

동시계수 양전자 소멸 측정에 의한 양성자 조사된 Si 구조 특성

이권희 · 이종용*

한남대학교 물리학과, 대전 306-791

(2011년 7월 19일 받음, 2011년 8월 16일 수정, 2011년 8월 17일 확정)

동시 계수 도플러 넓어짐 양전자 소멸 분광법으로 p형과 n형 실리콘 시료에 0, 4.0 MeV 에너지의 $1.0, 2.0 \times 10^{13}$ protons/cm² 양성자 빔 조사에 의한 결함을 측정하여 실리콘 구조 특성에 대하여 조사하였다. 양전자와 전자의 쌍소멸로 발생하는 감마선 스펙트럼의 수리적 해석 방법인 S-변수와 W-변수를 사용하여, 시료의 구조 변화를 측정하였다. 본 연구에서 측정된 S-변수는 시료에 조사된 양성자의 빔 에너지에 따라 변하지 않고 거의 일정한 값을 보인 반면, 양성자 조사량의 변화에 따라 결함이 증가하였으며, 그 이유는 양성자 조사 에너지에 따른 Bragg 피크 때문에 에너지는 시료의 특정 깊이에 주로 결함을 형성하여 시료 전체에는 결함으로 잘 나타나지 않기 때문으로 판단된다. 그리고 빔의 조사량에 따른 결함의 영향이 큰 것으로 나타났다.

주제어 : 양성자 빔, S-변수, W-변수, 동시 계수 양전자 소멸, Cz-Si

1. 서 론

결정 실리콘 웨이퍼는 친환경적 고효율의 에너지 재료인 태양전지 [1,2,3]나 고 집적 성능을 위한 반도체 소자의 재료로 사용된다 [4,5]. 실리콘 시료는 고 효율화 된 태양전지를 위한 광 생성에 의한 전자 및 정공들의 쌍을 많이 만들 수 있는 것과 빛을 많이 받기 위한 표면 전극, 반사 그리고 열손실 등과 수용 효율을 늘리기 위하여 손실을 줄이는 방법에 대한 연구를 하고 있다. 반도체의 경우는 많은 양의 저장 메모리를 지닌 미세 형상으로 이루어진 경박 단소화의 양질의 조정에 대한 고려가 필요하다. 일반적으로 반도체 소자의 제작과정에서 증착, 식각 등 물리, 화학적인 변화를 반복함으로써, 제조 과정에서 발생하는 시편의 결함을 고려할 때 결함이 필수 불가결하다고 할 지라도 실리콘 시료에 대하여 특히 p형과, n형인 불순물 실리콘 웨이퍼의 사용량의 증가 추세에 따라서 불순물 실리콘 웨이퍼의 신뢰도를 높이기 위한 결함에 대한 특성 연구가 반드시 필요하다.

양전자 소멸 측정법은 금속이나 반도체의 결함에 대한 특성이나 폐쇄 기공(closed pores) 결함 측정 [6]과 오픈 불륨 결함 측정에도 이용되고 있으며 [7,8,9], 물질의 전자

구조, 결함 측정, 전자의 밀도분포 및 운동량 분포 등 핵과 고체 물리에서 사용되는 방법이다. 특히 전자의 반입자인 양전자는 전자와의 상호 작용을 통한 재료에서 원자 단위의 크기에 대한 결함 특성을 측정하는 수단으로 연구되어 왔다. 측정법이 용이하고 측정하는 경우에도 시료가 보존 되는 방법의 하나로 시료에 전혀 영향을 주지 않으며, 나노미터 정도의 결함에 대하여 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다. 양전자가 전자와 소멸을 할 때는 대부분의 경우 2개의 감마선이 180° 각도를 이루면서 방출된다. 도플러 넓어짐 양전자 소멸 측정법은 하나의 검출기로 전자의 운동량을 이용한 양전자 소멸 측정의 한 방법이다. 이 측정법은 운동량을 가진 전자와 양전자의 쌍 소멸에 의하여 발생하는 것을 이용한 것으로써 양전자가 전자와 소멸할 때 총 에너지가 $2mc^2 - E_b$ 인 두 개의 감마선이 서로 반대 방향으로 방출하는 것이다. 이때 각각 mc^2 와 E_b 는 전자의 정지 에너지와 결함에너지이다. 운동량과 에너지의 보존법칙에 따라서, 이 에너지는 두 광자로 똑같이 나누어지지 않고, 전자의 운동방향에 따라 한 광자 에너지는 $p_Lc/2$ 가 늘어나고, 반면에 다른 광자의 에너지는 같은 양만큼의 에너지가 줄어든다. 이 경우 운동량 p_L 은 전자와 양전자 소멸 시 광자 방사가 일어나는 세로 방향의 성분이다. 사용되는 검출기

* [전자우편] cylee@mail.hannam.ac.kr

는 광자들이 임의의 방향으로 방사하는 경우에도 청색 편이와 적색 편이로 이동된 광자 모두의 측정을 할 수 있다. 이때의 에너지에 관한 식 $2\Delta E = p_{\text{LC}}$ 에 의한 소멸광자 피크의 넓어짐이 생기게 된다. 일반적으로 이 광자를 검출하기 위하여 게르마늄 검출기를 사용하는데 그 이유는 고 에너지 광자에 대하여 충분히 좋은 분해능과 상대적인 효율이 높기 때문이다.

그러나 이 측정법의 약점 중의 하나는 상대적으로 신호 대비 커다란 잡음이며 특히 저에너지 방향의 피크에 영향이 크다. 이것을 보완하기 위하여 동시 계수 도플러 넓어짐 측정 방법(Coincidence Doppler Broadening Positron Annihilation Spectroscopy: CDBPAS) [10]이 개발되었다. 상당히 많은 잡음을 줄임으로서, 이 측정 방법으로 분해능이 현저하게 증가되어 코아 전자들의 높은 운동량 소멸에 대한 정보를 얻을 수 있고 이론적 계산과 비교할 수 있게 되었다. 지난 몇 년 사이에는 이 방법을 통하여 소멸된 격자들에서의 화학적 성분을 구하게 되었다. 즉 상대적으로 낮은 운동량의 전도 전자들과의 양전자 소멸은 작은 도플러 이동을 보여주지만 높은 운동량의 가전자나 코아 전자들과의 양전자 소멸은 상대적으로 큰 도플러 이동이 나타난다. 그러므로 511 keV 에너지 분포보다 큰 에너지 부분에 기여하게 된다. 일반적으로 코아 전자들의 에너지 분포는 각 원자들의 고유한 화학적 성분에 대한 특성으로 나타나고 주변의 화학적 영향을 많이 받지 않는 것으로 알려져 있다. 그러므로 동시 계수 측정법으로 얻은 높은 에너지 분포에서의 코아 전자와 양전자 소멸은 물질의 화학적 성분에 대한 정보를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 서로 다른 종류인 불순물 단결정 실리콘 시료의 결함에 대한 특성을 조사하고자 한다. 우주 개발의 관심에 따라서 입사되는 우주 방사선의 90% 정도인 양성자 조사에 따르는 실리콘 시료의 효율 저하에 대하여 동시계수 도플러 넓어짐 양전자 소멸법(CDB)에 의한 결함의 양에 대한 분석을 사용하였다. 기 발표에 따르면 우주 방사선의 양성자 환경에서는 우주선에 사용되는 반도체의 특성에 지대한 효과를 나타낼 수 있다 [11,12]. 실험실에서 양성자 조사량의 변화에 따른 시료의 결함의 특성을 분석함으로써 우주 방사선에 의한 실리콘 소자의 영향에 대한 연구를 위한 실험을 목적으로 수행하였다.

II. 실험방법

단결정 4" p, n형 Cz로 성장된 실리콘 시료를 각각 $20 \times 20 \times 0.5$ mm로 제작하였으며, 양성자 빔 조사를 위하여 원자력의학원의 싸이클로트론 MC 50 가속기를 이용하였다. 빔의 세기는 초기 값을 30 MeV, 5 μ A로 사용하였고, 에너지 감손을 위하여 두께 2.2+1.96 mm 진공 거리를 180 cm로 놓았다. 뒷부분의 산란 에너지를 무시하고자 시료 뒤에 알루미늄의 얇은 막을 사용하였으며, 본 실험에서는 3% 이하로 맞추었다. 조사하는 빔의 반치 폭은 12 mm이고, 시료에 조사되는 양성자 빔의 에너지는 4.0 MeV, 47 nA이며, 빔의 크기는 지름이 약 20 mm의 크기로 조절하였다. 시료에 양성자 조사량을 변화시켰으며, 각각 $1.0, 2.0 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ 로 하였다. Fig. 1(a)는 양성자 조사 실험 장치를 보여 주고 있으며, p, n형 실리콘 시료를 에너지 조사량의 변화에 따른 양성자 빔 조사에 의한 결함 정도를 알아보 고자 하였다.

동시 계수 양전자 소멸 분광법 실험을 하기 위하여 양전자 소스는 활성화 면적의 직경이 9.53 mm이고, 5 μ m 두께의 니켈 foil로 양면을 감싸고 있는 25 μ Ci ^{22}Na 소스를 사용하였다. 양전자의 열적 투과가 시료 내부에 들어가서 100 μ m보다 깊게 투과하므로 측정하려는 시료의 경우 두께가 500 μ m로써 본 실험에서는 두께의 효과를 무시할 수 있다. Fig. 1(b)는 동시 계수 양전자 소멸 분광 실험 장치를 보여 주고 있으며, 양전자 소스는 시료 한 쌍의 가운데에 샌드위치 형태로 배치하였다. 양전자 소멸에 의한 511 keV 감마선 에너지 검출을 위하여 Ortec사 Gem 20180-P 검출기 그리고 내부 및 외부 증폭기를 사용하여 측정하였다. 또한 동시 계수 측정을 위하여 Labo-eq사의 NT24-DUAL을 사용하였다.

III. 실험결과 및 고찰

가속기에서 나오는 조사된 양성자는 얇은 알루미늄 창이 박막을 통과한 수소의 빔 라인에 의해 발생되며, 빔이 사각형 모양이나 빔의 거리 조절을 하여 크기와 에너지를 변화시킬 수 있다. 양성자 빔의 조사에 의한 결함은 p형과 n형 실리콘 시료 실험의 경우에는 100 MeV 이상 커다란 에너지의 양성자 빔 조사 시에는 결함이 증가하는데, 이 경우는

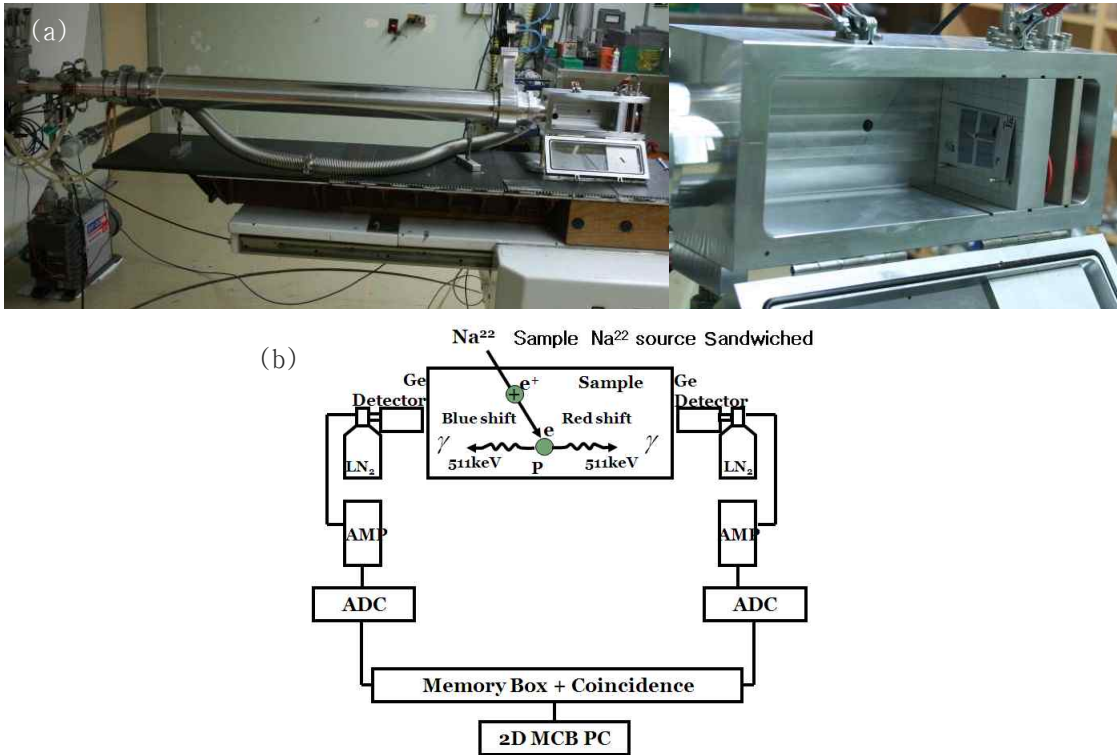


Figure 1. (a) The proton path chamber and (b) Schematic Diagram of Coincidence Doppler Broadening Positron Annihilation setup.

고립된 음전자 형태의 단 정공들의 결합이나 두 정공들의 결합으로 나타난다고 알려져 있으므로 [13] 양전자가 정공 결합근처에서 주변의 최외각 전자와 소멸할 경우 S-변수 값은 현저히 증가할 것이다. 그러나 본 실험에서는 시료가 단 결정 입자형태로서 저 에너지 양성자 조사의 경우에는 실리콘에서 나타나는 결합처럼 에너지에 따라서 다르게 구별되지는 않는다. Fig. 2는 양성자 빔의 에너지를 p, n 형 실리콘 시료에 조사시켰을 때, 4.0 MeV로 고정시키고 양성자를 1.0×10^{14} protons/cm²과 2.0×10^{14} protons/cm²으로 조사하였을 때의 S 변수의 값이다. 에너지를 변화시키면서, 조사량을 고정시켰을 때는 조사에너지에 따른 S 변수 값에서의 변화는 적었으며 특히 기 발표된 [14] IP 영상 판의 경우에는 S 변수 값이 조사에너지에 비례하여 큰 변화가 없었다. 그러나 조사량의 변화에 따라서 약간의 차이가 나타남을 알 수 있다.

Fig. 2(a)의 S-변수는 p형과 n형 실리콘 시료의 경우에 모두 증가하며 특히 조사를 하는 경우에는 S-변수 값이 증가하는 것으로 나타난다. Kelly et al. [15]에 의하면 p, n 형 실리콘 시료에 조사를 하여도 도플러 넓어짐 소멸 측정의 S-변수 값에 큰 변화가 없다고 하지만 동시 계수 양전

자 소멸로 측정된 본 실험에서는 차이를 보여주고 있으며, Johnson et al. [16]의 결과에 따르면 양성자 빔 조사의 경우 Si-H의 결합의 깊이가 상대적으로 많이 증가하며, 미세 틈새 결합이 많이 나타나게 되고 주변의 전자와 소멸하는 빈도수가 증가하는 것으로 생각된다. 또한 Gupta et al. [17] 결합 모델 이론에 의하면, 운동량이 낮은 전자 입자는 결정 경계표면에 음 전하를 띤 층이 생길 것이다. 결합 경계면 근처에는 전자선에 의한 음 전하를 띤 입자가 많이 형성될 것이고, 양전자는 속도가 낮은 전자와 소멸하면서 S-변수 값이 증가할 것이다. 본 실험에서 S-변수의 각 표준 편차가 약간 차이는 있지만 일반적으로 측정된 값의 표준 편차는 10^{-4} 이다. 동시 계수 양전자 소멸 방법으로 공공, 틈새 또는 불순물 등의 결합을 알 수 있으며, Fig. 2(a)의 S-변수 값은 p형 실리콘 보다, n형 실리콘 시료가 양성자 조사량에 의한 결합을 생성시키는데 더 많이 기여함을 알 수 있다. 일반적으로 조사량이 아주 작은 경우에도 양성자 조사의 영향에 따른 결합의 변화가 나타날 수 있다. S. Fatima et al. [18]에 의하면 도핑의 종류에 의한 변화에 대하여 측정이 가능한 것으로 알려지고 있다. 운동량이 큰 에너지(513 keV 이상)에 대한 전체 스펙트럼의 비로 나타

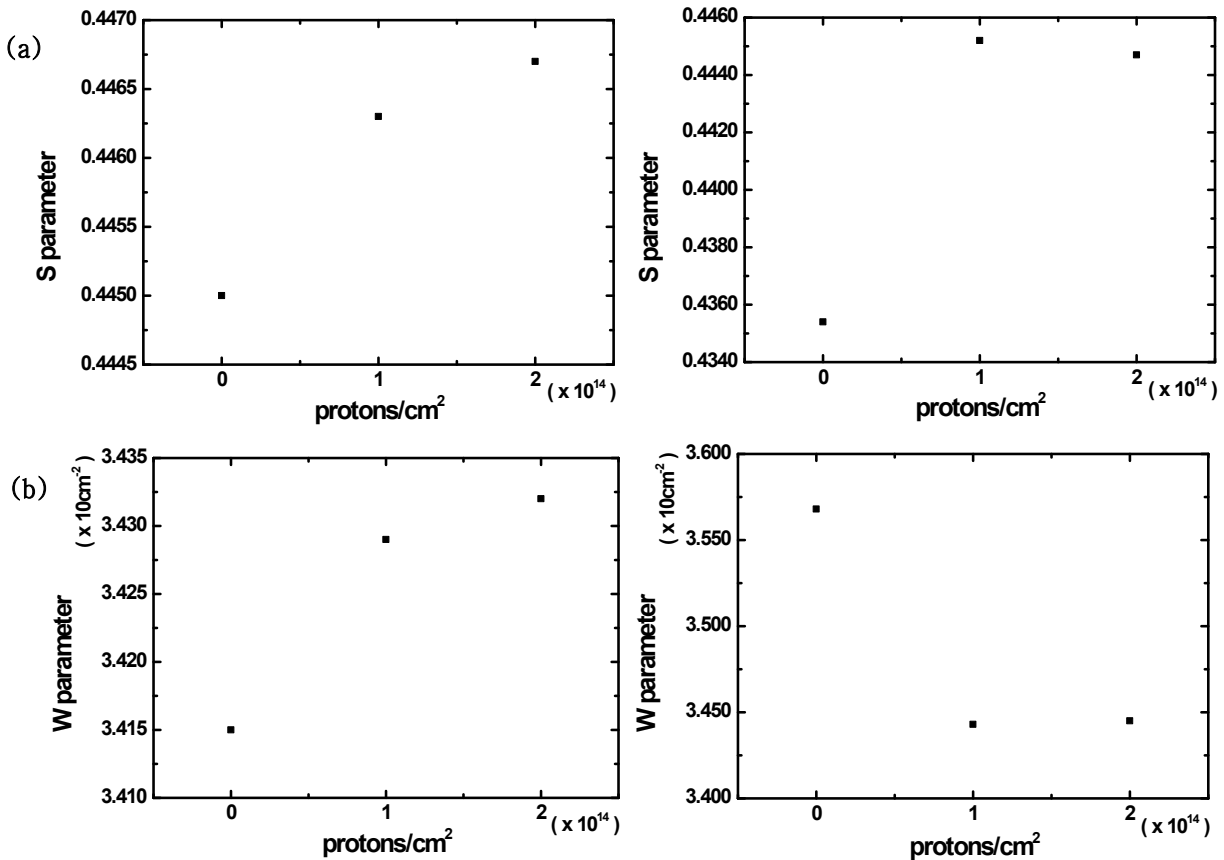


Figure 2. (a) S parameters and (b) W parameters with CDBPAS in n, p type CZ silicon film vs. various proton irradiation beam.

나는 W-변수를 사용하여 전도전자보다는 가전대 전자와 소멸률에 있어서, Fig. 2(b)의 코아 전자와 결합하여 소멸하는 W-변수 경우에 p형 실리콘은 양성자 빔의 조사에 의하여 감소하는 경향이 보였으나, n형 실리콘은 반대로 증가함을 보이고 있다. 이는 W-변수는 S-변수보다는 소멸 주변의 화학적으로 분포된 환경에 훨씬 예민하므로 p형 실리콘 시료의 경우는 붕소와 실리콘은 가전대가 달라서 양성자 빔에 의한 결합의 증가로 가전대에서 양전자 소멸률이 감소하기 때문이고, 반대로 K. Saarinen et al. [19]에 따르면 n형 실리콘 시료의 경우는 비록 작은 크기이지만 인과 실리콘의 코아 전자의 운동량은 비슷하고, 2p 전자들로서 가전대 전자가 증가하기 때문으로 여겨진다.

Fig. 3은 양성자 조사량에 따른 SRIM 시뮬레이션 결과를 보여주고 있는데, 시료의 두께가 400 μm 이상이므로 4.0 MeV를 조사한 시뮬레이션의 결과는 투과 깊이가 100 - 200 μm 사이의 경우이고, 이때 양성자 조사 시뮬레이션의 경우에는 Bragg 피크가 나타나므로 X-선 조사 [14]와

달리 에너지의 크기에 따라 일정한 투과 깊이에서 피크가 나타나는 결과를 보여주고 있다. 양전자의 열화될 때까지 투과 깊이가 100 μm 이상이므로 양성자 빔에 의한 결합을 측정할 수 있음을 보여준다. Fig. 3에서 같은 에너지의 크기라도 n형 시료가 p형 시료보다 더 깊이 투과함을 알 수 있으며 결합의 생성은 에너지의 세기보다는 양성자 빔의 조사량에 더 영향을 받는 것으로 나타난다.

IV. 결 론

본 실험에서는 동시 계수 양전자 소멸법을 이용한 양성자 조사의 에너지 변화에 따른 결합의 크기를 연구하였다. 양성자 빔을 p, n형 시료에 조사시켰을 때 S 변수 값은 같이 증가하였으나, W-변수 값이 n형 시료의 경우에 증가함을 보이는 것은 인과 실리콘의 코아 전자의 운동량은 비슷하고, 2p 전자들로서 가전대 전자가 증가하기 때문으로 생

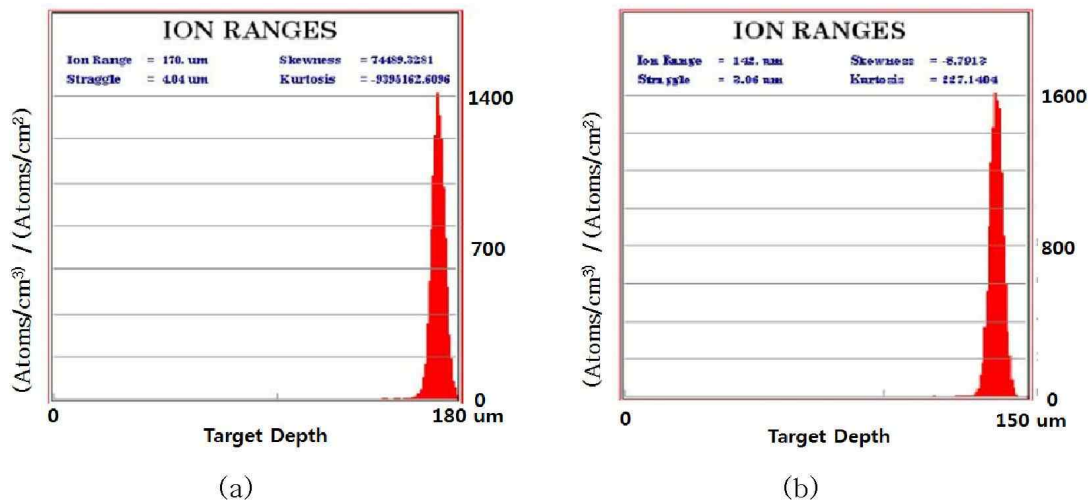


Figure 3. SRIM simulations in n, p type CZ silicon film by 4.0 MeV proton irradiation: (a) n type (b) p type each.

각된다. 양성자 조사를 하면 결함의 크기는 변화하지만 X-선 조사의 경우 에서와 같이 에너지의 변화에 따른 결함의 증가는 보이지 않는다. 그 이유는 양성자 조사의 경우에는 Bragg 피크가 생기므로 에너지의 변화에 따른 투과 깊이는 다르게 나타나지만 결함의 증가보다는 양성자 조사량에 의한 영향이 더 크기 때문이다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 한남대학교 학술 연구비 지원에 의해 수행하였습니다. 또한 원자력 의학원 가속기 이용 기술 개발팀의 사이클로트론 사용에 의한 도움을 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Teresa Oh, J. Korean Vacuum Soc. **20**, 189 (2011).
- [2] G. P. Willeke, Sol. Energ. Mater. Sol. Cell. **72**, 191 (2002).
- [3] B. J. Kang, S. Park, S. H. Lee, H. Kim, B. G. Shin, S. Kwon, J. W. Byeon, S. Yoon, and D. Kim, Korean J. Mater. Res. **20**, 617 (2010).
- [4] E. H. Molen, J. M. Oblak, and O. H. Kriege, Met. Trans. **2**, 1627 (1971).
- [5] H. E. Collins, Met. Trans. **5**, 189 (1974).
- [6] Chunqing He, M. Muramatsua, T. Ohdairaa, N. Oshimaa, A. Kinomuraa, R. Suzukia, and Y. Kobayashia, Radiation Phys. and Chem. **76**, 204 (2007).
- [7] Y. Dekhtyar, D. A. Levina, and V. S. Mikhalekov, Sov. Phys. Dokl. **9**, 492 (1964).
- [8] Y. Lee, W. N. Kang, Y. Nagai, K. Inoue, and M. Hasegawa, J. Korean Vacuum Soc. **17**, 160 (2008).
- [9] H. Kim, Y. Nagai, and C. Y. Lee, J. Korean Vacuum Soc. **18**, 447 (2009).
- [10] G. Lynn, J. E. Dickman, W. L. Brown, and M. F. Robbins, Phy. Rev. B **20**, 3566 (1978).
- [11] S. Dannefaer, P. Mascher, and D. Kerr, J. Appl. Phys. **73**, 3740 (1993).
- [12] Z. Jin, G. Niu, J. D. Cressler, C. J. Marshall, P. W. Marshall, H. S. Kim, R. A. Reed, and D. L. Hareme, Nuclear Science IEEE Transactions **48**, 2244 (2001).
- [13] L. S. Vlasenko, M. P. Vlasenko, V. A. Kozlov, and V. V. Kozlovskii, Semiconductors **33**, 1059 (1999).
- [14] J. G. Shin, C. Y. Lee, S. H. Bae, J. H. Kim, and J. H. Kwon, Korean J. Mater. Res. **18**, 427 (2008).
- [15] J. J. Kelly and R. M. Lambrecht, Phys. Lett. A **60**, 475 (1977).
- [16] N. M. Johnson, F. A. Ponce, R. A. Street, and R. J. Nemanich, Phys. Rev. B **35**, 4166 (1987).
- [17] K. Gupta and W. G. Carlson, J. Mater. Sci. **20**,

- 3487 (1987).
- [18] S. Fatima, B. G. Svensson, C. Jagadish, Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices Proceedings, Conference on **154** (1996).
- [19] K. Saarinen, J. Nissila, H. Kauppinen, M. Hakala, M. J. Puska, P. Hautajarvi, and C. Corbel, Phys. Rev. Lett. **82**, 1883 (1999).

Proton Irradiated Cz-Si by the Coincidence Doppler Broadening Positron Annihilation Spectroscopy

K. H. Lee and C. Y. Lee*

Department of Physics, Hannam University, Daejeon 306-791

(Received July 19, 2011, Revised August 16, 2011, Accepted August 17, 2011)

It is described that the proton beam induces micro defects and electronic deep levels in Cz single crystal silicon. Enhance signal-to-noise ratio, Coincidence Doppler Broadening Positron Annihilation Spectroscopy has been applied to study of characteristics of p type and n type silicon samples. In this investigation the numerical analysis of the Doppler spectra was employed to the determination of the shape parameter, S, defined as the ratio between the amount of counts in a central portion of the spectrum and the total counts of whole spectrum. The samples were exposed by 4.0 MeV proton beams ranging from 0 to $\sim 10^{14}$ ptls. The S-parameter values were increased as increasing the irradiated proton beam, that indicated the defects generate more.

Keywords : Proton beam, S-parameter, W-parameter, Coincidence Doppler broadening positron annihilation spectroscopy, Cz-Si

* [E-mail] cylee@mail.hannam.ac.kr