 제어기술 · 미세한 힘을 측정할 수 있는 Cantilever 제작 기술
초미세구조물 제조공정	초미세 구조물 제작기술	· 초미세 방전, UV 레이저 빔 응용기술 · 화학반응기반 전해가공기술 · 나노 파워더 분사제어 패턴형성기술
	계면 혹은 표면의 나노 구조화 기술	· 계면 혹은 표면의 나노구조화, 고분자 화합물형성기술, 나노다공체, 소자화 기술
나노장비 기반기술	나노구동 및 정렬기술	· In-situ monitoring · 이송시스템 설계 및 나노제어기술
	나노조작기술	· Pick & place 기술, Gripper 제작 및 운용기술 · Haptic Device 운용기술 · 미세액적 추출기술 및 내부물질 제거기술
	조립(패키징)	· 미세접합기술, 미세액적 제어 및 섀림기술
신뢰성 기반기술	측정/분석기술	· In-situ 모니터링 기술 · 물성치수형상측정, 박막 미세구조분석 · 박막 표면/계면 분석기술
	모사기술	· 나노구조체 모델링 및 해석기술 · 분자동역학 해석 · 원자 및 마이크로미터 크기의 multi-scale 복합계산방법 개발 · 나노구조와 열, 전자기장, 접촉 등 외부환경과의 상호작용 전산모사기술

Table 3 Government Projects for Nano Technology

사업명	연구기반구축	기초기술개발	기반연구 (개발연구)
창의적 연구진흥 사업	“나노입자 제어 기술 연구단” 포함 4 개	“양자정보처리 연구” 를 비롯한 11 개 과제	
국가 지정 연구실(NRL)	“ 표준연구원 Nanometrology 연구실 ” 포함 5 개	“탄소나노튜브 구조상계 및 기능제어기술” 을 포함한 20 개 과제	
21 세기 프론티어 연구개발 사업			“나노 메카트로닉스 기술개발 사업” 포함 3 개 과제

비, 기반 기술로 분류되고 있음을 볼 수 있다.

3.3 기술 지도

그림 3 은 앞에서 언급한 기술 영역 및 요소 기술을 바탕으로 설립된 나노 메카트로닉스 분야에 대한 국가 기술 지도이다. 이 국가 기술 지도에서 다루는 5 개 분야 10 개 핵심 기술은 그림에서 보듯이 반도체 공정 기술 분야에 국한되기 보다는 새롭게 창출될 나노 시장 및 나노 기술을 기반으로 하는 5T 지원 시장에 초점을 맞추고 있으며, 향후 예측되는 시장화 추세로는 최우선적으로는 소자 및 소재 분야에서 상품화가 활발히 진행될 것이고 그 후 바이오 산업, 환경 시장 등에 신상품이 출현할 것으로 기대된다. 아울러 이들 제품의 연구와 생산을 위한 나노 장비 시장이 대두될 것으로 판단되므로 연구 개발 투자 시 이러한 분야에 자원을 집중하는 것이 향후 치열한 경쟁이 예상되는 나노 메카트로닉스 분야에서 기술적 우위를 확보하는데 중요하리라 예상된다.

4. 국제 협력

4.1 국제 협력의 필요성

초기단계에 머무르고 있는 초정밀 공정 및 장비 기술 분야에서의 국제협력은, 기술 선진국 대열에 조기 진입할 수 있는 발판을 마련할 수 있을 뿐만 아니라 국제 기술 교류의 한 축을 담당할 수 있게 됨으로써 기술 전략적 측면에서 중요한 의미를 갖게 될 것이다. 그리고 국제 협력이 이루어질 시, 선진국이 가지고 있는 관련 기초 기술 (초정밀 장비 구동 및 제어 설계 기술, 나노 이송 시스템 또는 CNT 생산 기술 등)을 습득할 수 있는 기회가 마련될 수 있으며 이는 향후 첨단 국가 전략 기술 개발에 있어 중요한 기초 기술의 토대를 구축할 수 있을 것이다. 특히 접촉식 리소그래피, 나노 단위 물질 조작, 초미세 구조물 제작 등 원천 기술의 개발 초기 단계에 있는 관련 기술을 조기에 국제 협력을 통하여 관련 기술을 습득함으로써 향후 선진국과의 기술 격차를 획기적으로 단축시킬 수 있는 계기를 마련할 것으로 기대된다.

4.2 협력의 핵심 요구 사항

국제 협력의 핵심 요구 사항은 크게 4 가지로 분류되는데 첫째, 원천 기초 기술 확보, 둘째, 핵

구분	1단계			2단계			3단계				
	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	
T e c h n o l o g y	나노형상가공기술	e-Beam, X-Ray, FIB Source 운용기술기반 30nm형상가공기술			10nm 형상가공기술 확보개발			시스템통합기술 완성			
		4"대면적 Imprint 및 Injection Molding 기술개발			12"대면적 Lithography 기술 개발						
	나노프로브 응용공정	고진공 응용기술개발			30nm 그루브 장비 설계 기술			10nm 그루브 장비 설계			
		AFM 응용 Indentator 기술 개발			10nm 이하 선평 Indent 기술			고속화 및 시스템 통합			
		나노프로브 조작기술			프로브 병렬화 기술 개발, 50x50			프로브 병렬화 기술 개발, 100x100			
초미세 구조물 제조공정	Cantilever 미세력 측정			10nm Indentator 설계 기술			1nm Indentator 설계 기술				
	미세방전 레이저 입자 가공 기술			마이크로-나노가공기 상품화							
나노장비 기반기술	마이크로 구조물 제작 기술			FIB-CVD 기반 삼차원 구조물 제작			나노 구조물 제작 기술 완성				
	표면의 나노 구조화 기술			마이크로-나노 복합화 기술 개발			10nm 이하 다공체 형성				
선평성 기반기술	5nm 이상 스테이지			2nm 이상 스테이지			1nm 이상 스테이지				
	500µm-100µm 부품 조립			100nm-30nm 부품 조립, 바이오 응용			30nm-10nm 부품 조립, 바이오 분야 조립 장비 설계				
P r o d u c t	나노 측정/분석/분류 기술 개발			수평분해능 2nm 선평 측정 기술 개발			1nm 선평 측정 기술, 0.5nm 선평 측정 기술				
	3차원 나노 영상 획득 및 인식 기술			실시간 영상 인식 기술			지능형 분석 시스템 도입				
초미세 공정/장비	분자동력학 전산모사			나노부품 상호연계 해석			나노 시스템 신뢰성 해석				
	50nm FIB, X-Ray, e-Beam, Imprint Lithography 장비			30nm 그루브 제작 장비			10nm 그루브 제작 장비				
	10nm Indentator			1nm Indentator							
	마이크로부품 가공기			마이크로나노 바이오 로봇/조립기			나노부품 조립 로봇, 나노바이오로봇				
수평분해능 2nm 목측 측정기			수평분해능 1nm 측정기			수평분해능 0.5nm 측정기					
직경 10nm 탐침			5nm 이하 탐침			원자단위 직경 탐침					

중요도 ■고 ■중 □저, 연구개발전략 ●기초연구 ◎상품화개발지원 ○국제공동연구 ○기술도입

Fig. 3 Technical Roadmap of Nano-Mechatronics

심 생산 기술 이전을 통해 기술의 실용화 촉진, 셋째, 연구 인프라 공동 활용, 넷째, 국제 협력을 통해 기술 표준화에 적절한 대응 등이다. 이를 확보하기 위하여 공동 연구, 교류, 기술 연수, 공동 설비 투자, 제휴, 기술 도입 및 기반 구축 등 다양한 협력 사업을 추진하여야 하며 이를 위하여 각 핵심 기술 별로 미국 등 선진국의 최고 기술을 확보한 대학, 연구소, 기업체 등을 분류하여 적절한 협력 방안을 추진 중이다.

5. 결론

이 원고에서는 나노 메카트로닉스 분야의 국가 기술 지도에 대한 내용을 다루었다. 여기에서 다루었던 나노 기술은 초기 상상력의 세계에서 벗어나 이제는 국가의 기반 산업에 응용되는 산업화 기술로 발전하고 있으며, 여러 분야에서 해당 나노 기술에 대한 기술 지도를 완성해나가고 있다.

나노 메카트로닉스 기술은 차세대 국가 성장 기술과 전통 기술을 지원하여 새로운 시장을 개척하며, 신기술/신상품을 개발할 수 있는 새로운 기반 기술로서 그 중요성이 매우 높다.

그러나 이러한 기술들은 단기적으로 성과를 기대하기는 어렵고, 국가적인 차원에서 중장기 계획을 수립하여 체계적으로 접근하여야 하고, 특히 다양한 공동 연구 프로그램을 개발하여 원천 기술에 대한 과감한 확보가 필요하다. 그리고 이를 통한 기술력 우위의 확보와 시장 선점은 향후 치열해질 나노 기술 시대에 무엇보다도 우선시되어야 할 목표가 될 것이다.

후기

본 원고는 과기부에서 시행하고 강신일(연세대), 강희석(생기원), 이인섭(나노유티㈜), 전병희(인덕대), 황경현(기계연) 기획위원 등이 같이 참여한 바 있는 '2003 년 국가기술지도(초미세공정 및 장비기술 보고서)'를 중심으로 작성되었습니다.

참고문헌

1. NATIONAL NANOTECHNOLOGY INITIATIVE, A Report by the Interagency Working Group on Nanoscience, Engineering and Technology,

- Committee on Technology National Science and Technology Council, 2000.
2. 1998 Technology Roadmap for Integrated Circuits Used in Critical Applications, Ted Dellin et al, Sandia National Laboratories, 1999.
3. Technology Roadmap for Nanoelectronics, R. Compano et al., 2000.
4. National Electronics Manufacturing Technology Roadmaps (NEMI Roadmaps), National Electronics Manufacturing Initiative, Inc., 2000.
5. The Global Technology Revolution : Bio/Nano/Materials Trends and Their Synergies with Information Technology by 2015, Philip S. Anton/Richard Silbergliitt, James Schneider, Prepared for the National Intelligence Council, RAND(National Defense Research Institute), 2001.
6. Nanotechnology Opportunity Report, CMP, 2002.
7. Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology, NSF, March, 2001.
8. Science and Technology : Its Consequences, Science News Online, 2002.
9. Max Schulz, " The End of the Road for Silicon?" Nature, 399(24), 729(1999).
10. Takashi Ito and Shinji Okazaki, " Pushing the Limits of Lithography, " Nature, 406(31), 1027(2000).