

Shorted anode p-i-n 스위칭 소자의 전기적 특성

이 성 재
대림전문대학

민 남 기
고려대학교

Electrical Characteristics of Shorted Anode P-I-N Switches

Seong Jae Lee
Dae Lim College

Nam Ki Min
Korea University

Abstract- This paper describes the structure and electrical characteristics of a shorted anode p-i-n switch. The device showed a significant improvement in the threshold voltage-to-holding voltage ratio, which is due to the suppression of the hole injection from the anode and to the gold gettering at the anode side. The shorted anode devices with a 100 μm channel length have a threshold voltage of 300 volts and a holding voltage of 5.5 volts.

2. Shorted anode 의 동작원리

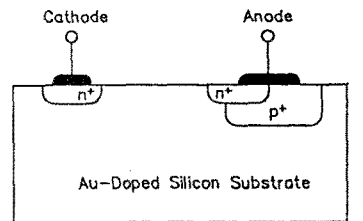
그림 1은 본 논문에서 제시하는 shorted anode p-i-n 소자의 기본 구조와 i-영역의 에너지 밴드를 나타낸다. p⁺ 애노드의 표면에 형성된 P-doped n⁺ 영역에 의해서 애노드는 i-영역과 단락된다. deep impurity로는 금(Au)을 사용하였다. 금은 실리콘의 에너지 갭 중간 부근에 억셉터 준위를 형성하며, 이것은 매우 유효한 재결합 중심으로 작용한다. shallow donor는 열평형 상태에서 금 억셉터에 보상전자를 제공할 뿐 재결합 및 전기 전도에는 기여하지 않는 것으로 가정한다. 보상 전자로 채워진 억셉터는 부(-)로 대전되므로 정공에 대한 포획 단면적은 전자에 대한 포획 단면적 보다 훨씬 크다. 이것은 열평형 상태에서 전자의 수명이 정공의 수명보다 훨씬 큼을 의미한다.

1. 서론

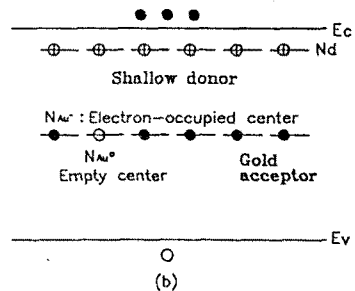
고저항 반도체에서 이중주입 현상(double injection)은 과거 30여년 동안 이론적으로나 실험적으로 광범위하게 연구되었다[1-5]. 초기에는 주로 전류-전압 특성, 스위칭 전압 (V_{th}), 호울딩 전압 (V_h), 플라즈마 발생 등과 같은 이중주입 현상의 기본적인 성질들을 구명하는데 연구가 집중되었으나, 1980년 Kapoor와 Henderson[4]에 의해서 집적회로 기술을 이용한 플레나 구조의 deep impurity double injection [(DI)²] 스위칭 소자가 처음으로 개발된 이래, injection 게이트[4]-[6], MOS 게이트[5]와 같은 제어 게이트에 의해 소자의 스위칭 특성을 제어할 수 있게 되어 이 소자를 실용화하기 위한 다각적인 노력이 진행되고 있다.

p-i-n 소자에서 스위칭 전압과 호울딩 전압은 모두 채널길이의 자승 (L^2) 과 deep impurity 농도 (N_R)에 비례하기 때문에 V_{th} 와 V_h 를 독립적으로 제어할 수 없다. 따라서, 종래의 p-i-n 소자에서는 두 파라미터 L 과 N_R 를 최적화시키더라도 V_{th}/V_h 비를 증가시킬 수가 없으며, 스위칭 전압이 높은 소자에서는 호울딩 전압도 동시에 증가하여 턴 온 상태에서 소비전력이 매우 커지는 문제점을 극복하지 못하고 있다.

본 논문에서는 V_{th}/V_h 비를 향상시키기 위해, Boron-doped anode 주위에 Phosphorus-doped n⁺영역을 형성하여 p⁺-i 접합을 단락시킨 shorted anode p-i-n 스위칭 소자를 제작하고 그 전기적 특성을 고찰하였다.



(a)



(b)

그림 1 제안된 (a)shorted anode p-i-n 소자의 구조와 (b)i-영역의 에너지 밴드.

그림 2는 shorted anode 와 종래의 전극을 갖는 소자의 턴온 과정을 비교해서 나타낸 것이다. p-i-n 소자에 순방향 바이어스를 인가하면, 매우 낮은 바이어스 전압에서 주입 전자와 정공의 농도는 열평형 상태치에 비하여 무시할 정도로 작으므로 소자에 흐르는 전류는 열적으로 발생된 전자와 정공으로 구성된다. 인가 전압이 증가함에 따라 주입 전자는 양극을 향해 i-영역 내부로 이동한다. 그러나 부로 대전된 금 억셉터는 정공에 대해 매우 큰 포획 단면적을 가지므로 주입된 정공의 대부분은 억셉터에 의해 포획되어 i-영역(채널) 내부로 주입되지 못한다. 즉 금 억셉터 센터는 정공 주입에 대한 장벽으로 작용한다. 이와 같이 전자의 농도는 열평형 상태치보다 증가하나, 정공의 농도는 열평형 상태치에 머무르게 된다. 그러므로 소자에는 주로 음극으로부터의 주입전자에 기인하여 인가 전압의 자승($J \propto V^2$)에 비례하는 공간전하제한전류(space-charge-limited current)가 흐른다. 바이어스 전압이 더욱 증가하면 정공의 주입도 증가하고, 이에 수반하여 정공 수명도 증가한다. 주입 정공의 수명 시간이 전극간 주행 시간과 같아지면 채널을 통과하여 음극에 도달한다. 이 시점에서 소자에 흐르는 전류는 급증하고 양단 전압은 감소하여 결국 전기적 스위칭이 일어난다. 이상과 같이 일반적으로 (DI)²소자의 전류-전압 특성을 논할 때, 소자전류는 volume-control 이고 전극의 주입 효율은 1로 가정한다.

한편 양극이 n⁺영역에 의해 단락된 소자에 순방향 바이어스를 가하면 음극으로부터 채널 영역으로 주입되는 전자는 P-doped anode(즉 n⁺ 영역)를 통해 흘러 나간다. n⁺영역 때문에 양극으로부터 정공 주입은 전자 전류가 증가하여 상당한 전압강하가 일어날 때까지 억제되므로 정공의 주입 효율은 감소한다. 따라서, 주입된 정공의 농도가 전자의 농도와 같아질때까지 p-i-n 소자는 스위칭되지 않고 단일주입(single injection)소자와 같이 동작하게 되므로 shorted anode 소자는 종래의 소자에 비해 훨씬 더 높은 전압에서 턴온한다.

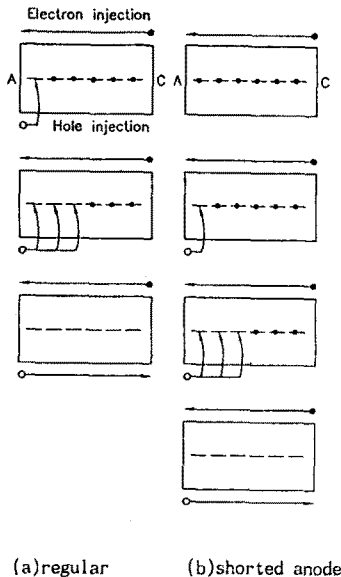


그림 2 p-i-n 소자의 턴온 과정 비교

3. 소자 제작

소자는 비저항이 6-9 Ω -cm인 n형 (100) Si 웨이퍼를 사용하여 제작하였다. 양극은 보론(B)를 1000 $^{\circ}$ C에서, 음극은 인(P)를 1000 $^{\circ}$ C에서 열확산에 의해 형성하였다. 금은 indirect 확산법에 의해서 웨이퍼의 뒷면으로 부터 확산시켰다. 즉 소자 웨이퍼와 동일한 비저항과 크기를 갖는 웨이퍼위에 금 실리카 필름을 코우팅하여 소오스 웨이퍼를 만든 후, 이 소오스 웨이퍼와 소자 웨이퍼를 1mm 간격으로 보오트에 로딩하여 1000 $^{\circ}$ C에서 1시간 확산하였다. 금 확산후 측정된 웨이퍼의 비저항은 80kohm-cm로 증가하여 i-영역이 형성됨을 확인하였다. 그림 3은 제작된 shorted anode구조를 나타낸 것이고, 이들의 채널길이, 단락영역의 크기는 표-1과 같다.

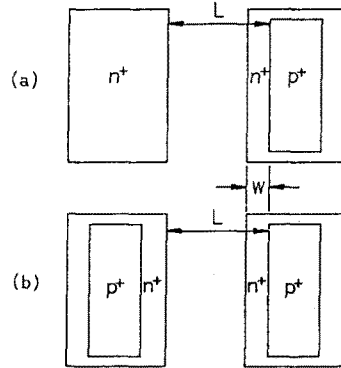


그림 3 제작된 소자의 전극 구조

표-1 소자의 기하학적 구조

소자	L (μ m)	W (μ m)	전극구조
AS1	100	12.5	그림3(a)
AS2	100	25	
ACS1	100	12.5	그림3(b)
ACS2	75	25	그림3(b)
ACS3	100	25	
ACS4	125	25	
D	100		종래구조

4. 소자특성

그림 4는 애노드만을 n⁺로 단락시킨 소자AS1과 AS2의 대표적인 전류-전압특성을 나타낸다. AS1의 스위칭 전압은 285V로 AS2의 225V 보다 60V 만큼 더 높다. 그러나 AS1의 호울딩 전압은 5.5V, AS2는 7V로, AS1의 호울딩 전압이 AS2보다 1.5V 더 낮았다.

그림 5는 I-V특성을 point 측정한 것으로 이것으로부터 계산된 AS1의 직렬저항값은 0.22 M Ω , AC2는 0.15M Ω 를 나타낸다. 소자사이의 저항비는 AS1 : AS2 : D = 1.46:1.00:4.20이었다.

만약 전극이 금 확산과정에 아무런 영향을 미치지 않으며, 또 채널영역에서 금의 농도가 균일하다고 가정하면 저항은 conducting channel의 길이에 비례할 것이다. AS1은 87.5 μ m의 conducting channel를 가지며, AS2는 75 μ m, D는 100 μ m이므로 저항비는 AC1:AC2:D=1.17:1.00:1.33로 되어야 한다.

위의 비교로부터 소자저항의 변화가 단순히 기하학적 치수의 차이만이 아니라는 결론을 얻을 수 있다. 이것은 아마도 P-doped 영역에 의한 gold gettering 효과에 기인하는 것으로 생각된다. 단락영역 길이 W 가 감소함에 따라, gold gettering은 덜 일어나며, 따라서 채널 저항도 증가한다.

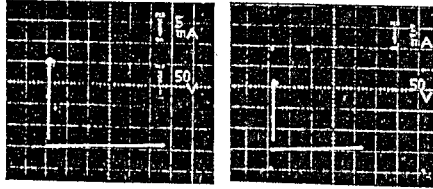


그림 4 소자 AS1과 AS2의 전류-전압 특성

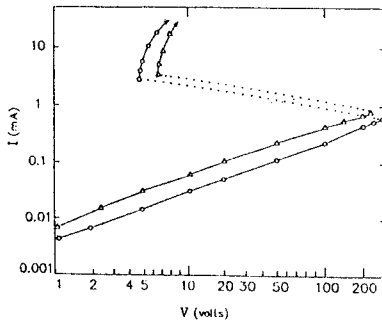


그림 5 소자 AS1과 AS2의 전류-전압특성(point by point 측정)

소자 ACS1은 그림(b)에 나타낸 것과 같이 애노드와 캐소드가 모두 단락된 p-i-n 소자로, 채널길이는 $100\mu\text{m}$, W 는 $12.5\mu\text{m}$ 이다. 그러나, 두 전극사이의 실제 거리는 $87.5\mu\text{m}$ 이다. 측정된 직렬저항은 $0.21\text{M}\Omega$ 이었으며, 소자 ACS1의 직렬저항과 거의 같았다. 소자 ACS1은 양극과 음극구조가 완전히 대칭적이기 때문에 그림 6에서 볼 수 있는 바와 같이 양방향으로 스위칭한다. 서로 다른 스위칭 전압이 요구되는 경우에는 단순히 어느 한 전극의 W 를 조정하면 두 극성에 대해서 두개의 서로 다른 유효 채널길이를 갖게할 수 있다.

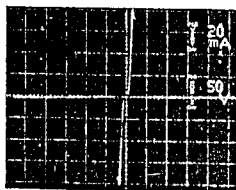
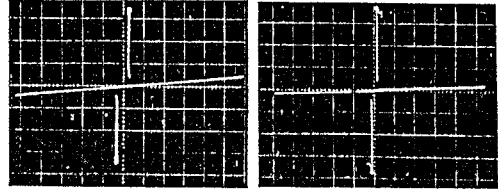
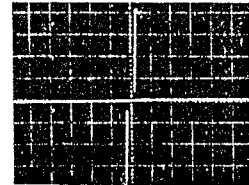


그림 6 소자 ACS1의 전류-전압 특성

소자 ACS2, ACS3, ACS4는 모두 $25\mu\text{m}$ 의 단락영역을 갖지만 채널길이는 각각 $74\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$, $125\mu\text{m}$ 이다. 그림 7은 각 소자의 전류-전압 특성을 나타낸다. 세 소자의 직렬 저항은 각각 $30\text{k}\Omega$, $0.36\text{M}\Omega$, $0.63\text{M}\Omega$ 이다. 한편, 각 소자의 전극간 거리의 비를 계산해 보면 2:3:4 인데, 이것은 저항비 1:13:21 보다 훨씬 작음을 알 수 있다. 이것으로부터 두 단락영역이 가까워지면 gold gettering이 증가한다고 생각할 수 있다.



(a)ACS2 (b)ACS3



(c)ACS4

V: 5mA/div
H: 50V/div

그림 7 소자 ACS2, ACS3, ACS4의 전류-전압 특성

5. 결론

종래의 $(DI)^2$ p-i-n 스위칭 소자는 스위칭 전압과 호울딩 전압의 비가 매우 작은 단점을 갖고 있다. 본 논문에서는 V_{th}/V_h 비를 향상시키기 위해 B-doped anode 주위에 P-doped n⁺영역을 형성하여 애노드를 단락시킨 p-i-n 스위칭 소자를 제작하고 그 전기적 특성을 고찰하였다. shorted anode에서는 p⁺-i 접합이 단락되므로 애노드-채널 접합이 일정전압에 도달하기 전까지는 애노드로부터 채널영역으로 정공 주입이 억제되어 소자는 더욱 높은 전압에서 스위칭한다. 또 정공 주입을 억제하면 채널영역에서 deep impurity 농도를 감소시킬 수 있어 스위칭 후 호울딩 전압을 낮출 수 있다. 제작한 shorted anode p-i-n 스위치는 $V_{th}=250\text{--}300\text{V}$, $V_h=5\text{--}9\text{V}$ 를 나타내었으며, 종래의 구조에 비해 V_{th}/V_h 비가 상당히 향상됨을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과는 anode shorted p-i-n 소자를 스위칭 소자 또는 광센서로 응용할 수 있는 가능성을 더욱 높여 주고 있다.

참고문헌

- [1] M.A. Lampert, "Double Injection in Insulators," Phys. Rev., Vol. 125, 1962, p. 126.
- [2] K.L. Ashley and A.G. Milnes, "Double Injection in Deep-Lying Impurity Semiconductors," J. Appl. Phys., Vol. 35, 1964, p. 369.
- [3] M.A. Lampert and P. Mark, Current Injection in Solids, Academic Press, New York, 1970.
- [4] A.K. Kapoor and Henderson, "A New Planar Injection-Gated Bulk Switching Devices Based upon Deep Impurity Trapping," IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-27, 1980, p. 1268.
- [5] J.Y. Choe et al., "Planar-Type Negative Resistance Diodes with Control MOS Gates" J. of Applied Physics, vol. 52, 1981, p. 1675.
- [6] S. Supadech, S. Okazaki, Y. Akiba, T. Kurosu and M. Iida, "Voltage-Controlled Negative Resistance in p-i-n Planar Diodes with Injection Gate," IEE Proc., Vol. 133, Pt 1, 1986, p. 1.