

BP-Si구조를 이용한 다이오드 및 Photo Cell의 제작에 관한 연구

(Studies on Fabrication of Diodes and Photo Cell Using BP-Si Structure)

洪 淳 寬*, 卜 殷 慶*, 金 鐵 柱**

(Soon Kwan Hong, Eun Kyung Bock and Chul Ju Kim)

要 約

BP-Si 구조를 이용하여 homo, hetero-junction 다이오드를 제작하였고, Si 기판을 제거한 후, 전기 분해법으로 얻은 BP bulk 위에 쇼트키 다이오드를 제작하였다. 제작된 다이오드는 전류-전압 특성으로 그 성능을 평가하였다. Sb를 전극으로 이용한 쇼트키 다이오드는 문턱전압(cut-in)이 0.33V로 Si에 제작된 경우와 거의 같았으며 내압은 30V였다.

Photo cell의 window로 BP를 이용하면 변환효율이 6.5%에서 8.3%로 증가되었으며 BP의 광투과도는 단파장 영역에서 급격히 증가하였다.

Abstract

The homo and hetero-junction diodes were fabricated using BP-Si structure. After removal of Si substrates, schottky diodes were fabricated on the BP bulk. The electrical properties of the diode were examined through current-voltage characteristic curve. The schottky diode with Sb electrode has a cut-in voltage of 0.33V. This value is almost equal to that of the typical schottky diodes. The breakdown voltage of the schottky diode is 30V.

When BP was used for photo cell as a window, the conversion efficiency improved from 6.5% to 8.3%, and optical transmissivity of BP increased in short wavelength region.

I. 序 論

Si 기판 위에 CVD(chemical vapor deposition)에 의하여 BP(boron monophosphide)를 성장시키는 방

법은 이미 발표된 바 있다.^{1)~3)} BP는 III~V족 화합물 중에서는 잘 알려져 있지 않은 재료이나 재결정화와 같은 처리과정이 필요없이 단결정 Si를 그 위에 성장시킬 수 있으며 열처리에 의하여 저항률이 $10^8 \sim 10^{12} \Omega \text{cm}$ 정도인 절연체로 될 수 있으므로 3차원 집적화를 위한 SOI 구조에 유용한 재료로 제안되고 있다.⁴⁾ 본 연구에서는 BP로서 소자를 제작하고 그 전기적인 특성을 평가하여 BP만을 이용한 3차

*準會員, **正會員, 서울시立大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Seoul City Univ.)
接受日字: 1988年 3月 2日

원 집적화의 가능성을 보이고자 한다.

BP는 Si 기판 위에 단결정으로 성장될 수 있으며 950°C에서는 n형의 BP로 성장되고, 1,080°C에서는 p형으로 성장되며, 반응 가스인 B_2H_6 와 PH_3 의 유량은 각각 20cc/min, 500cc/min이다. 그러나 반응가스의 유량을 달리하면 1,080°C에서도 n형 BP를 성장시킬 수 있다.¹⁵⁾ BP의 energy gap은 2.0eV로서 GaP (2.25eV), AlAs (2.16eV) 등과 비슷하며 광소자로서의 응용이 가능하다는 사실이 보고되어 있다.^{16~18)} 그러나 이론적인 연구만이 이루어졌을 뿐 실제로는 결정성이 완전한 BP를 얻을 수 없어서 실현하기 어려웠다.

본 연구에서는 결정성이 보인 단결정 BP를 성장시켜 homo, hetero-junction 다이오드와 쇼트키 다이오드를 제작하여 그 전기적인 특성을 전류-전압 곡선으로 평가하였다. 또한 단결정 n-BP를 window로서 성장시킨 n-BP/n-epi-Si/p-Si 구조에 photo cell을 제작하여 광특성을 조사하고 BP window로 인한 변환효율의 변화를 평가하였으며, BP/Si 구조에 텅스텐 램프의 단색광을 照射한 후, 광전효과(photo-voltaic effect)에 의한 광전압을 측정하여 파장에 따른 BP의 광투과도의 변화를 관찰하였다.

II. 다이오드 및 Photo Cell의 製作

그림 1에 본 실험에 사용된 에피택시 장치의 개략도를 보였다. 웨이퍼의 가열대는 SiC가 코팅된 흑연(graphite)을 사용하였고, 그 위에 기판으로 사용할 Si 웨이퍼를 놓은 후 석영관 속에 넣는다.

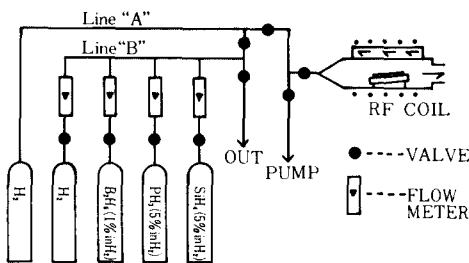


그림 1. 에피택시를 위한 실험장치도

Fig. 1. Experimental apparatus for epitaxial growth.

다이오드 제작에 사용된 기판은 저항률이 1~2Ωcm 인 (100) Si 웨이퍼이다. Si 기판을 가열하기 위한 RF generator는 자체 제작한 것으로 400KHz, 3KW

의 출력정격을 갖는다.¹⁹⁾ 석영관의 윗쪽은 냉각을 위한 수냉장치로 되어 있으며 웨이퍼의 온도는 pyrometer를 이용하여 측정하였다. 수소 캐리어 가스는 2개의 분리된 배관경로를 통하여 공급된다. 그림 1의 "A"로 표시된 경로는 수소 분위기에서의 예열처리를 통하여 Si 기판에 존재하는 오염을 제거하거나 성장온도로 기판을 setting하는데 사용되며 이때 "B"로 표시된 경로를 이용하여 반응가스의 유량을 사전에 정확히 조절할 수 있다.

BP를 성장시키기 위하여 950°C에서 1% B_2H_6 를 20cc/min, 5% PH_3 를 500cc/min 흘렸다. 이때 BP의 성장률은 50nm/min이며 저항률이 0.01Ωcm인 n-BP가 성장되었다. 반응 가스들의 유량을 그대로 유지하면서 온도를 1,080°C로 높이면 p-BP가 성장되며 성장률은 마찬가지로 50nm/min이다. 이때 BP의 저항률은 0.1Ωcm였다.

그림 2의 a)는 Si기판에 50μm의 두께로 성장시킨 n-BP를 전기분해법¹⁰⁾으로 분리한 후, BP를 기판

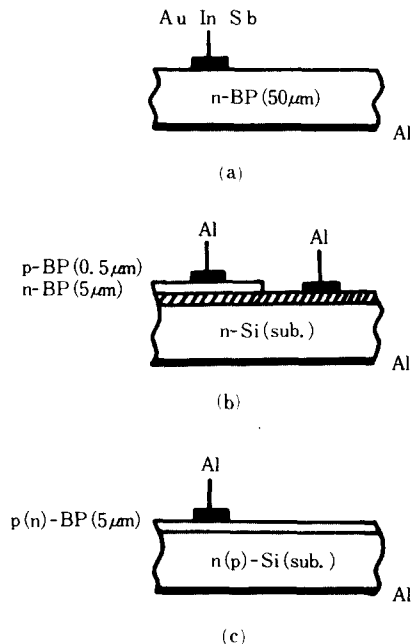


그림 2. 제작된 다이오드의 단면도

- (a) 쇼트키 다이오드
- (b) Homo-junction 다이오드
- (c) Hetero-junction 다이오드

Fig. 2. Cross-section of fabricated diodes.

- (a) Schottky diode.
- (b) Homo-junction diode.
- (c) Hetero-junction diode.

으로 하여 제작된 쇼트키 다이오드의 단면도이다. 전극은 Au, In, Sb 등의 금속을 직경 0.6mm인 원형으로 증착에 의한 스크린 프린팅(screen printing)을 이용하여 구성하였다. 그림 2의 b)는 p-n-BP/n-Si 구조의 homo-junction 다이오드의 단면도이다. 성장시킨 BP층의 두께는 p-BP가 0.5 μ m이고 n-BP는 5 μ m이며 이와 같은 조건에서 가장 우수한 전류-전압 특성을 얻을 수 있었다. 그림 2의 c)는 p-BP/n-Si(n-BP/p-Si) 구조를 갖는 hetero-junction 다이오드의 단면도를 나타내며 BP층의 두께는 공히 5 μ m이다.

그림 2의 a)와 b)에 보인 다이오드는 직경 0.6mm인 원형으로 Al을 소자의 윗면에 증착하여 전극으로 만들었고, 뒷면은 전체에 Al을 증착하여 GND 전극으로 하였다.

그림 3은 p형의 Si기판 위에 n형의 epi-Si를 1 μ m 두께로 성장시키고 그 위에 n-BP의 window를 성장시켜 제작한 photo cell의 단면도이다. 성장시킨 epi-Si의 저항률은 0.8 $\times 10^{-3}\Omega$ cm 정도이며 n-BP의 두께는 2 μ m이다. 전극은 Al을 직경 200 μ m의 원형으로 증착하여 사용하였으며 제작된 소자의 크기는 1mm \times 1mm이다.

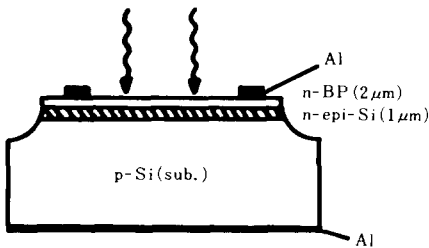


그림 3. Photo cell의 단면도
Fig. 3. Cross-section of photo cell.

Photo cell의 Voc(open circuit voltage)와 Isc(short circuit current)를 측정하여 BP window를 제거한 경우와 변환효율을 비교하였다. 텅스텐광의 파장에 따른 BP층의 광투과도의 변화를 측정하기 위하여 5 μ m의 두께로 단결정 BP를 Si 기판 위에 성장시켜 n-BP/p⁺-Si, p-BP/n⁻Si의 hetero-junction 구조를 갖는 photo cell을 각각 제작하였다. 이들 photo cell로부터 측정되는 광전압의 변화를 통하여 BP 층이 갖는 파장에 따른 광투과도를 알아 보았다.

III. 결과 및 고찰

1. 다이오드의 特性評價

그림 4는 Au, In, Sb의 각각 다른 전극을 증착시킨 쇼트키 다이오드에 순방향과 역방향의 전압을 인가하여 얻어진 전압-전류 특성이다. Au와 In을 전극으로 사용한 경우, 전극과 n-BP 사이에는 저항성 접촉(ohmic contact)이 이루어져 그림 4에 보인 것과 같이 거의 동일한 순방향과 역방향 특성이 나타난다. 반면에 Sb를 전극으로 사용한 경우에는 우수한 순방향과 역방향 특성을 얻을 수 있으며 이는 Sb 전극과 n-BP 사이에 쇼트키장벽 접촉(schottky barrier contact)이 이루어진 결과로 생각된다.

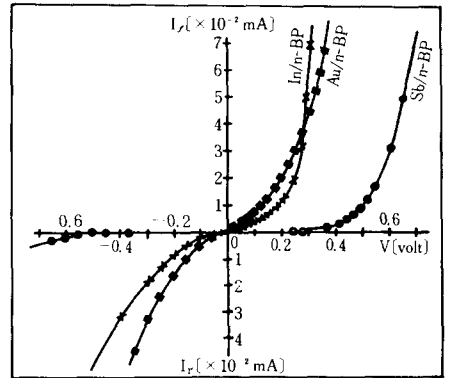


그림 4. BP를 기판으로 한 쇼트키 다이오드의 전류-전압 특성
Fig. 4. I - V characteristic of schottky diodes using BP bulk as a substrate.

일반적으로 Si를 기판으로 하여 제작되는 쇼트키 다이오드의 순방향 문턱전압은 0.3V이며, Sb를 전극으로 사용하면 문턱전압은 0.33V 정도이므로 이로부터 BP를 기판으로 하여 제작된 쇼트키 다이오드도 Si를 기판으로 사용한 경우와 비슷한 특성을 갖고 있음을 알 수 있다. 그림 5는 Sb/n-BP 구조의 접합용량의 변화를 인가전압과 비교하여 보인 그래프이다. 인가전압이 0일때, 접합용량(1/C²)은 0.8 $\times 10^{10}F^{-2}cm^4$ 이다. 이 값은 Si 구조의 공간전하층 용량에 비해서는 작은 값이나 쇼트키 다이오드의 동작에 영향을 주지는 않았다.

그림 6은 p-n-BP/n-Si 구조의 homo-junction 다이오드와 BP/Si의 hetero-junction 다이오드의 전류-전압 특성을 비교하여 보인 것이다. homo-junction

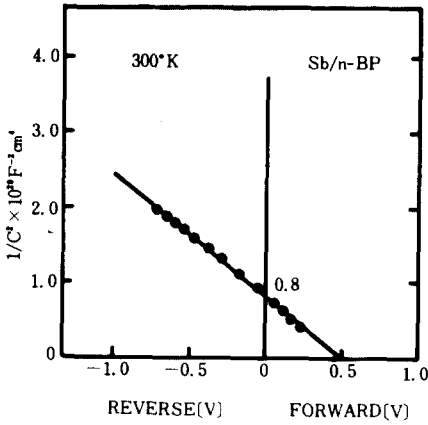


그림 5. 쇼트키 다이오드(Sb/n-BP)의 인가전압에 대한 접합용량의 변화

Fig. 5. Capacitance of schottky diode(Sb/n-BP) versus applied bias voltage.

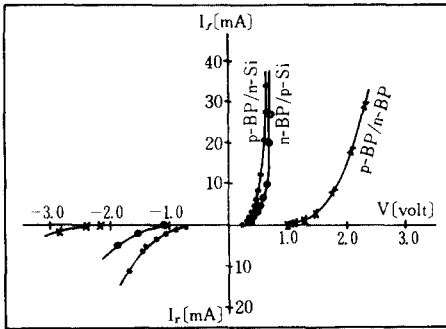


그림 6. Homo와 Hetero-junction 다이오드의 전류-전압 특성

Fig. 6. I - V characteristic of Homo and Hetero-junction diode.

다이오드는 p-BP층과 n-BP층의 두께를 각각 0.5 μ m와 5 μ m로 할 때 가장 우수한 특성을 얻었으며 역방향 내압은 30V 정도였다. 문턱전압은 약 1.3V로 Si를 기판으로 한 접합 다이오드 보다는 다소 높았다.

P-BP/n-Si와 n-BP/p-Si 구조의 hetero-junction 다이오드는 어느 구조나 비슷한 전류-전압 특성을 보였으며 내압은 마찬가지로 30V 정도였다. 문턱전압은 0.3~0.4V로서 homo-junction 다이오드보다 순방향 특성은 우수하지만 그림 6에 보인 바와 같이 역방향 특성은 뒤떨어진다. 이와같은 특성의 차이는

접합의 경계면에 형성되는 공핍층의 영향 때문이다. 즉, hetero-junction 다이오드의 공핍층 용량이 homo-junction 다이오드보다 작기 때문에 순방향 특성은 우수하지만, 상대적으로 역방향 특성은 뒤떨어지게 된다. 그림 4와 그림 6을 비교해 보면 쇼트키 다이오드가 homo, hetero-junction 다이오드에 비하여 순방향 특성은 우수하지만 역방향 특성은 뒤떨어지는 것을 알 수 있다. 이러한 특성도 역시 금속과 반도체 사이에 형성되는 쇼트키 장벽의 접합용량이 p, n 접합보다 그 값이 작기 때문이다.

이상의 결과로부터 Si 위에 성장시킨 단결정 BP를 이용하여 제작된 다이오드는 좋은 정류성을 나타내며, BP bulk만으로도 소자의 제작이 가능함을 알 수 있다.

IV. Photo Cell의 光特性

그림 3에서 보인 n-BP/n-epi-Si/p-Si 구조를 가진 photo cell(시료 A)에 태양광을 照射하여 측정된 Voc, Isc, 변환효율을 n-BP층을 제거한 경우(시료 B)와 비교하여 표 1에 보였다.

표 1. Photo cell의 BP window의 유무에 따른 Voc, Isc, 효율의 비교

Table 1. The comparison of Voc, Isc, and conversion efficiency of photo cell (with, without BP window).

시 료	Voc[mV]	Isc[mA/cm²]	효율(%)
시료(A) : n-BP on n-BP/n-epi-Si/p-Si	520	26	8.3
시료(B) : n-BP off n-epi-Si/p-Si	520	20.4	6.5

표 1의 시료 A)는 1 μ m의 n형 확산층을 가지며 2 μ m의 BP막을 window로 성장시킨 구조이며, 시료 B)는 Si의 n, p 접합 photo cell로서 확산깊이는 같으며 반사 방지막을 사용하지 않은 것이다. A)와 B)의 시료를 비교하여 보면 개방전압 Voc는 차이가 없으나 단락전류 Isc는 30% 정도 증가함을 알 수 있다. Si에서는 입사광의 70% 정도가 흡수되고 30%는 반사되는 반면 BP를 통하여 광을 입사한 경우는 10% 정도가 표면에서 반사될 뿐 90% 이상이 흡수되었다. 따라서 BP를 통하여 흡수된 빛은 Si만으로

제작된 경우보다 $90/70=1.3$ 배 정도의 광자가 전자-정공쌍의 생성에 기여함을 알 수 있다. 이로 부터 BP도 현재 Si의 photo cell에서 반사 방지막으로 사용되는 SiO_2 등과 같은 역할을 할 수 있음을 알 수 있다.

$\text{n-BP/p}^+\text{-Si}$ 구조와 $\text{p-BP/n}^+\text{-Si}$ 구조의 광전압을 텅스텐 램프의 단색광을 광원으로 하여 측정하였다. 그림 7은 이들 구조의 광전효과에 의한 광전압 spectrum을 나타낸 것이다. 단파장 영역에서 spectrum이 급격히 변화하며 $\text{p-BP/n}^+\text{-Si}$ 구조는 텅스텐 램프의 파장이 610nm일때 최대의 광전압을 나타내었고 $\text{n-BP/p}^+\text{-Si}$ 구조는 550nm일때 광전압이 최대였다. $\text{n-BP/p}^+\text{-Si}$ 구조가 더 급격한 광전압의 변화를 보이고 있으며 이는 n-BP 의 광투과도가 단파장 영역에서 더 급격히 증가하기 때문으로 생각된다. 따라서 그림 3에 보인 바 있는 n-BP 층을 window로 이용한 photo cell에서 높은 광효율이 나타난 것으로 생각된다.

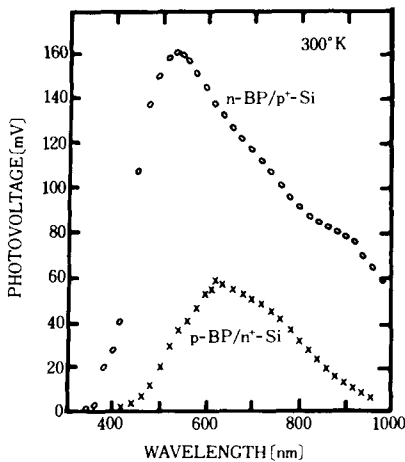


그림 7. Photo cell의 파장에 대한 광전압의 변화
Fig. 7. Photovoltage of photo cell versus wavelength.

V. 結 論

Si 기판 위에 성장시킨 단결정 BP를 이용하여 쇼트키 다이오드와 homo, hetero-junction 다이오드를 제작하여 이들의 전류-전압 특성을 측정하였다. 그 결과는, BP를 bulk로 하거나, 혹은 BP를 Si 기판에 성장시켜 소자를 제작하여도 Si만으로 제작된 소자에 비견할 만한 특성이 나타남을 보여주며 이로부터 BP를 이용한 소자의 제작이 가능함을 확인할 수 있었다.

BP/Si 구조의 photo cell을 제작하여 그 광전압을 측정하므로써 BP가 반사 방지막으로 작용하며, $\text{n-BP/p}^+\text{-Si}$ 구조는 단파장 영역에서 광투과도가 급격히 증가되어 $\text{p-BP/n}^+\text{-Si}$ 구조보다 큰 광전압을 나타내었다. 따라서 n-BP 를 photo cell의 window로 사용한 경우, 사용하지 않았을 때의 6.5% 보다 개선된 8.3%의 광효율을 얻을 수 있었다.

參 考 文 獻

- [1] R.A. Burmester & P.E. Green, "Investigation of the Boronphosphide System," AFAL-TR-67-12, Contract No. AF 33 615 2001, p. 103, 1967
- [2] K. Shono, M. Takigawa & T. Nakada, "Epitaxial Growth of BP Compounds on Si Substrates using the $\text{B}_2\text{H}_6\text{-PH}_3\text{-H}_2$ System," J. Crystal Growth, 24/25, pp. 193-196, 1974.
- [3] Y. Hirai & K. Chono, "Crystalline Properties of BP Epitaxially Grown on Si Substrates using $\text{B}_2\text{H}_6\text{-PH}_3\text{-H}_2$ System," J. Crystal Growth, vol. 41, pp. 124-132, 1977.
- [4] B.K. Ju, S.R. Rho & C.J. Kim, "Fabrication of Diodes using Si-iBP-Si Structure as a SOI," J. of KPS., vol. 4, no. 20, pp. 373-377, 1987.
- [5] B.K. Ju, J.H. Kim, & C.J. Kim, "Crystal Growth of Si and BP on Si Substrates using $\text{B}_2\text{H}_6\text{-PH}_3\text{-H}_2$ System," 1986 Seoul Intern. Sympo. on the Phys. of Semicon. & Appl., C-6, Aug. 25-26, 1986.
- [6] R.A. Burmester and R.E. Greene, "Optical Properties of BP," Bull. Amer. Phys. Soc., vol. 10, p. 1184, 1965.
- [7] C.C. Wang, M. Cardona & A.G. Fisher, "Preparation, Optical Properties and Band Structure of Boron Monophosphide," RCA Rev., vol. 25, pp. 159-167, 1964.
- [8] R.J. Archer, R.Y. Koyama & E.E. Loebner, "Optical Absorption, Electroluminescence and the Band Gap of BP," Phys. Rev. Lett., vol. 12, pp. 538-540, 1964.
- [9] J.H. Kim, C.J. Kim, "Fabrication and Evaluation of CVD System using R.F. Generator," Proc. KITE Fall Conference 85, vol. 8, 1985. (in Korean)
- [10] M. Takigawa, T. Satoh, and K. Shono, "Selective Removal of BP from Si Substrates," J. Electrochem. Soc., vol. 122, no. 6, 1975. *

 著 者 紹 介



洪 淳 寬(準會員)

1963年 7月 1日生. 1987年 2月
서울시립대학교 전자공학과 졸업.
현재 서울시립대학교 대학원 전자
공학과 석사과정재학중. 주관심분
야는 고체물리, 3차원 IC등임.



金 鐵 柱(正會員)

1947年 2月 3日生. 1973年 2月
한양대학교 전기공학과 졸업. 1979
年 일본 Sophia대학 고체물리연구
실 연구원. 1981年 일본 Tokai 대
학원 전자공학과(M.E). 1984年
Tokai 대학원 반도체공학 박사학
위 취득. 현재 서울시립대학교 전자공학과 조교수.
주관심분야는 집적회로, 고체물리, CAD등임



卜 殷 慶(準會員)

1966年 5月 17日生. 1988年 2月
서울시립대학교 전자공학과 졸업.
현재 서울시립대학교 대학원 전자
공학과 석사과정재학중. 주관심분
야는 화합물 반도체, 소자물성등
임.