

## 반도체기술공정모의기 ATHENA를 리용한 이온주입 p-n이음반도체방사선검출기의 불감층두께결정

리철광, 고명선, 안정도

위대한 수령 김일성 동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《새로운 과학분야를 개척하며 최신과학기술의 성과를 인민경제에 널리 받아들이기 위한 연구사업을 전망성있게 하여야 합니다.》(《김일성전집》 제72권 292페이지)

이음형반도체방사선검출기의 하나인 이온주입p-n반도체방사선검출기는 특성이 가장 좋은 방사선측정수단으로 알려져있다.[1, 2, 4]

현재 이온주입반도체방사선검출기에 대한 연구결과들이 발표되고있지만 방사선검출기의 불감층과 관련되는 이온주입조건에 대하여서는 구체적으로 밝혀져있지 않다. 그것은 주입조건이 반도체결정의 재료적특성에 관계되기때문이다. 실례로 이온주입에너키는 10~15keV로 알려져있는데 공정모의기 ATHENA로 평가한데 의하면 1keV의 주입에너키차값은 불감층의 견지에서 볼 때 결코 작은 값이라고 할수 없다.[2] 이온주입깊이는 많은 인자들과 복잡하게 관계되므로 실험적으로 결정하기는 매우 어렵다.

론문에서는 반도체기술컴퓨터지원설계 Silvaco TCAD의 한가지 공정모의기인 ATHENA[3]를 리용하여 p-n이음반도체방사선검출기의 불감층두께를 결정하였다.

### 1. 방사선불감층에 대한 제한조건

이온주입법으로 방사선검출기를 제작하는 경우 이온주입에너키와 선량, 반도체박편의 온도 등 이온주입조건을 정확히 확정하는것은 중요한 문제로 나선다. 그것은 이온주입에너키를 비롯한 이온주입조건에 의하여 방사선불감층과 관련된 p-n이음의 깊이가 규정되기때문이다.

평면형공정기술에서 이온주입법으로 집적회로를 제작하는 경우 3극소자나 2극소자, 저항 등 모든 전자요소들이 겹면에 놓인다고 하지만 그것은 어디까지나 상대적인 의미이다. 집적회로에서 요소들이 놓이는 깊이는 보통 수  $\mu\text{m}$  이상이며 이온주입조건도 잘 알려져있다.

그러나 방사선검출기로 핵분열파편과  $\alpha$  입자, 양성자를 비롯한 제동능이 큰 대전립자와 연한X선을 측정하는 경우에는 불감층문제가 특히 중요한 문제로 제기된다. 이때 두께는 보통 100nm이하, 최소 20nm정도로 대단히 얇아야 한다.

실례로 5MeV의  $\alpha$  입자가 두께가 20nm인 금층을 통과할 때 에너키분산은 2keV정도이다. 현재 이온주입반도체검출기로 5 486keV의  $\alpha$  입자에 대하여  $\leq 10\text{keV}$ 의 에너�기 분해능을 얻고있다.[2] 이것은 리론적분해능인 6~7keV에 거의 도달한 값이다.[4] 이 값에 비하면 2keV의 에너�기분산은 결코 작은 값이라고 할수 없다. 그러므로 이온주입층을 될수록 얇고 균일하게 형성하여야 한다. 그렇다고 무한정 얇게 할수는 없다. 실례로 반도체검출기에서 전극재료로 보통 리용되는 금층의 두께가 15nm정도이면 벌써 불연속구조로 되면서 저항이 급격히 증가한다. 이온주입법으로 혼입물을 주입하는 경우에도 주입혼

입물층이 너무 얇아지면 금층과 같은 정도로 주입혼입물층 역시 불연속구조로 될뿐 아니라 p-n이음의 유효동작면적도 작아지게 된다. 이러한 사실을 고려하면 불감층과 관련되는 주입혼입물층의 최소두께를 20nm정도로 하는것이 합리적이라고 본다.

## 2. 모의문제설정

공정모의기 ATHENA는 물리적인 공정모의기이다. 물리적인 공정모의기를 리용하는 경우 다음과 같은 문제들이 설정되어야 한다.

① 모의하여야 할 초기구조의 기하학적모양이다. 기하학적모양에서는 불감층두께를 기본대상으로 한다. 방사선검출기의 경우 필요한 불감층두께는 이미 알고있으므로 이 두께를 보장하기 위한 파라메터들을 결정하여야 한다.

② 모의하여야 할 공정단계이다. 공정단계로서는 오직 불감층과 관련되는 혼입물이 온주입공정뿐이며 산화와 같은 기타 공정단계들은 평면형공정기술에서 보통 리용되는 공정단계들과 같게 설정한다.

③ 리용하여야 할 물리적모형이다. 이것이 가장 중요하다. 그것은 물리적모형에 따라 주입혼입물이온의 분포가 크게 달라지기때문이다. n형 규소반도체박편에 대한 주입이온은  $B^+$  이므로 피어슨4형분포모형을 리용하여야 한다.

④ 리용되는 반도체박편의 정수들이다. 검출기제작에 리용한 규소반도체박편의 비저항은  $2k\Omega \cdot cm$ , 기본나르개농도는  $10^{12}/cm^3$ , 나르개수명은 2ms, 결정방위는 (100)인 n형 무전위결정이다.

## 3. 모 의 결 과

이온주입p-n이음방사선검출기에서 불감층은 p-n이음의 깊이와 꼭같지는 않지만 그것과 직접 련관되어있다. 불감층은 주입에 의하여 형성된 반개혼입물농도와 반도체박편의 주개혼입물농도가 같은 점으로 정의되는 p-n이음의 깊이와 주입혼입물분포의 최대농도점사이에 놓인다.

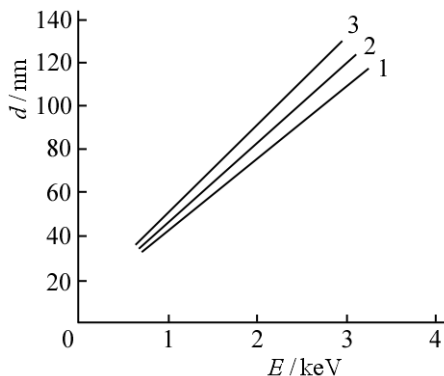


그림 1. 주입에너지에 따르는 이음깊이  
1-3은 이온주입선량이 각각  
 $10^{13}$ ,  $10^{14}$ ,  $10^{15}/cm^2$  인 경우

기본모의파라메터는 이온주입에너지, 이온주입선량, 이온주입과정에 형성된 결정결함을 제거하기 위한 열처리온도이다. 이 모든 인자들은 호상련관되어있으며 공정모의기 ATHENA에 반영되어있다. 출발박편의 정수들은 모의조건으로 들어간다.

주입에너지에 따르는 이음깊이는 그림 1과 같다.

그림 1에서 보는바와 같이 주입에너지가 증가함에 따라 이음깊이는 작은 구간에서 거의 선형적으로 증가하며 에너지가 같은 경우에도 주입선량에 따라 약간 증가한다. 그것은 혼입물분포자름면이 주입선량에 따라 넓어지기때문이다. 에너지가 1keV이고 혼입물주입선량이  $10^{14}/cm^2$  일 때 이음깊이는

47.5nm이며 혼입물분포의 최대농도점은 4nm로서 불감층은 명백히 이 구간안에 놓이게 된다. 이온주입으로 파괴된 결함을 제거하기 위한 열처리온도는 1 000°C이며 10s동안 급속열처리한다.

주입선량에 따르는 이음깊이는 그림 2와 같다.

그림 2에서 보는바와 같이 주입선량이 증가함에 따라 이음깊이는 거의 선형적으로 증가하며 주입선량이 같은 경우 주입에너지에 따라서도 증가한다. 그 원인은 그림 1의 경우와 같다.

주입선량에 따르는 혼입물분포의 최대농도는 그림 3과 같다.

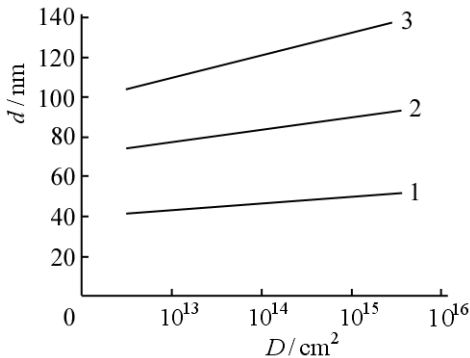


그림 2. 주입선량에 따르는 이음깊이  
1-3은 주입에너지가 각각 1, 2, 3keV인 경우

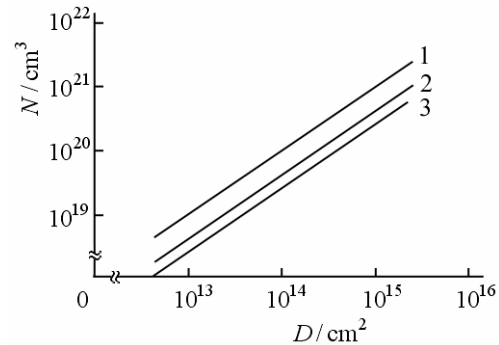


그림 3. 주입선량에 따르는 혼입물분포의 최대농도  
1-3은 주입에너지가 각각 1, 2, 3keV인 경우

그림 3에서 보는바와 같이 주입선량에 따라 최대농도점이 증가하며 선량이 같은 경우에도 에너지에 따라 최대농도가 얼마간 작아지는데 이것은 주입에너지가 커지면 혼입물분포자름면이 깊이방향으로 넓어지기때문이다.

주입선량이  $10^{14}/\text{cm}^2$  일 때 주입에너지에 따르는 혼입물분포는 그림 4와 같다.

그림 4에서 보는바와 같이 에너지가 증가함에 따라 최대농도가 약간 작아진다는 것을 알 수 있다. 여기서 중요한 것은 가우스분포모형으로 설명할 수 있는 확산혼입물분포와는 달리 혼입물농도가 이음경계에서 급격히 떨어진다는 것이다. 즉 이온주입으로 계단p-n 이음을 형성할 수 있다. 그림 4에서 주입에너지가 1keV일 때 최대농도점은 4nm이다.

결정성을 회복하기 위한 급속열처리는 800~1 000°C에서 진행하였다. 이 온도구간에서 유의성있는 차이는 나타나지 않았다. 따라서 1 000°C에서 짧은 시간동안 급속열처리하는 것이 합리적이라고 할 수 있다.

이상의 결과들로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

불감층을 대략 40nm보다 얇게 형성하는데 필요한 합리적인 주입조건은 주입에너지 1keV, 주입선량  $10^{14}/\text{cm}^2$ , 급속열처리온도 1 000°C이다. 최종적으로 정확한 불감층두께는 실험적으로 확증되어야 한다. 이 조건에서 혼입물분포는 그림 5와 같다.

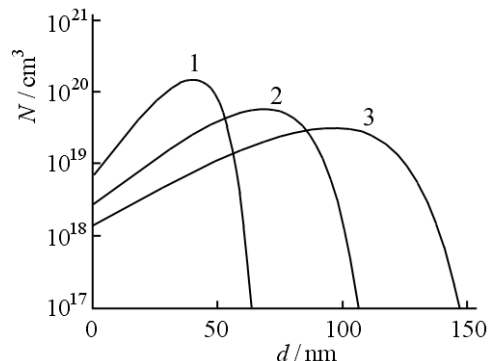


그림 4. 주입에너지에 따르는  
혼입물분포  
1-3은 주입에너지가 각각 1, 2, 3keV인 경우

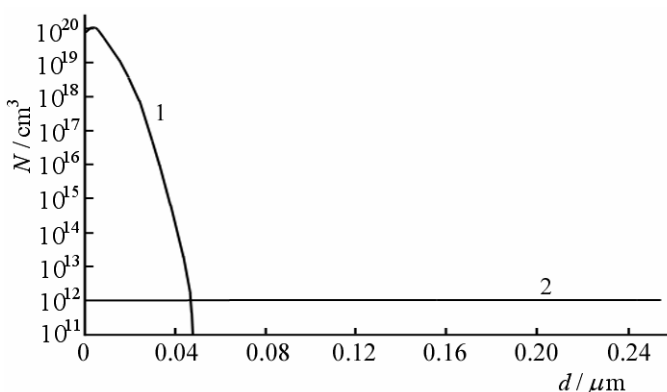


그림 5. 주개혼입물농도가  $10^{12}/\text{cm}^3$  인 n형 규소박편에 주입된 혼입물분포  
1—붕소, 2—리튬

### 맺는 말

피어슨4형분포모형에 기초한 반도체기술컴퓨터지원설계 Silvaco TCAD의 공정모의기 ATHENA를 리용하여 방사선검출기의 합리적인 불감층두께를 결정하였다. 불감층두께를 40nm이하로 형성하는데 필요한 합리적인 주입조건은 주입에너지 1keV, 주입선량  $10^{14}/\text{cm}^2$ , 급속열처리온도 1 000°C이다.

### 참고 문헌

- [1] 김일성종합대학학보(자연과학), 51, 10, 67, 주체94(2005).
- [2] Ю. К. Акимов; Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике, 5~17, Москва Энергоатомиздат, 1989.
- [3] N. Guenifi et al.; Phosphorus, Sulfur Silicon and the Related Elements, 193, 2, 92, 2017.
- [4] A. Omar et al.; Radiation Measurement, 122, 121, 2019.

주체109(2020)년 6월 5일 원고접수

### Determination of Dead Thickness of Ion Implantation p-n Junction Semiconductor Radiation Detector by Using ATHENA

*Ri Chol Gwang, Ko Myong Son and An Jong Do*

In order to determine the reasonable dead thickness of radiation detector, we simulated boron ion implantation profiles by using ATHENA based on Pearson type IV distribution models. The reasonable implantation conditions to make the dead thickness 40nm are the implantation energy 1keV, the dose  $10^{14}/\text{cm}^2$  and rapid thermal annealing temperature 1 000°C.

Keywords: ion implantation detector, ATHENA