

유한요소법을 사용한 나노스프링의 기하학적 형상에 관한 연구

A Study on Geometric Shape of Nanospring using Finite Element Method

김 성 섭* · 김 원 배** · 조 맹 효***

Kim, Seongseop · Kim, Wonbae · Cho, Maenghyo

요 약

본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 두 개의 층으로 이루어진 Si/SiGe 나노스프링의 기하학적 형상에 대한 연구가 수행된다. 나노스프링의 기하학적 형상에 영향을 미치는 주 설계요소는 두께, 폭, 길이, 격자방향 등이 있으며, 두 개의 층으로 이루어진 Si/SiGe 박막이 나노스프링의 형상을 가지게 되는 주원인으로는 두 개의 층 경계면에서 발생하는 misfit strain이 있다. 본 연구에서는 두께, 폭, 길이, 격자방향 등의 설계요소를 변화시켜가면서 misfit strain에 의한 나노스프링의 곡률 변화에 대한 해석 결과가 제시된다. 또한 해석 결과의 검증에 위해 해석해의 결과와 분자동력학 전산모사 결과가 함께 제시된다.

keywords : Nanospring, FEM, Si/SiGe bilayer, misfit strain

1. 서 론

최근 들어 MEMS/NEMS 구조물의 제작에 있어서 나노링, 나노코일, 나노드릴, 나노스프링(그림 1) 등의 나선형 구조물이 많이 제작되고 있다. 이 나선형 모양의 나노스케일의 구조물들은 단원자 물질, 산화물, 여러 층의 박막을 이용하여 제작되고 있다. 이러한 구조물 중에서 두 층의 박막으로 제작된 Si/SiGe와 InGaAs/GaAs 나노스프링은 매우 작은 스프링상수와 함께 압전효과를 가지고 있어서 정밀한 센서로 활용이 가능하다(Bell et al., 2006).

본 연구에서는 해석의 재료로 Si와 SiGe의 두 개의 층으로 구성된 나노스프링을 사용하였다. Si (Silicon) 과 Ge (germanium)은 동일하게 diamond 결정 구조를 가지며, 각각의 격자상수는 5.43 Å, 5.658 Å이다. SiGe 층은 Si와 Ge가 임의로 배열된 solid solution을 사용하였고, 격자상수와 탄성계수는 Si와 Ge의 값을 사용하여 선형 보간법으로 계산하였다. Si/SiGe 나노스프링의 제작은 단결정 Si wafer 위에 차례로 SiGe, Si 층을 적층한 후 wet etching 과정을 통하여 wafer로부터 분리시키는 공정으로 이루어진다(Bell et al., 2006).

나노스프링의 기하학적 형상은 스프링상수와 진동수 등의 특성에 많은 영향을 끼친다(Fonseca and Galvao, 2004). 재료의 결정 방향은 기하학적 형상을 결정짓는 요소 중 하나이다. 두 박막의 경계면에서의 misfit strain과 결정 재료의 이방성으로 인해 나노스프링의 모양이 형성되는데, Si/SiGe 나노스프링은 그림 2와 같이 bending rigidity가 약한 <100>방향으로 휘어지는 것으로 알려져 있다(Huang et al., 2005). 기하학적 형상을 결정하는 다른 요소로는 나노스프링의 두께, 폭, 길이 등이 있다. 현재 제조되고 있는 나노스프링

* 학생회원 · 서울대학교 기계항공공학부 석사과정 lamvo85@snu.ac.kr

** 학생회원 · 서울대학교 기계항공공학부 박사과정 wbkim@snu.ac.kr

*** 정회원 · 서울대학교 기계항공공학부 교수 mhcho@snu.ac.kr

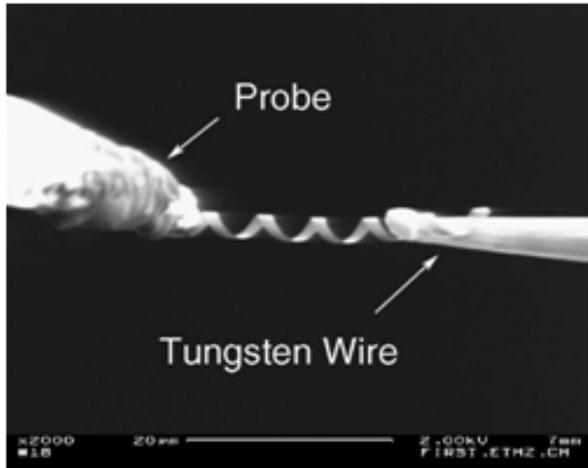


그림 1 나노스프링의 형상 (SEM image, Bell, 2006)

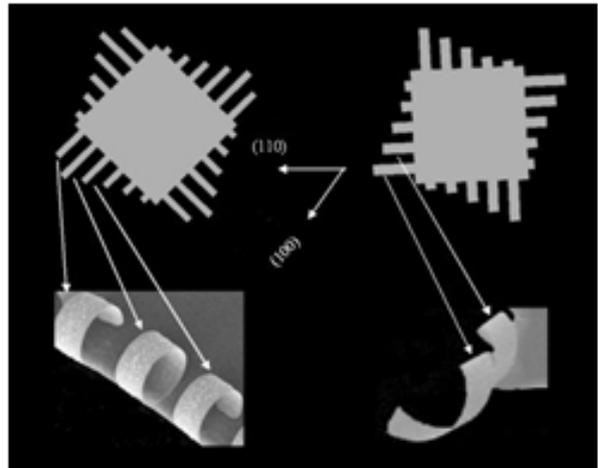


그림 2 격자 방향에 따른 나노스프링의 형상 (Huang et al., 2005)

은 대략적으로 두께가 수십 나노미터, 폭은 수 마이크로미터 정도의 크기를 가진다. 본 연구에서는 박막의 두께, 폭, 길이, 격자방향 등을 나노스프링의 설계변수로 사용하여 이 값들의 변화에 따른 나노스프링의 기하학적 형상의 변화를 유한요소법을 사용하여 살펴보았다.

2. 유한요소 모델링

2.1. 기하학적 형상

그림 3은 유한요소 전산모사에 사용된 Si와 SiGe의 모델을 간략하게 도시한 그림이다. Si/SiGe 박막의 변형 전 초기 형상은 그림 3과 같이 평평한 모양을 가지며, 여기에 misfit strain에 의한 하중을 부과하여 생기는 곡률의 변화를 측정하였다. Si와 SiGe의 두께비는 1:1로 동일하게 설정하였고, 전체 두께 및 폭과 길이를 변화시켜 가면서 전산모사를 수행하였다.

2.2. 재료의 물성

Si와 SiGe는 모두 diamond 결정구조로 결정 방향에 따라 다른 물성치를 가지며, 본 연구에서는 표 1과 같이 <100>방향과 <110>방향의 물성치가 사용되었다.

Si와 Ge의 격자상수는 각각 5.43 Å, 5.658 Å이므로 SiGe의 조성비가 50:50일 때 두 층의 경계면에서 발생하는 misfit strain은 다음과 같이 계산할 수 있다.

표 1 Si와 Ge의 방향에 따른 물성치

	C11 (GPa)	C12 (GPa)	C44 (GPa)
Si, <100>	168	66	84
Si, <110>	201	33	51
Si _{0.5} Ge _{0.5} , <100>	148.6	57	75.5
Si _{0.5} Ge _{0.5} , <110>	178.3	27.3	45.9

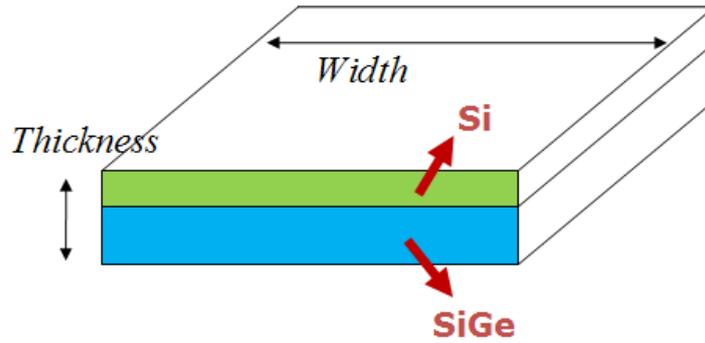


그림 3 시뮬레이션 모델의 초기 형상

$$\epsilon_{misfit} = \frac{5.658 - 5.43}{5.43} = 0.021 \quad (1)$$

유한요소 해석을 위한 프로그램은 ANSYS가 사용되었고, 3차원 요소와 2차원 shell 요소를 사용하여 비선형 해석을 수행하였다.

3. 결론

본 연구에서는 나노스프링의 형상에 영향을 미치는 각각의 설계요소를 변화시켜 가면서 곡률의 변화를 측정하였다. 두께의 변화에 대해서는 곡률의 변화가 발생하지만 두께를 일정하게 하고 폭과 길이를 변형시켰을 때의 곡률의 변화가 거의 없이 일정한 값을 나타낸다.

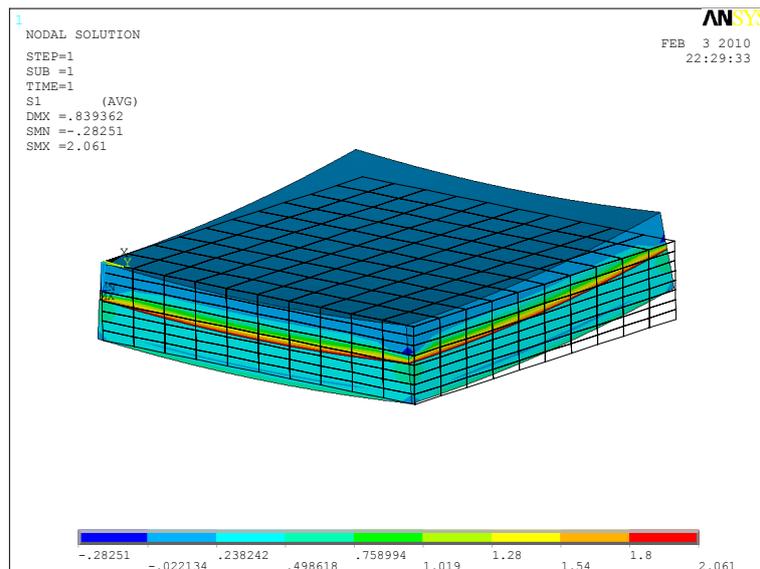


그림 4 유한요소 수행 결과(1st principle stress 분포)

감사의 글

본 연구는 한국과학재단이 주관하는 ‘국가지정연구실 사업(No. R0A-2009-000-20109-0)’의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- Bell, D. J., Dong, L., and Nelson, B. J. (2006) Fabrication and Characterization of Three-Dimensional InGaAs/GaAs Nanosprings, *Nano Letters*, 6(4), pp. 725~729.
- Bell, D. J., Sun, Y., Zhang, L., Dong, L.X., Nelson, B.J., and Grützmacher, D. (2005) Three-dimensional nanosprings for electromechanical sensors, *Sensors and Actuators A*, 130-131, pp. 54~61.
- Dismukes, J. P., Ekstrom, L., Steigmeier, E. F., KUDMAN, I., AND BEERS, D. S. (1964) Thermal and Electrical Properties of Heavily Doped Ge-Si Alloys up to 1300°K, *J. Appl. Phys.*, 35(10), pp. 2899~2907.
- Fonseca, A. F., and Galvao, D. S. (2004) Mechanical Properties of Nanosprings. *Phys. Rev. Lett.*, 92(17), p. 175502.
- Grutzmacher, Do., Zhang, L., Dong, L., Bell, D., Nelson, B., Prinz, A., and Ruh, E. (2008) Ultra flexible SiGe/Si/Cr nanosprings, *Microelectronics Journal*, 39, pp. 478~481.
- Huang, M., Boone, C., Roberts, M., Savage, D. E., Lagally, M. G., Shaji, N., Qin, H., Blick, R., Nairn, J. A., and Liu, F. (2005) Nanomechanical Architecture of Strained Bilayer Thin Films: From Design Principles to Experimental Fabrication, *Adv. Mat.*, 17, pp. 2860~2864.
- Hwang, G., Hashimoto, H., Bell, D. J., Dong, L., Nelson, B. J., and Schon, S. (2008) Piezoresistive InGaAs/GaAs Nanosprings with Metal Connectors, *Nano Letters*, 9(2), pp. 554~561.
- Kong, X. Y. and Wang, Z. L. (2003) Spontaneous Polarization-Induced Nanohelices, Nanosprings, and Nanorings of Piezoelectric Nanobelts, *Nano Lett.* 3(12), pp. 1625~1631.
- Poggi, M. A., Boyles, J. S., Bottomley, L. A., McFarland, A. W., Colton, J. S., Nguyen, C. V., Stevens, R. M., and Lillehei, P. T. (2004) Measuring the Compression of a Carbon Nanospring, *Nano Lett.* 4(6), pp. 1009~1016.
- Qteish, A. and Resta, R. (1988) Microscopic atomic structure and stability of Si-Ge solid solutions, *Phys. Rev. B*, 37(3), pp. 1308~1314.
- Wang, Z. L. (2004) Functional Oxide Nanobelts: Materials, Properties and Potential Applications in Nanosystems and Biotechnology, *Annu. Rev. Phys. Chem.*, 55, pp. 159~196.
- Zhang, H. F., Wang, C. M., Buck, E. c., and Wang, L. S. (2003) Synthesis, Characterization, and Manipulation of Helical SiO₂ Nanospring, *Nano Lett.*, 3(5), pp. 577~580.