

X선 감지를 위한 PIN형 실리콘 다이오드 어레이 제작

차경환*, 이규항*, 남형진(책임저자)*

*선문대학교 전자공학과

초록

실리콘을 사용한 X선 감지용 센서 어레이 제작에 대해 연구하였다. 단일 센서 소자에서는 필수적인 guard ring 구조가 어레이에서는 적절히 설계되지 못할 경우 누설전류 증가를 초래하는 것으로 나타났다. 즉, 누설전류는 공핍층 두께와 능동영역 및 guard ring 구조 간 거리에 매우 민감한 것으로 조사되었다. 또한 다결정 실리콘과 n형 도핑 소스로 인을 활용하는 조합이 결함 gettering을 위한 효율적인 방법임이 입증되었으나 고온 공정과정에 보호되지 않은 채 노출되는 경우에는 효과적이지 못한 것으로 관측되었다. 본 연구에서는 이러한 결과들을 고려하여 어레이를 제작하였으며 우수한 특성을 관찰할 수 있었다.

1. 서론

반도체를 사용한 방사선 센서에 대한 관심은 날로 증가하고 있으며 그 결과 많은 연구가 진행되고 있다[1-4]. 이러한 관심의 증가는 반도체를 활용한 방사선 감지기의 응용분야가 날로 확장되고 있는데 기인하며 dosimetry, 비파괴검사, 디지털 방사선 진료 등 의료장비 분야 등이 응용분야에 속한다. 방사선 중 비교적 낮은 에너지의 X선 감지를 위해서는 여러 반도체 물질 중 실리콘이 가장 적합한 것으로 고려되고 있는데 이는 화합물 반도체에서 나타나는 전하를 띤 입자들의 trapping이나 space charge 누적 등의 현상에 따른 반응성 감소가 실리콘에서는 나타나지 않기 때문이다[4,5]. 또한 반도체 산업에서 이미 개발된 공정을 사용하여 제작을 할 수 있다는 장점을 갖고 있기도 하다[6].

실리콘을 사용한 다양한 형태의 방사선 감지 센서에 대한 연구는 이미 많이 진행되어 왔다[7,8]. 하지만 방사선 센서의 특징이 공정에 매우 민감하게 종속하는 반면 일반적으로 공정이 비교적 복잡하며 또한 공정에 대한 상술된 연구 결과를 찾기는 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서는 실리콘을 사용하여 제작한 PIN 다이오드 형태의 방사선 센서 공정과정에 대하여 서술하였다. 특히 공정 시에 누설전류를 최소화하기 위한 방안에 대하여 중점을 두었고 센서의 특징 면에서는 방사선 에너지에 대한 센서 반응의 선형성에 중점을 두었다.

2. 실리콘 PIN 다이오드 어레이 제작

두께가 250 μm 인 (100)방향의 v 형 4" 실리콘 기판에 능동영역이 160 μm X 160 μm 인 PIN형 다이오드를 어레이 형태로 기존의 실리콘 공정기술을 사용하여 제작하였다. 사용된 기판은 비저항이 10K Ω 이며 양면이 모두 polish되었다. 그림 1에는 제작된 PIN 다이오드의 단면도와 다이오드 어레이의 표면 사진을 제시하였다. 본 연구에서는 각 센서 어레이의 드라이버는 또 다른 기판에 제작하여 bump bonding 기법으로 두 기판을 접착하는 방법을 채택한 관계로 그림 1에 제시한 사진에 보이는 바와 같이 PIN 다이오드가 단순 나열되어 있다.

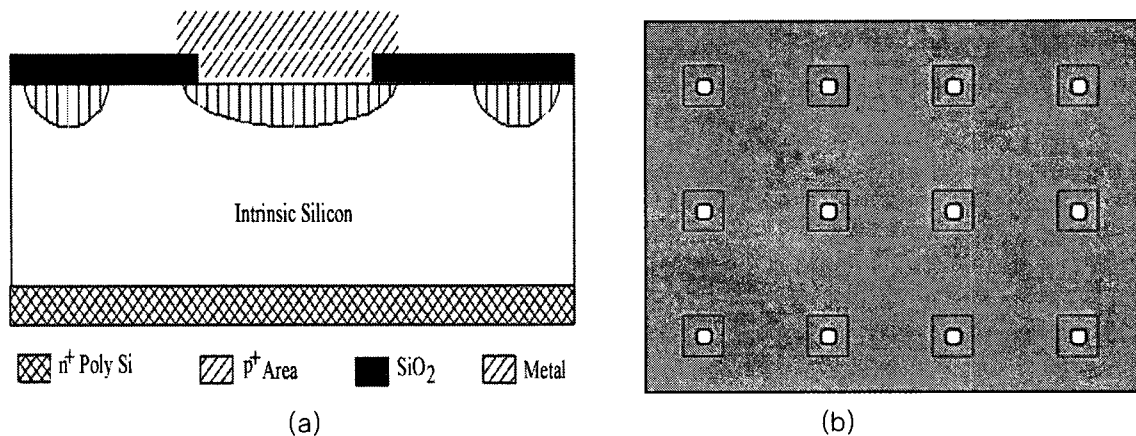


그림 1. (a) PIN형 센서의 단면도 (b) PIN형 센서 어레이의 평면 사진

센서 어레이 공정은 실리콘 기판을 950°C에서 습식 산화막을 성장시키는 것으로 시작하였다. 그 다음 기판 뒷면을 n^+ 전극으로 사용하기 위해 성장된 산화막을 제거하고 여기에 1 μm 두께의 다결정 실리콘을 LPCVD 시스템의 압력을 350mtorr로 유지하며 650°C에서 증착하였다. 증착 후 인을 ion implantation 방법으로 주입하였으며 시뮬레이션을 사용하여 주입된 인의 양이 약 $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 이 되도록 에너지와 도스 값을 결정하였다. P^+ 영역은 기판 윗면에 붕소를 역시 ion implantation 방법으로 주입하여 형성하였다. 이 번에도 인과 같은 농도를 획득할 수 있도록 implantation 조건을 시뮬레이션 결과를 토대로 설정하였다. PIN 다이오드 구조 형성 후 결합 gettering 공정을 진행하기 위해 TEOS CVD 시스템을 사용하여 1 μm 두께의 산화막을 다결정 실리콘 상에 증착하였다. 이 과정은 결합 gettering 시에 다결정 실리콘이 산화되는 것을 방지함은 물론 이온 주입된 인과 함께 효율적인 gettering 장소로서의 역할을 수행할 수 있는 고유의 특징을 유지시키는데 필수적인 단계이다. 본 연구에서는 이러한 과정이 생략될 경우 다결정 실리콘이 결합 gettering에 크게 기여하지 못하는 것을 밝힐 수 있었다.

결합 gettering 은 900°C에서 3영역 전기로를 이용하여 수행하였는데 초반 15분 동안은 산소 분위기에서 이루어졌으며 이 때 형성되는 산화막은 주입된 인과 붕소가 소자 밖으로 확산되어 손실되는 현상을 방지하게 된다. 이후에는 질소분위기에서 2시간 45분 동안 진행되었다. 이 후 공정은 기판 전면에 전극 형성을 위한 패턴 형성을 한 뒤 RF sputter 시스템을 사용하여 알루미늄을 양면에 증착하여 전극을 형성함으로써 마무리되었다.

제작된 PIN형 센서 어레이의 전기적 특성은 HP4145B와 HP4284A를 사용하여 측정 분석하였다. 방사선 감지 반응을 측정하기 위해서는 전하 감지 증폭기를 사용하여 적분기 형태의 펄스 카운터를 회로를 구성하였다. 방사선 소스로는 60KV, 2mA의 바이어스를 인가한 텅스텐을 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

우선 센서 어레이 제작 시에 guard ring 구조를 사용할 것인지 여부를 결정하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 2에는 능동영역과 guard ring 구조 사이의 거리(L)에 따른 누설전류를 시뮬레이션 한 결과를 제시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 L이 공핍층 두께보다 작을 경우에는 만족스런 누설전류가 획득되나 그렇지 못 할 경우에는 누설전류가 급격하게 증가한다. 따라서 공핍층 두께는 spatial resolution 향상을 위한 픽셀 크기의 최소화에 실질적인 한계를 부여한다. 즉 픽셀의 최소 크기는 적어도 공핍층 두께의 두 배는 되어야 하는 것이다. 이는 곧 guard ring을 제거할 경우 픽셀 집적도를 4배나 증가시킬 수 있음을 암시하고 있으나 이럴 경우 이웃한 픽셀 간 간섭효과가 어느 정도일지 고려되어야 한다.

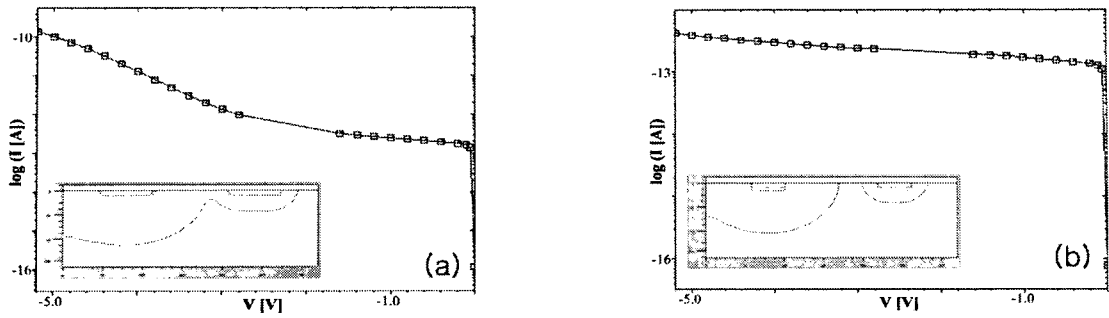


그림 2. L에 따른 누설전류 모사 결과 (a) L = 100μm (b) L = 120μm

그림 3에는 하나의 픽셀이 방사선에 노출되었다고 가정하고 이웃한 픽셀 간 간섭 정도를 분석한 시뮬레이션 결과를 제시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 guard ring이 있는 경우 노출되지 않은 픽셀에 흐르는 전류는 노출된 픽셀에서 감지된 전류의 5%정도이다. 반면 guard ring이 없는 경우 간섭에 의한 전류는 약 15%정도로 증가한다. 본 연구에서는 이 정도의 증가는 4배에 달하는 집적도 향상을 고려할 때 감당할 수 있는 대가라고 고려하여 센서 어레이 제작 시 guard ring 구조는 배제하기로 하였다.

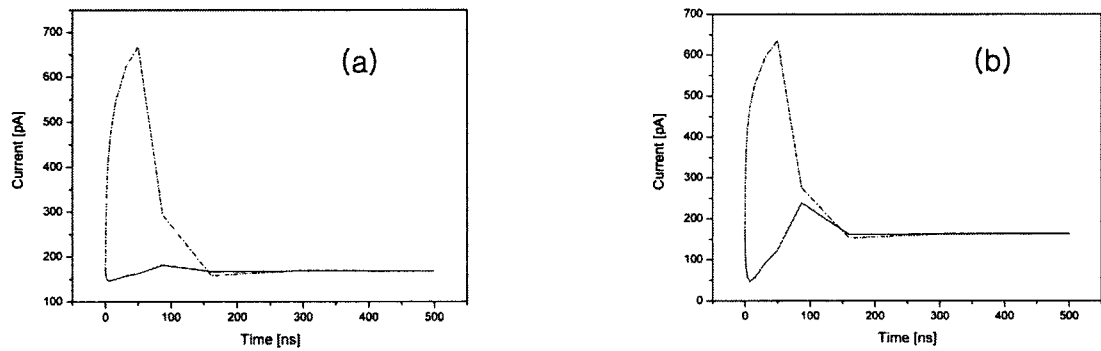


그림 3. guard ring 구조 여부에 따른 이웃한 두 픽셀에 흐르는 전류의 모사 결과 (a) 있는 경우 (b) 없는 경우. 점선은 조사된 픽셀의 전류이며 실선은 이웃 픽셀의 전류

PIN형 센서 어레이의 특성을 측정하기 위하여 편의 상 어레이 중 10 X 10의 100개를 병렬로 연결하여 측정하였다. 그림 4에는 이 들 어레이의 전기적 특성에 대한 측정 결과를 제시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 100개의 센서에 흐르는 누설전류는 10V에서 대략 70pA 정도로 매우 우수하다. 반면 이 들 센서의 바이어스를 5V에 고정하고 2초 동안 방사선을 조사한 경우 감지된 신호는 약 40nA에 달하는 것으로 측정되어 방사선 조사에 따른 반응성도 매우 뛰어난 것을 알 수 있다.

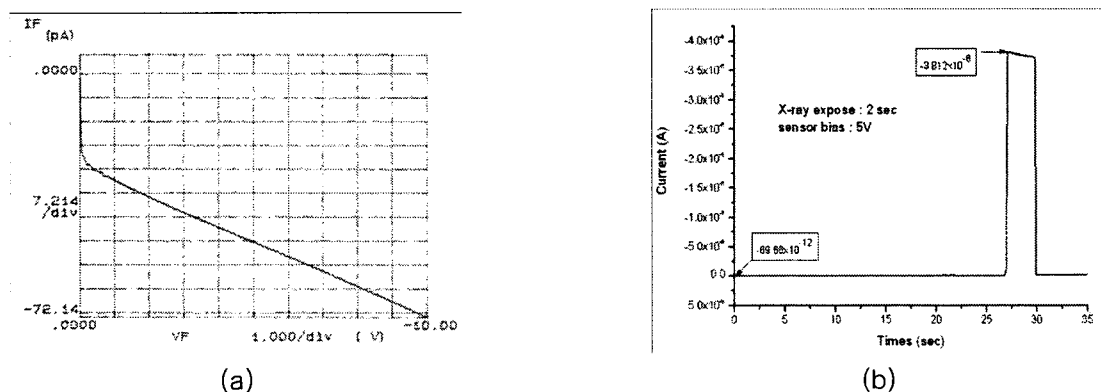


그림 4. (a) 센서 어레이의 누설전류 특성 (b) 센서 어레이의 방사선 조사에 따른 반응 특성

그림 5에는 센서 어레이 제작 방법과 동일한 공정으로 제작된 단일 센서에서 측정한 방사선 감지 특성 결과를 제시하였다. 그림 5(a)에서 볼 수 있듯이 방사선 감지 특성이 우수한 선형성을 보이고 있다. 한편 59.56KeV 에너지를 갖는 γ 선에 대해 FWHM이 5.41KeV로 측정되어 방사선 에너지에 대한 분해능 또한 약 9% 정도로 우수하다는 것을 볼 수 있다.

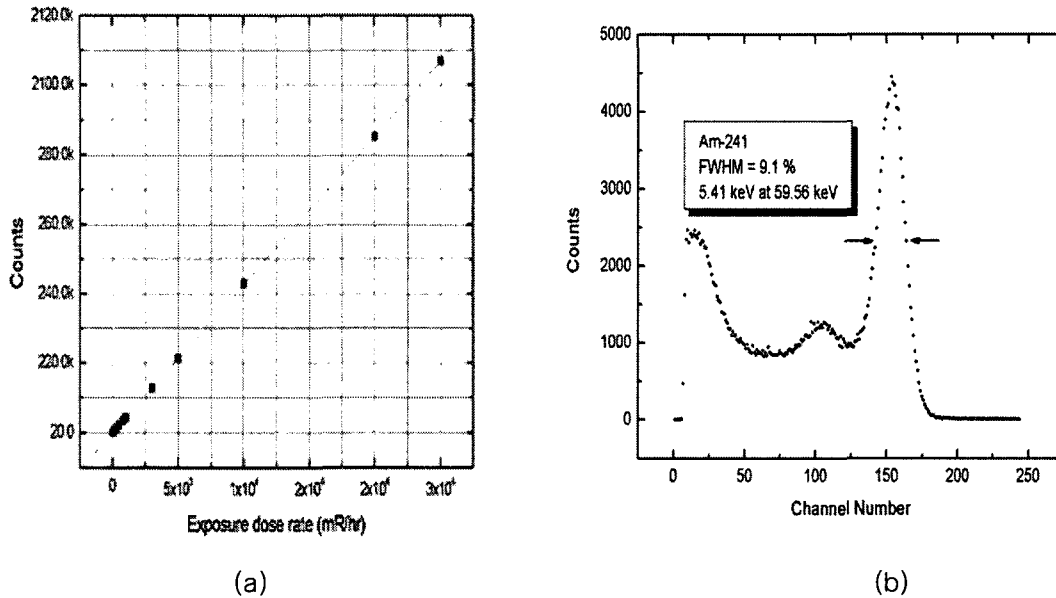


그림 5. (a) 방사선 에너지에 따른 선형 특성 (b) 센서의 방사선 에너지 분해능 특성

4. 결론

실리콘을 사용한 X선 감지 용 센서 어레이를 제작하였다. 단일 센서 소자에서는 필수적인 guard ring구조가 어레이에서는 잘 못 설계될 경우 누설전류 증가를 초래하게 되며 이 구조를 제거할 경우 이웃한 픽셀 간 간섭효과는 약 3배 정도 증가하는 것으로 본 연구 결과 알 수 있었다. 한편 효율적인 결함 gettering을 위해 다결정 실리콘과 n형 도핑 소스로서 인을 채택한 조합은 다결정 실리콘이 고온 공정과정에 보호되지 않은 채 노출되는 경우에는 효과적이지 못한 것으로 관측되었다. 이러한 주요 관찰 결과들을 고려하여 본 연구에서 제작한 센서 어레이는 전기적 특성 및 방사선 감지 특성 모두에서 우수함을 입증하였다.

참고문헌

- [1] Q. Zhang, Q. Wnag, Z. Xie, and S. Nie, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res A 496, 146 (2003)
- [2] D. M. Fleetwood, Microelectronics Reliability 42, 523 (2002)
- [3] J. H. Park, S. H. Seo, I. S. Wang, J. K. Shin, and P. Choi, J. Korean Phys. Soc. 44, 157 (2004)
- [4] A. Khan, M. Yamaguchi, Y. Ohshita, N. Dharmarasu, K. Araki, T. Abe, H. Itoh, T. Ohshima, M. Imaizumi, and S. Matsuda, J. Appl. Phys. 90, 1170 (2001)
- [5] D. S. McGregor and H. Hermon, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A 395, 101 (1997)
- [6] M. Ave, R. Vazquez, E. Zas, J. Hinton, and A. Watson, Astroparticle Phys. 14, 109 (2000)
- [7] S. Holland, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A 275, 537 (1989)
- [8] R. Hartmann, D. Hauff, P. Lechner, R. Richter, L. Struder, J. Kemmer, S. Krisch, F. Scholze, and G.Ulm, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A 377, 191 (1996)