

AlN 압전 진동형 마이크로 에너지 하베스터 설계 및 분석

이병철¹, 정귀상^{1,a}

¹ 울산대학교 전기전자정보시스템공학부

Design and Analysis of AlN Piezoelectric Micro Energy Harvester Based on Vibration

Byung-Chul Lee¹ and Gwi-Sang Chung^{1,a}

¹ School of Electrical Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

(Received March 30, 2010; Revised April 9, 2010; Accepted April 20, 2010)

Abstract: This paper describes the design and analysis of AlN piezoelectric micro energy harvester. The harvester was designed to convert ambient vibration energy to electrical power as a AlN piezoelectric material compatible with CMOS (complementary metal oxide semiconductor) process. To cut off the leakage current, AlN was used as the insulating layer. Also, Mo was used for the excellent c-axis crystal growth as the bottom electrode. The AlN harvester which it has the low operating frequency was designed by using the ANSYS FEA (finite element analysis). From the simulation results, the resonance frequency of designed model is about 360 Hz and analyzed the bending mode, displacement and expectation output.

Keywords: Vibration energy, Energy harvesting, AlN, FEA

1. 서 론

반도체 집적화와 저전력 전자기술의 발전과 더불어 센서노드 및 초소형 MEMS (microelectromechanical systems) 소자의 전원을 자체 공급하기 위한 에너지 하베스팅에 대한 연구가 최근에 활발하다. 제한적 수명을 가지는 기존의 박막형 초소형 전지를 대체하여 빛, 열 그리고 기계적 진동처럼 다양한 에너지원이 MEMS 소자의 에너지원으로서 개발되고 있다. 그 중에서 기계적 진동을 이용한 에너지원은 다른 에너지원과 달리 단순한 움직임 등 진동이 발생하는 환경에서 시간적 제약 없이 지속적으로 사용이 가능하며, MEMS 소자에 내장 및 집적화가 가능하다 [1]. 일반적으로 진동을 이용한 변환기는 정전기, 전자기, 압전 등 크게 세 가지 형태로 분류된다. 그중에서 압전효과를 이용한 변환기는 간단한 구성과 높은 변환효율

로 인해 가장 널리 사용되고 있다.

MEMS형 압전 변환기에 사용되는 대표적인 압전 물질로는 PZT, AlN, ZnO 등이 있다 [2]. 그중 PZT는 가장 높은 압전 상수를 가지며 널리 사용되지만, 취성이 강하여 부서질 수 있으며 Pb 성분을 함유하고 있어 인체용 전원으로 사용이 불가능하다. ZnO의 경우에는 증착법이 다양하며 비교적 큰 압전 상수를 가지고 있지만, 절연특성이 좋지 않으며 비선형 저항 특성으로 인해 박막형의 변환기로 제작이 어렵다. 반면에 AlN은 PZT와 ZnO에 비해 낮은 압전 상수를 가지고 있지만, 인체에 무해할 뿐만 아니라 높은 절연 특성과 전기적 저항, 낮은 증착 온도특성으로 AI 전극을 이용한 VLSI (very large scale integration) CMOS (complementary metal oxide semiconductor) 공정과의 호환성을 가진 가장 유용한 압전 물질로 주목을 받고 있다 [3]. 또한, 빠른 표면 탄성과 전파속도, 안정적인 유전상수와 큰 양호도, 높은 결합계수를

a. Corresponding author; gschung@ulsan.ac.kr

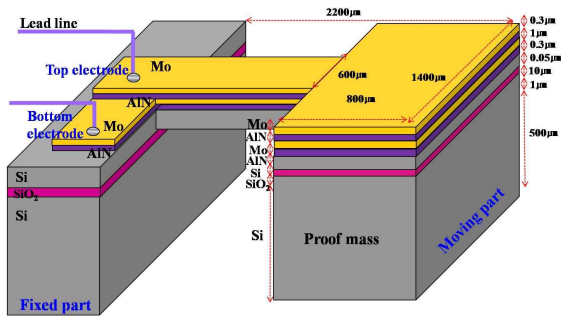


Fig. 1. Schematic structure of designed AlN micro energy harvester.

가지며 압전특성을 이용한 표면 탄성과 소자나 체적 탄성과 공진기 그리고 MEMS와 같은 다양한 분야에 응용이 가능하다 [4].

본 연구에서는 AlN을 압전물질로 사용하여 CMOS 공정과의 높은 호환성과 집적화가 가능한 AlN 압전 에너지 하베스터를 설계하였다. 또한, 수학적 모델링과 ANSYS FEA (finite element analysis)를 적용하여 설계한 MEMS용 에너지 하베스터의 예상 출력 및 모드별 동작특성을 분석하였다.

2. 실험

AlN 압전 하베스터 설계에 있어 Si 기판위에 AlN 박막을 증착할 경우, 두 물질 간에 격자 부정합(19%)과 열팽창 계수 (17%)가 매우 커 AlN 박막의 결정장상을 약화시키며 압전특성을 감소시키는 요인이 된다 [5]. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 Mo를 하부전극으로 사용하여 AlN이 우수한 c-축 배양성을 가지도록 설계하였다. 또한, SOI 기판위에 절연특성이 뛰어난 AlN을 증착하여 압전 박막으로부터 발생하는 누설전류를 차단했다 [6]. 그림 1은 설계한 AlN 압전 마이크로 에너지 하베스터의 도식적 구조를 나타낸 것이며 FEA를 위해 입력한 물성치는 표 1과 같다 [7].

유한요소 모델링에 있어서 압전체에 가해주는 응력과 발생하는 전압의 요소 타입별 에러를 줄이기 위해 Solid 95의 요소 타입을 사용하였다. Solid 45의 경우, 최소 13%에서 최대 57%까지의 평균 에러가 발생하는 것에 비해 Solid 95 요소는 에러율이 10% 미만으로 구조물 해석에서 발생할 수 있는 오류를 줄일 수 있다[8].

Table 1. Input values of material properties.

Property	Si	SiO ₂	Mo
Young's modulus (GPa)	170	90	329
Poisson's ratio	0.34	0.165	0.31
Density (kg/m ³)	2330	2200	10200

Sputtered AlN films

Density (kg/m ³)	ρ	3512
Elastic stiffness (GPa)	c ₁₁	345
	c ₁₂	125
	c ₁₃	120
	c ₃₃	395
	c ₄₄	118
	c ₆₆	110
Piezoelectric stress constant (C/m ²)	e ₁₅	-0.48
	e ₃₁	-0.45
	e ₃₃	1.55
Dielectric permittivity (ε ₀)	ε ₁₁	9
	ε ₃₃	11

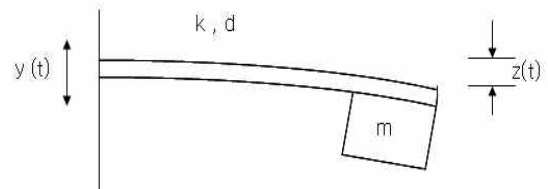


Fig. 2. Equivalent model of AlN micro energy harvester.

다층 캔틸레버 구조물의 경우, free 메쉬로 제작할 경우에 층간 메쉬가 매우 조밀하게 형성되어 해석에 있어 많은 어려움이 있다. 본 연구에서는 구간내의 메쉬 수를 고정하는 mapped 메쉬 방법을 사용하여 일정한 형태의 메쉬를 균일하게 형성하여 해석시 발생하는 오차와 소요되는 시간을 줄였다.

설계한 AlN 압전 마이크로 에너지 하베스터는 빔과 집중질량, 스프링과 기계적 감쇠기로 구성된 전형적인 1차유도를 갖는 진동 시스템으로 그림 2처럼 등가모델로 나타낼 수 있다.

여기서 m , d , k 는 각각 AlN 압전 마이크로 에너지 하베스터의 등가질량, 등가 감쇠, 등가 강성이며 $y(t)$ 와 $z(t)$ 는 각각 외부에서 들어오는 진동변위와 등가질량이 움직이는 상대변위를 나타낸다.

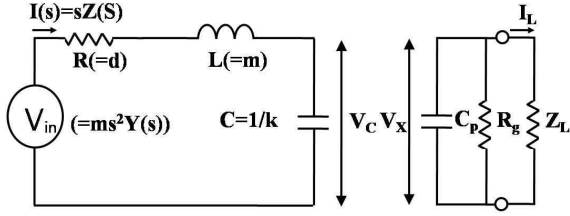


Fig. 3. Equivalent circuit of the AlN micro energy harvester.

시스템에 뉴턴의 운동법칙을 적용하면 다음과 같이 모델링할 수 있다.

$$m\ddot{z}(t) + d\dot{z}(t) + kz(t) = -m\ddot{y}(t) \quad (1)$$

위 식을 라플라스 변환하면 다음과 같이 주어진다.

$$-ms^2Y(s) = sZ(s)\left[ms + \frac{k}{s} + d\right] \quad (2)$$

어떤 진동 질량에 대한 기계적-전기적 유사 시스템으로 등가 시키면 식 (3)처럼 주어지며 등가회로는 그림 3과 같다.

$$-V_m(s) = I(s)\left[sL + \frac{1}{Cs} + R\right] = V_C(s) + I(s)[sL + R] \quad (3)$$

식 (3)에서 $V_m(s)$, $I(s)$, L , R 은 식 (2)의 진동시스템에서 각각 $ms^2Y(s)$, $sZ(s)$, d , m , $1/k$ 에 해당된다.

등가회로에서 V_C 와 V_X 는 각각 진동 시스템에서 발생한 힘, 진동에 의해 AlN으로 부터 발생한 전압이며 C_p 와 R_g 는 각각 등가 캐패시턴스와 AlN의 유전 손실이다. 또한, I_L 과 Z_L 은 각각 회로에 흐르는 전류 및 부하저항을 나타낸다.

기계적 에너지에서 전기적 에너지로 변환시키는 경우에 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환할 때 변환상수 k_e 는 다음과 같다.

$$k_e = \frac{1}{2}C_pV_x^2 / \frac{1}{2}CV_c^2 \quad (4)$$

따라서, AlN에서 발생하는 최대 순간 에너지는 다음과 같다.

$$E_c(s) = \frac{1}{2}C_pV_x^2 = k_e \frac{1}{2}CV_c^2 = \frac{1}{2}k_e C \left(\frac{I(s)}{Cs}\right)^2 \quad (5)$$

식 (2)와 (3)을 식 (5)에 대입하여 정리하면, 다음과 같다.

$$E_c(\omega) = \frac{k_e m^2 Y^2(\omega)}{2k} \frac{\omega^4}{\left[1 - \gamma^2\right]^2 + \left[2\zeta\gamma\right]^2} \quad (6)$$

여기서, ω 는 외부에서 유입되는 진동주파수이며 γ 는 진동수비으로 다음과 같다.

$$\gamma = \omega / \omega_n \quad (7)$$

식 (7)에서 ω_n 는 시스템 고유진동수($\omega_n = \sqrt{k/m}$)이다. 또한, ζ 는 감쇠비이며 다음과 같다.

$$\zeta = \frac{d}{2\sqrt{mk}} \quad (8)$$

식 (5)와 (6)에서 등가 캐패시턴스에서 유도 전압차 V_x 는 다음과 주어진다.

$$\begin{aligned} V_x^2 &= \frac{2E}{C_p} = \frac{2}{C_p} \left[\frac{k_e m^2 Y^2(\omega)}{2k} \frac{\omega^4}{\left[1 - \gamma^2\right]^2 + \left[2\zeta\gamma\right]^2} \right] \\ &= \frac{2t}{\varepsilon A} \left[\frac{k_e m^2 Y^2(\omega)}{2k} \frac{\omega^4}{\left[1 - \gamma^2\right]^2 + \left[2\zeta\gamma\right]^2} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, $C_p = \frac{\varepsilon A}{t}$ 이다.

식 (9)에서 공진일 때($\gamma = 1$), 에너지는 최대가 되며 이때 발생 전압 V_x 는 다음과 같다.

$$V_{x\max}^2 = \frac{2t}{\varepsilon A} \left[\frac{k_e m^2 Y_0^2}{2k} \frac{\omega_n^4}{\left[2\zeta\right]^2} \right] \quad (10)$$

공진상태에서 부하저항에 따른 출력전력 P 는 다음과 같이 주어진다.

$$P = I_L^2 Z_L = \left[\frac{V_x R_g}{R_g + Z_L} \right]^2 Z_L \quad (11)$$

따라서, 최대 전력 P_{\max} 는 다음과 같다.

$$P_{\max} = I_L^2 Z_L = \left[\frac{V_{x\max} R_g}{R_g + Z_L} \right]^2 Z_L \quad (12)$$

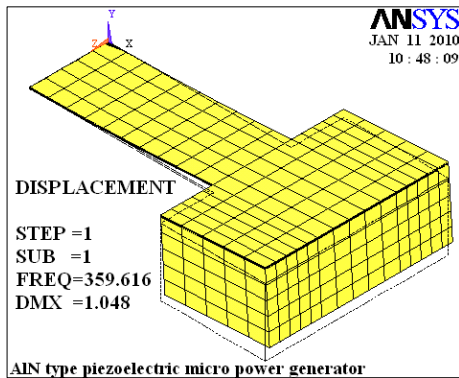


Fig. 4. Optimal modal of designed AIN micro energy harvester.

3. 결과 및 고찰

그림 4는 FEA를 이용하여 설계한 캔틸레버형 AIN 압전 마이크로 에너지 하베스터이다. $600 \times 1400 \times 10 \mu\text{m}^3$ 의 멤브레인 크기와 $800 \times 1400 \times 500 \mu\text{m}^3$ 의 집중질량을 갖는 AIN 압전 마이크로 하베스터는 12200개의 절점과 2500개의 요소로 구성되었다. 경계 조건은 캔틸레버의 한쪽 단이 고정된 상태로 가정하였으며 ANSYS를 이용하여 모드해석 한 결과 고유진동수는 1차 모드에서 약 360 Hz임을 알 수 있다. 집중질량을 부가함으로써 기존 압전 마이크로 하베스터의 고유진동수보다 떨어짐을 알 수 있다.

그림 5는 설계한 AIN 마이크로 에너지 하베스터의 Model 해석을 통한 1~4차 굽힘 모드별 변형률을 나타낸 것이다. 1차 공진(360 Hz)모드와 두개의 절곡점을 나타내는 3차 공진(3614 Hz)모드, 비틀림의 굽힘 동작을 나타내는 2차 공진(1184 Hz)모드와 4차 공진(19474 Hz)모드 등 모드별로 고유한 굽힘특성을 나타내었다 [9]. 이때 1차 공진주파수에서 캔틸레버 끝단에서 최대의 변형률을 나타냄을 알 수 있다.

그림 6은 최대 변형이 발생하는 캔틸레버 끝단의 노드를 기준으로 harmonic 해석을 사용하며 주파수 범위에 따른 변위를 나타낸 것이다. 한쪽이 고정된 캔틸레버 구조물의 경우, 무수히 작은 질량이 연속해서 달려있는 것과 같은 다 자유도계 시스템으로 볼 수 있기 때문에 무수히 많은 고유 진동수와 모드가 존재하나 물체가 지닌 고유의 강성으로 인해 높은 모드의 진동은 실제적으로 일어나기 어렵거나 진폭이 극히 작아 큰 영향을 미치지 못한다. 상, 하부로 균일한 굽힘 특성을 가지는 1차 모드 공진점인 360 Hz와 3600 Hz

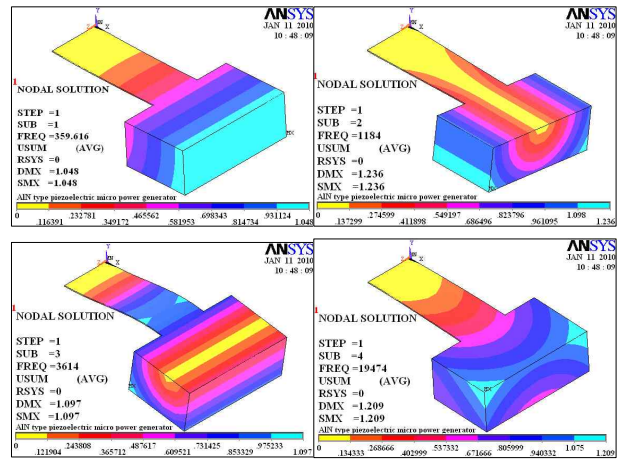


Fig. 5. Strain distributions of AIN micro energy harvesters with bending modes.

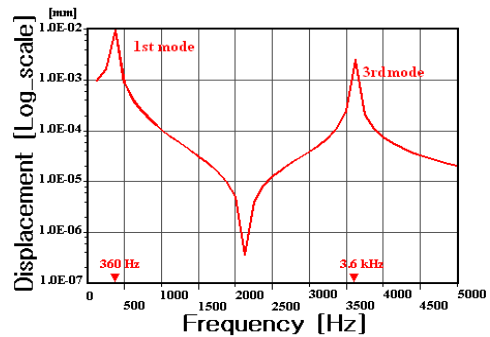


Fig. 6. Displacements of AIN micro energy harvesters with frequency range.

에서 최대 변위가 발생됨을 알 수 있다. 따라서 상·하부로 균일한 굽힘 특성을 가지는 1차 모드 공진점에서 최대 출력을 획득할 수 있음을 알 수 있다.

그림 7은 식 (9)를 이용해서 AIN 마이크로 에너지 하베스터의 진동 주파수 변화에 따른 예상 출력전압을 나타낸 것이다. 이때 1.0 G의 가속도 360 Hz 공진에서 0.54 V의 출력 전압이 예측되었다.

그림 8은 식 (10)를 이용하여 AIN 마이크로 에너지 하베스터의 공진 주파수에서 가속변화에 따른 출력 전압의 변화를 나타낸 것이다. 360 Hz의 공진에서 가속도를 증가시킬수록 선형적으로 출력 전압이 증가하였다. 출력 전압은 가속도의 크기에 비례함을 알 수 있다.

그림 9는 식 (12)를 이용하여 AIN 마이크로 에너지 하베스터의 부하저항 변화에 따른 예상 출력 전압과 전

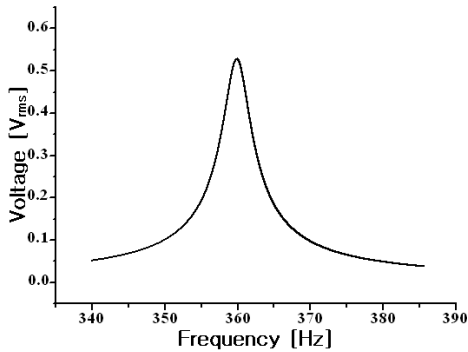


Fig. 7. Output voltage variations of AlN micro energy harvester with frequency.

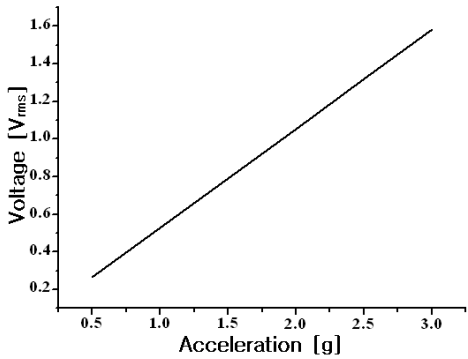


Fig. 8. Output voltage variations of AlN micro energy harvester with accelerations.

력을 나타낸 것이다. 약 80 kΩ의 부하에서 최대 전력전송이 이루어지며 이때 약 6.6 nW의 출력이 예측된다.

4. 결론

본 연구에서는 CMOS 공정과의 호환 및 집적화가 가능한 MEMS형 마이크로 에너지 하베스터를 제작하기 위해 AlN을 압전 물질로 사용하여 에너지 하베스터를 설계하였다. 또한 기존 MEMS형 마이크로 에너지 하베스터보다 고유진동수를 낮추기 위해 켈틸레버 끝단에 집중질량을 부착한 MEMS형 마이크로 에너지 하베스터를 설계한 다음, ANSYS을 이용하여 시스템 특성을 분석했으며 특히, 설계한 MEMS용 에너지 하베스터의 수학적 모델 식을 이용하여 예상 출력을 확인하였다. FEA한 결과, 설계한 진동형 AlN 압전 마이크로 에너지 하베스터가 360 Hz의 낮은 동작 주파수에서 6.6 nW 전력이 출력됨을 알 수 있었다.

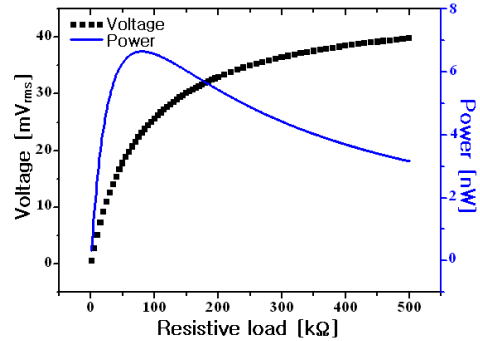


Fig. 9. Output voltage and power variations of AlN micro energy harvester with load resistance changes.

향후 제작과 출력 검증을 통해 CMOS 공정과 높은 호환성을 가지며 집적화가 가능하고 인체에 무해한 MEMS용 저전력형 센서노드의 전원공급원으로 사용될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청 및 국방과학연구소 지원으로 수행되는 차세대군용전원특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] S. P. Beeby, M. J. Tudor, and N. M. White, *Meas. Sci. Technol.* **17**, R175 (2006).
- [2] S. T. McKinstry and P. Muralt, *J. Electroceram.* **12**, 7 (2004).
- [3] K. Tonisch, V. Cimalla, C. Foerster, H. Romanus, O. Ambacher, and D. Dontsov, *Sens. & Actua. A* **132**, 658 (2006).
- [4] J. Olivares, E. Iborra, M. Clement, L. Vergara, J. Sangrador, and A. Sanz-Hervás, *Sens. & Actua. A* **123**, 590 (2005).
- [5] G. S. Chung and T. W. Lee, *J. Kor. Sens. Soc.* **13**, 462 (2007).
- [6] J. B. Lee, J. P. Jung, M. H. Lee, and J. S. Park, *Thin Solid Films* **447**, 610 (2004).
- [7] M. S. Lee, S. Wu, Z. X. Lin, and R. Ro, *Jpn. J. Appl. Phys.* **46**, 6719 (2007).
- [8] V. Hariharan and PSS. Srinivasan, *J. Sci. Technol.* **2**, 45 (2009).
- [9] Z. C. Qiu, H. X. Wu, and D. Zhang, *Thin-Walled Struct.* **47**, 836 (2009).