분자전자소자의 연구개발 동향

서 론

21세기에 들어서 고도의 정보화 사회에로의 움직임이 더욱 가속화되고 있으며 사람의 뇌, 눈, 그리고 심장으로 종종 비유되는 반도체, 디스플레이, 그리고 전지가 이러한 정보화 사회에서 필수적인 휴대용 정보통신기기에 반드시 요구되는 핵심 부품이다. 특히 한국의 산업은 이러한 첨단기술과 관련된 제조분야에 강한 장점이 있으며 이러한 분야의 전략적인 육성정책은 국가생존에 필수적이라고 할 수 있다.

지금까지는 문자정보나 음성정보를 주고 받았으나, 정보화 시대의 도래에 따라 앞으로는 화상정보를 주고 받을 필요성이 당장 대두되고 있다. 따라서 이러한 대용량의 정보를 저장하고 또한 빠른 시간에 전달해야 하는 필요성이 요구되고 있으며 기존의 반도체 성능으로는 이러한 요구조건을 만족시킬 수 없을 것으로 예상하고 있다. 따라서 지금보다 대용량, 초고속의 성능을 가진 반도체를 개발하기 위해서는 nano급 수준의 반도체 소자(이후 나노전자소자)를 개발하는 것은 필수적이라고 하겠다.

따라서 기존의 micro급 수준의 반도체 기술 이후 대용량, 초고속의 성능을 구현할 수 있는 소자들은 어떤 것들이 있으며 그 전망에 대하여 논의하는 것은 매우 의미 있는 일이라고 생각된다. 여기에서는 가능성이 있는 여러 종류의 나노전자 소자 중에서 특히 분자전자 소자의 최근 연구동향에 관하여 살펴보고자 한다.

본 론

지난 수십년간 이루어진 Si-based CMOS 회로선폭의 축소를 통한 소자의 대용량, 고집적화는 당분간 지속될 것으로 보이며 최근에는 극자외선 리소그래피 기술을 이용하여 회로선폭을 0.07 micron까지 줄여 기존의 소자보다 10배 이상 빠른 칩이 가능하다는 결과도 발표되었다. 그림 1은 3년마다 반도체 칩의 집적도가 4배씩 증가한다고 예측한 Moore의 제 1 법칙을 나타내며 이 법칙이 지금까지는 적용되어 왔으나[1], 2012년경에는 그 트랜지스터 소자의 물리적, 기술적 한계에 도달할 것으로 예측된다[2]. 그 때에 이르면 트랜지스터가 매우 작아 누설전류가 가장 극복할 수 없는 문제가 될 것이며 따라서 그 이후 집적도의 향상속도가 둔화될 것으로 예상된다.

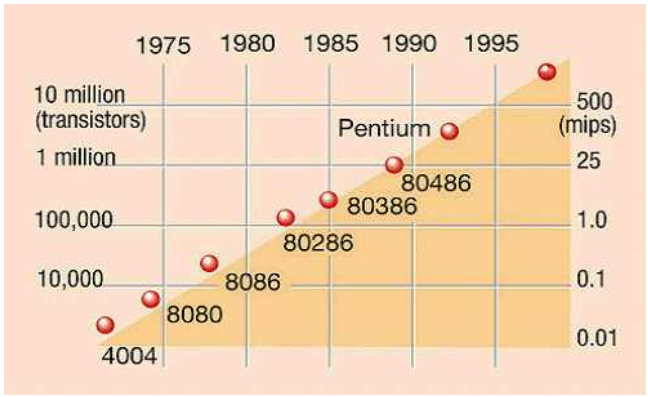


그림 1. 단일 반도체 칩의 집적도가 3년에 4배씩 증가한다는 Moore의 제 1 법칙

한편 이러한 기술적인 요인 이외에 고려되어야 할 또 다른 요인은 경제적인 면으로 그림 2는 Moore의 제 2 법칙을 보여주고 있으며 이 법칙에 의하면 반도체 칩 생산라인을 건설하는 데 드는 비용은 3년에 두배씩 증가한다는 것이다. 이 예측에 의하면 2010년에 생산라인

을 1개 건설하는 데 소비되는 비용은 무려 최대 500억 달러에 이를 것으로 예측된다. 1995년에는 라인 1개당 10억 달러의 비용이 소요되었으며 이 것은 그 당시 반도체 전체 시장의 약 1%에 불과하였으나, 이 Moore의 제 2 법칙이 계속 유효하다고 가정하였을 때 2010년에는 라인건설 비용이 약 300에서 500억 달러로 이르며 이 금액은 그 때 반도체 전체 시장의 약 10%에 해당하게 된다. 즉 2010년에 이르게 되면 반도체 칩 생산비용의 증가속도가 반도체 시장의 증가속도보다 커지게 되어 포화상태에 이르게 된다는 것을 의미한다. 이와 같이 기존의 CMOS 기술을 2010년 이후에 요구되는 나노전자 소자에 적용하고자 하면 위에 언급한 바와 같이 많은 문제점들이 해결되어야 한다.

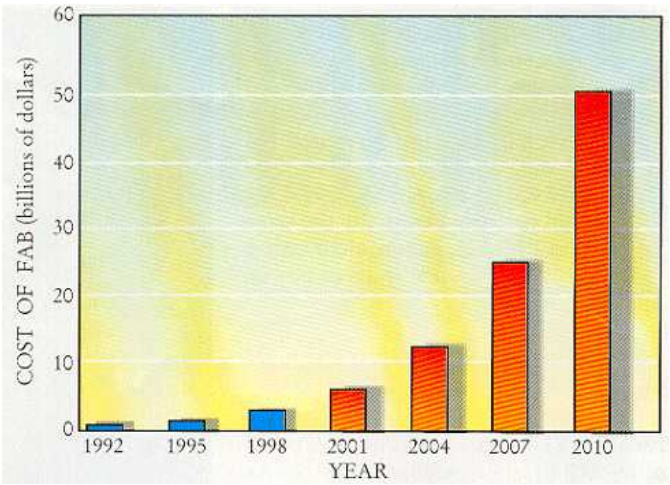


그림 2. 단일 반도체 칩의 라인건설비가 3년에 두배씩 증가한다는 Moore의 제2법칙

한편 컴퓨터를 이용한 계산이 이론적으로 어느 정도까지 가능한지를 R. Feynman이 열역학적인 관점에서 예측한 바에 의하면 기존의 pentium 칩의 성능보다 10배 이상 우수한 소자가 가능하다고 보고하였다. 그러므로 현재 전세계에서는 기존의 CMOS 기술을 나노전자 소자에 적용하는 나노 CMOS에 관한 연구가 매우 활발하게 진행되고 있으며 동시에 기존의 CMOS 기술과는 다른 새로운 개념의 나노전자 소자에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 이러한 것들로는 단전자 터널링 소자(Single Electron Transistor), 공진 터널링 소자(Resonant Tunneling Diode), 스핀 소자, quantum cellular automata, 그리고 분자 전자 소자(Molecular Electronic Device) 등이 있으며 여기서는 분자전자 소자에 관한 최근 연구동향에 관하여 살펴보기로 한다.

분자전자 소자는 1974년에 Northwestern 대학의 M. Ratner와 IBM의 A. Aviram이 공액성 전자 구조를 가진 분자들이 정류 특성을 가질 수 있다고 제안하면서 시작되었다[3]. 그 이후 츠쿠바대학의 H. Shirakawa 교수가 전도성이 있는 polyacetylene을 제조할 수 있는 방법을 발견함으로써 고분자 한가닥으로 전선을 대신할 수 있는 가능성을 보여 주었다[4]. 그러나 그 이후 이러한 분자들을 이용한 분자전자 소자에 대한 진전이 별로 없었으나, 1990년대 초에 Syracuse대의 R. Birge가 bacteriorhodopsin 박막을 이용하여 광학적인 RAM을 개발할 수 있는 가능성을 보여 주었다[5]. 여기에서 그는 이 단백질 분자가 빛을 흡수함으로서 한 상태에서 다른 상태로 스위칭할 수 있다는 것을 보여주었으며 레이저의 빔을 focusing하는데 한계가 있어 분자 한 개의 특성이라기보다는 수천개의 분자가 동시에 스위칭하는 특성을 관찰하였다. 그 이후 영국 Sheffield대의 F. Stoddart(지금은 UCLA)가 스위치로서 작동할 수 있는 rotaxane이라는 분자를 합성하였는 데 이 분자는 선형인 축과 그 축에 고리형의 분

자가 끼여 있는 구조를 가지고 있으며 1994년에는 그 분자구조에 고리형 분자와 상호작용을 할 수 있는 donor 그룹이 있는 rotaxane을 합성하고 전기화학적으로 산화환원을 시킴으로서 선형 축상에서 고리형 분자가 donor 그룹과 상호작용함으로서 축상을 이동할 수 있음을 보여 주었다[6]. 그 이후 Stoddart와 Bologna 대학의 V. Balzani가 위에서 언급한 rotaxane 분자를 이용하여 'XOR' logic gate를 구현하였으며 그 자세한 내용이 그림 3에 나와 있다[7]. 그림 3을 보면 화학적인 input을 가함으로서 고리형 분자와 형광 특성이 있는 선형 축의 분자가 서로 분리되거나, 다시 결합하는 특성을 형광이라는 output으로서 logic gate를 구현하였다. 또한 이외에 몇가지 logic gate를 구현한 예들이 있다[8,9] 그러나, 이러한 logic gate는 반도체와 같이 고체상태가 아니라 용액 상에서 구현하였기 때문에 기존의 반도체와 같이 복잡한 회로를 구성할 수 없다는 문제점이 있다. 즉 각각의 분자를 이용한 logic gate를 연결할 수 있는 기술과 또한 이렇게 logic gate를 연결하여 나오는 output을 외부세계로 끌어낼 수 있는 방법 등이 개발되어야 하였다.

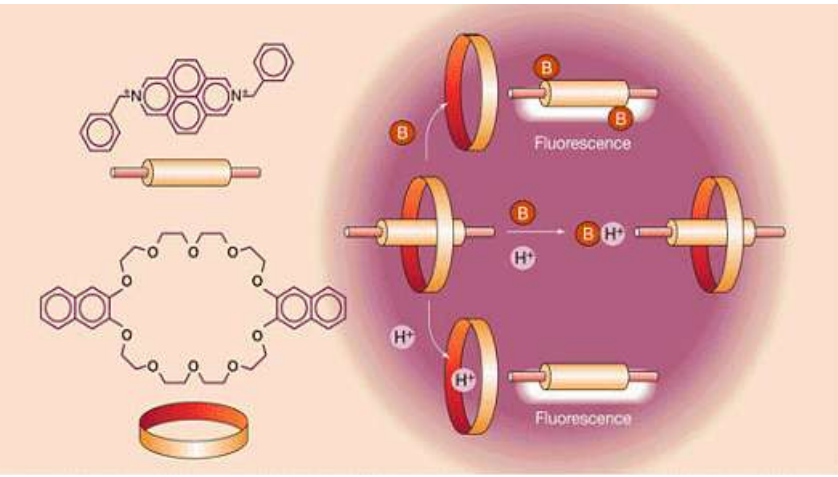
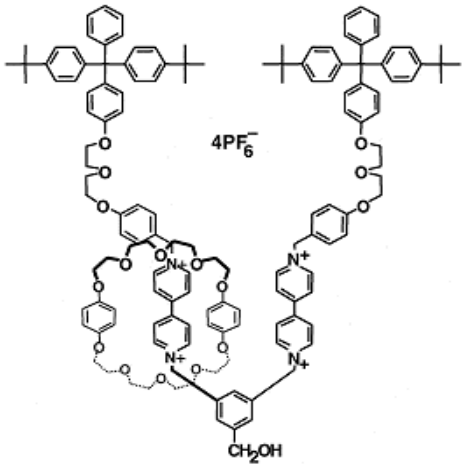


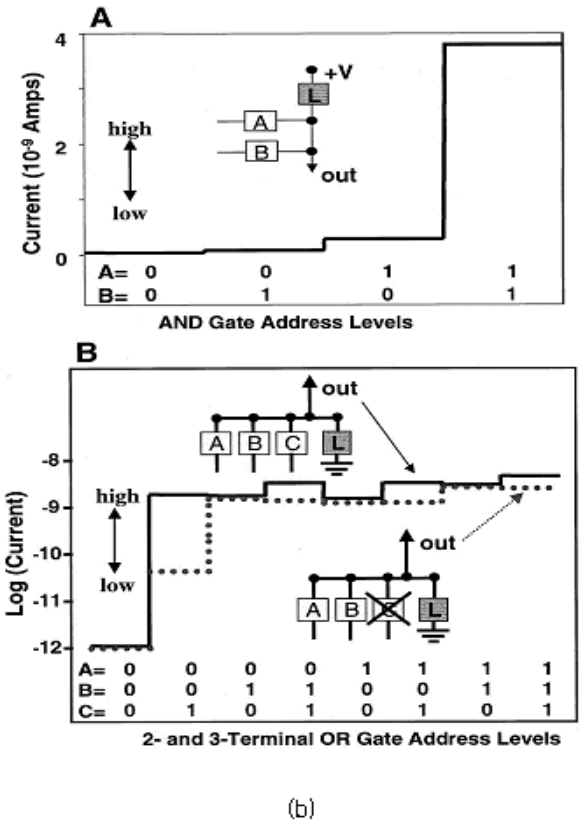
그림 3. Stoddart 그룹이 합성한 분자구조를 산화환원에 의하여 스위칭시키는 원리

최근에 이러한 분자들의 다양한 특성들을 이용한 단위 분자전자 소자를 고체표면에 addressible array(번지를 지정할 수 있는 배열) 형태로 제작하여 일종의 분자전자 소자 칩의 제작에 성공한 결과가 연이어 보고되고 있다[10-15]. 첫째로는 UCLA대의 J. F. Stoddart와 J. R. Heath, 그리고 HP사의 R. S. Williams 등이 rotaxane이라는 초거대분자(supramolecule)을 이용하여 소위 전기적으로 재배열시킬 수 있는 분자 스위치 array를 고체 상태로 제작하는 데 성공하였다. 그림 4는 rotaxane과 동시에 이 물질을 이용한 logic gate의 output 특성을 보여주고 있으며 이 그림에서 분자들의 스위치 특성을 이용하여 AND gate와 OR gate를 고체상에서 구현하였음을 알 수 있으며 또한 그림 5에서 이와 같은 내용으로 개발한 칩을 HP의 연구개발자가 보여주고 있다. 물론 이러한 분자전자 소자의 경우 rewrite를 할 수 없어 ROM으로만 사용될 수 있으며 또한 동작수명도 매우 짧은 단점이 있으나, 이러한 분자의 스위칭 특성을 이용한 고체상의 logic gate 구현은 매우 의미 있는 첫걸음이라고 생각된다. 그 이후로 이 그룹에서는 catenane이라고 하는 다른 모드의 스위칭 특성이 있는 분자를 사용하여 rerwritable할 수 있으며 또한 동작수명도 훨씬 연장된 logic gate 특성을 발표하였다.

그림 4. logic gate를 만드는 데에 사용된 rotaxane 분자의 구조(a)와 이 분자를 이용한 AND와 OR gate 특성(b)을 보여주는 그림



(a)



(b)

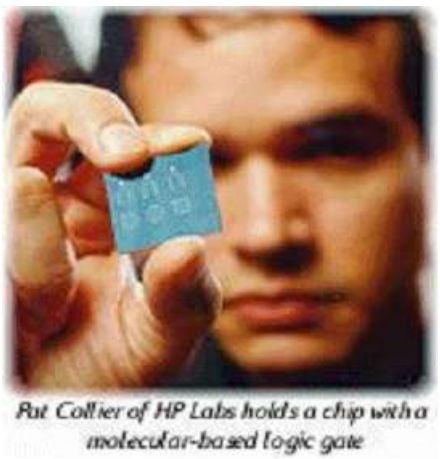


그림 5. Rotaxane 분자를 이용한 logic gate를 고체상태로 제작한 칩을 HP의 연구자가 보여주고 있음

둘째로는 Yale대의 M. Reed와 Rice대의 J. Tour가 공동으로 nitro와 amine기가 redox 센터로 작용하는 공액성 분자를 이용하여 분자 RAM을 최근에 개발하였으며 이 때에 사용된 분자들의 전형적인 구조가 그림 6에 나와 있다. 이러한 분자들도 역시 전에 언급한 경우와 같이 또다른 모드의 스위칭 특성을 보이며 그러한 기본적인 단위 분자소자의 전기적 특성을 nanocell이라는 새로운 computing architecture를 도입하여 서로 연결함으로서 새로운 분자전자 소자 칩을 개발하였다. 그리고 그 칩의 전형적인 형태가 그림 7에 나와 있으며 위에 보여준 경우 외에도 Harvard대의 C. M. Lieber 그룹에서도 carbon nanotube를 서로 cross 시켰을 때에 cross 된 지점에서 transistor의 특성이 있음을 최근에 발표하여 역시 많은 연구자들의 관심을 끌었다[16,17]. 그리고 또한 DNA의 double-helix를 이용한 다양한 논리 계

산의 가능성을 보여 주는 연구도 최근에 많이 보고 되었다[18.19].

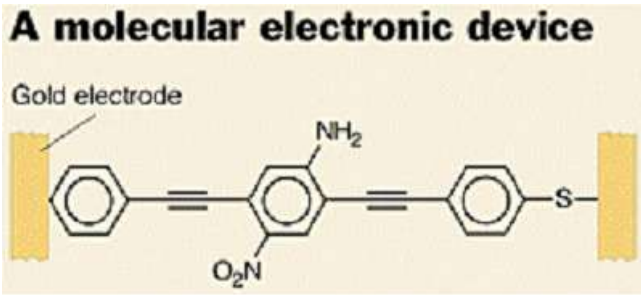


그림 6. Yale대의 M. Reed와 Rice대의 J. Tour가 공동으로 개발한 분자 RAM에 사용된 전형적인 분자 구조

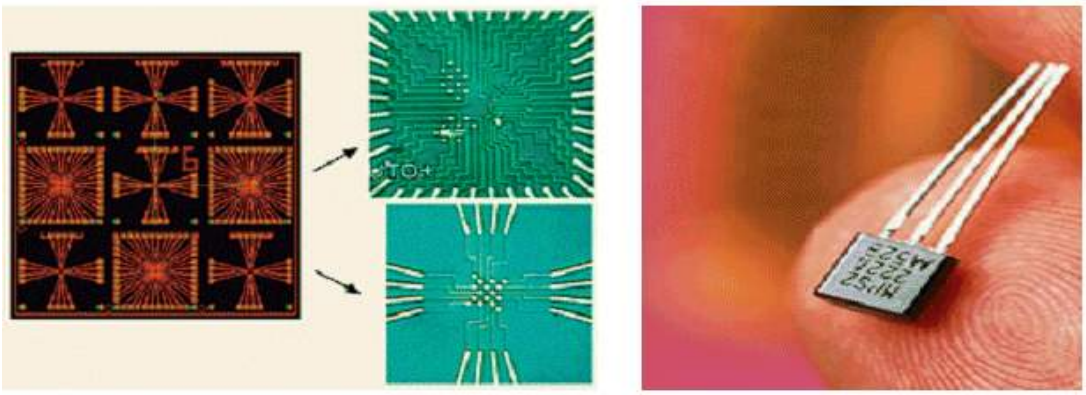


그림 7. Yale대의 M. Reed와 Rice대의 J. Tour가 공동으로 스위칭 특성이 있는 분자와 nanocell이라는 새로운 computing architecture를 도입하여 개발한 분자 분자전자 소자 칩의 내부 모습(a)과 그 칩을 packaging한 후의 모습

이와 같이 다양한 분자 구조를 갖는 분자들의 전기적인 특성을 이용하여 기존의 Si-based CMOS를 이용한 반도체 칩의 한계를 뛰어넘기 위한 노력이 가시화되기 시작되었다. Si-base CMOS 공정은 기본적으로 top-down 형식이다. 즉 lithography와 식각(etching)을 이용하여 패턴을 형성하는 과정을 통하여 인공적으로 디자인된 소자구조를 만들어 가는 과정이며 이 과정의 가장 큰 단점은 패턴 크기가 작아짐에 따라 걸리는 공정시간이 길어져 생산성이 낮아지며 따라서 제조원가가 매우 비싸진다는 점이다. 한편 분자전자 소자의 경우는 Si-based CMOS와 달리 소위 bottom-up 형식으로서 자체 조립(self assembly)이나 자체 조직화(self organization) 기능을 이용하여 분자 자체가 단위 소자의 기능을 하게 하고 이러한 단위소자를 집적화 하여야 한다. 이 경우에 문제점은 이러한 단위소자들 간의 연결과 또한 외부세계와의 연결 문제가 해결되지 않고 있다는 점이였다. 그러나, 최근에 위에서 언급한 바와 같이 기존의 Si-based CMOS의 경우와 전혀 다른 새로운 computing architecture를 도입함으로서 단위소자간의 연결문제는 어느정도 해결될 것으로 보이며 외부와의 연결문제도 이미 해결될 기미가 있다.

요 약

정보사회의 요구에 따른 반도체 칩의 집적도 및 동작 속도의 증가는 필수적이며 CMOS 기술에서는 최소회로선폭의 감소를 통하여 이 것을 실현해 왔으며 지금까지 Moore의 법칙에

따라 예측이 가능하였다. 그러나, 이제 CMOS 기술은 궁극적으로 물리적, 기술적, 그리고 경제적으로 그 한계가 가시화되어 가고 있으며 2012년 이후에는 CMOS 이후를 이끌어 갈 새로운 나노전자 소자 기술의 개발이 요구되고 있다. 혹자는 지금 이 시점이 마치 진공관 시대에서 트랜지스터 시대로 넘어가는 과도기와 같다고 보고 있다. 진공관 시대 사람들은 지금의 트랜지스터가 할 수 있는 일들을 진공관으로도 가능할 것이라고 생각하였으나, 지금 생각하여 보면 그 것은 분명히 잘못된 생각이였다는 것을 알 수 있다. 그럼 과연 이 시점이 그 때와 같은 상황인지 만약 그렇다면 CMOS 기술 다음은 어떤 기술이 될 것인지는 아무도 단언할 수 없을 것이다. 그러나, 한국과 같이 반도체 산업이 국가경제에 차지하는 역할이 매우 막중한 현실에서 과연 CMOS 이후의 기술은 과연 어떤것이 될 것인가를 생각하여 보는 것은 의미있는 일임에 틀림없다. 그 중의 하나로 간주되고 있는 분자전자 소자는 기존의 CMOS 기술과는 또 다른 면이 있으며 즉 이 분야는 이제까지 화학에서는 물론 전기전자공학, 금속재료 공학, 그리고 물리학에서도 심도있게 다루어 보지 않은 분야이며 또한 그 기술의 진행속도가 최근에 매우 빠르게 움직이고 있다는 점이다. 그러므로 분자전자 소자 분야의 기술이 상용화될 가능성에 대비하여 이 분야에 대한 관심과 지원이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Moore의 법칙, www.intel.com/intel/museum/25anniv/hof/moore.htm
2. Schaller, R. R., IEEE Spectrum 34, 53 (June 1997)
3. Aviram, A. & Ratner, M. A., Chem. Phys. Lett. 29, 277 (1974)
4. Chiang, C. K., et al. J. Am. Chem. Soc. 100, 1013 (1978)
5. Birge, R. R., IEEE Computer 25, 56 (1992)
6. Bissel, R. A., Cordova E., Kaifer, A. E. & Stoddart, J. E., Nature, 369, 133 (1994)
7. Credi, A., Balzani, V., Langford, S. J. & Stoddart, J. E, J. Am. Chem. Soc. 119, 2679 (1997)
8. De Silva, A. P. & McClenaghan, N. D., J. Am. Chem. Soc. 122, 3965 (2000)
9. Pina, F., Melo M. J., Maestri, M., Passaniti, P., & Balzani V., J. Am. Chem. Soc. 122, 4496 (2000)
10. Heath, J. R., Kuekes, P. J., Snider, G. S., & Williams, R. S., Science, 280, 1716 (1998)
11. Collier, C. P., Wong, E. W., Belohradsky, M., Raymo, F. M., Stoddart, J. F., Keukes, P. J., Williams, R. S., Heath, J. R., Science, 285, 391 (1999)
12. Ball, P, Nature, 406, 118 (2000)
13. Chen, J., Reed, M. A., Rawlett, A. M., & Tour, J. M., Science, 286, 1550 (1999)
14. Collier, C. P., Mattersteig, G, Wong, E. W., Luo, Y, Beverly, K., Sampaio, J, Raymo, F. M., Stoddart, J. F., Heath, J. R., Science, 289, 1172 (2000)
15. Reed, M. A., Chen, J., Rawlett, A. M., Price, D. W., & Tour, J. M., Appl. Phys. Lett., 78(23), 3735 (2001)
16. Rueckes, T., Kim, K., Joselevich, E., Tseng, G. Y., Cheung, C-. L., & Lieber, C. M., Science, 289, 94 (2000)
17. Cui, Y., Duan, X., Hu, J., & Lieber, C. M., J. Phys. Chem., 104, 5213 (2000)
18. LaBean, T. H., Yan, H., Kopatsch, J., Liu, F., Winfree, E., Reif, J. H., & Seeman, N.

C., J. Am. Chem. Soc. 122, 1848 (2000)
19. Mao, C., LaBean, T. H., Reif, J. H., Seeman, N. C., Nature, 407, 493 (2000)