

## 반도체집적소자를 투과하는 중성자와 2차 이온들의 에너지손실특성

리철민, 고병춘

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《과학과 기술을 발전시켜야 인민경제의 주체화, 현대화, 과학화를 실현하여 사회주의의 물질기술적토대를 튼튼히 쌓고 인민생활을 끊임없이 높일수 있습니다.》(《김정일선집》증보판 제12권 365페이지)

방사선조임환경에서 리용되는 전자기구 및 장치들의 동작민음성은 주로 반도체집적소자들의 오동작 및 특성열화와 련관되어있으므로 집적소자들의 방사선손상은 오늘 매우 중요한 문제로 제기되고있다.[1, 2]

론문에서는 SRAM, DRAM과 같은 대규모집적소자들에서 나타나는 고에너지입자조임에 의한 방사선손상평가를 위하여 Am-Be중성자들의 투과특성과 그 과정에 형성되는 2차이온들의 에너지손실특성에 대하여 고찰하였다.

### 1. 집적소자 밀봉재료에서 Am-Be 중성자의 투과특성

집적소자들에서 밀봉재료는 소자전체 기하학적체적의 대부분을 차지하고있다. 그러므로 방사선조임에 의한 집적소자의 오동작 및 특성열화는 이 밀봉재료를 투과한 방사선입자들의 투과특성에 의하여 결정되게 된다.

대표적인 집적소자들에서 밀봉재료의 조성은 표와 같다.[2]

표. 집적소자들에서 밀봉재료의 조성

성분	함량/%	밀도/(g·cm <sup>-3</sup> )
에폭시수지(모체재료)	18.4	1.85
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (충진재)	40	3.98
실리카(결합재)	40	2.23
페놀수지(가소재)	1.5	1.51
기타(색감, 방수재)	0.1	0.21

표의 자료에 기초하여 집적소자 밀봉재료(평균밀도 2.78g/cm<sup>3</sup>)에서 비교적 넓은 에너지스펙트럼대역(0.4~10.7MeV)을 가지는 Am-Be원천중성자조임이 진행될 때의 투과특성을 몽페-까를로다충차페모의프로그램 MULASSIS 1.1을 리용하여 평가하였다.

집적소자에서 반도체소편위의 밀봉재료두께는 1.5mm로 설정하였으며 중성자들은 밀봉재료표면에 수직으로 입사시켰다. 모의평가에서 중성자와 밀봉재료구성원자들과의 호상작용모형은 hadron-em-ln으로 설정하였으며 입사중성자의 모의시행수는 10<sup>6</sup>으로 하였다.

집적소자 밀봉재료에서 Am-Be원천중성자 투과후 흐름스펙트럼의 특성은 그림 1과 같다.

그림 1에서 보는바와 같이 집적소자 밀봉재료에서 Am-Be원천중성자들의 투과후 흐름스펙트르는 에너지가 작은 대역과 높은 대역에서는 입사흐름과 거의 변화가 없고 입사중성자의 최대흐름밀도에 해당하는 에너지 3.98MeV에서 투과후 흐름밀도가 약 4.8% 감소한다는것을 알수 있다. 이것은 Am-Be중성자조임에 대하여 표와 같은 조성의 집적소자 밀봉재료(두께 1.5mm)는 차폐효과를 거의 나타내지 못하며 대부분의 중성자들이 거의 그대로 그밀의 반도체층에 입사한다는것을 보여준다.

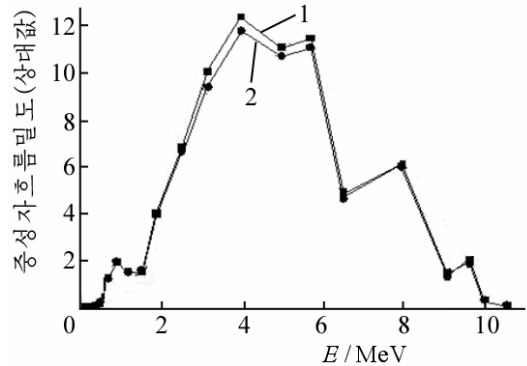


그림 1. 집적소자 밀봉재료에서 Am-Be원천 중성자 투과후 흐름스펙트르의 특성  
1-입사흐름, 2-투과흐름

## 2. 규소반도체속에서 2차이온들의 에너지손실특성

집적소자의 밀봉재료층을 투과한 중성자들은 반도체소편속에서 규소살창원자와의 탄성충돌을 통하여 에너지를 잃으며 이 과정에 살창에서 떨어져나온 규소양이온들은 일정한 거리를 주행하면서 에너지손실을 일으킬수 있다.

Am-Be원천중성자와의 탄성충돌에 의하여 규소반도체소편결정속에서 만들어지는 1차 변위규소양이온의 최대에너지  $E_{p,최대}$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$E_{p,최대} = \frac{4 \cdot m_n \cdot m_{Si}}{(m_n + m_{Si})^2} E_n - E_d \quad (1)$$

여기서  $m_n$ 은 중성자의 질량,  $m_{Si}$ 는 규소양이온의 질량이며  $E_n$ 은 입사중성자의 에너지,  $E_d$ 는 규소의 변위에너지로서 약 15eV이다. 식 (1)로부터 0.4~10.7MeV사이의 에너지를 가진 Am-Be원천중성자의 경우에 중성자와의 탄성충돌에 의하여 만들어진 규소양이온의 에너지는 0.053~1.421MeV의 값을 가진다는것을 알수 있다.

규소반도체속에서 위의 에너지를 가진 규소양이온들의 제동능을 몽페-까를로대전립자수송모의프로그램 SRIM 2013으로 평가하였다.(그림 2)

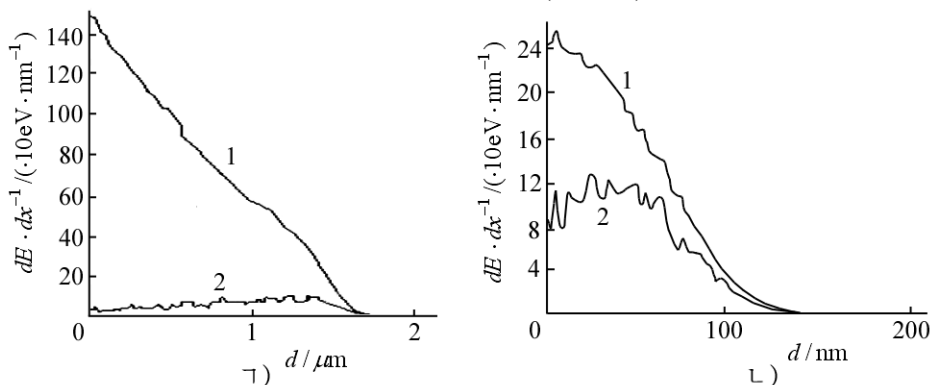


그림 2. 규소반도체속에서 1.421MeV(Γ)와 53keV(L)의 에너지를 가진 규소양이온의 에너지손실  
1-이온화, 2-변위

그림 2에서 보는바와 같이 규소반도체속에서 에너기가 1.421MeV인 규소양이온의 최대주행거리는  $(1.6 \pm 0.19)\mu\text{m}$ 로서 MOSFET집적소자에서 유효반도체결정소편의 두께( $\sim 2\mu\text{m}$ )보다 조금 작으며 에너지를 잃는 기본물질은 대부분이 이온화손실이라는것을 알수 있다. 한편 Am-Be중성자원천의 최소에너지를 가지는 중성자에 의하여 만들어진 53keV 규소반충양성자의 규소결정속에서의 주행거리는  $(77.8 \pm 30.4)\text{nm}$ 로서 매우 작으며 이 경우에도 이온화에너지손실은 원자변위에 의한 손실보다 크지만 전체 에너지손실에서 변위(탄성충돌)과정의 에너지손실이 차지하는 몫이 1.421MeV인 규소양이온의 경우보다는 훨씬 커진다는것을 보여준다.

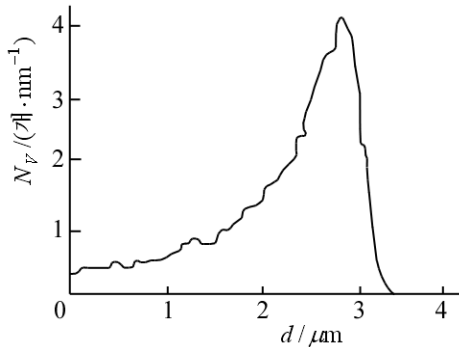
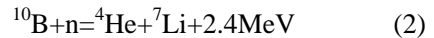


그림 3. 규소반도체결정속에서 4.6MeV 중성자에 의하여 만들어진 빈살창점결함농도의 분포

그림 3에 규소반도체결정속에서 4.6MeV 중성자에 의하여 만들어진 빈살창점결함농도의 분포를 보여주었다.

고체물질속에서 중성자의 에너지가 약화되어 열중성자로 되는 경우에는 집적소자들의 p형 반도체물질속에서 반개혼입물인 붕소와 다음과 같은 대전립자방출 핵반응을 일으킬수 있다.



이 반응에 의하여 발생하는  $\alpha$  입자와  $^7\text{Li}$  핵들의 에너지는 각각 1.4, 1MeV이다. 규소반도체물질속에서 이 입자들의 주행거리와 이온화제동능을 SRIM 2013에 의하여 평가하였다.(그림 4)

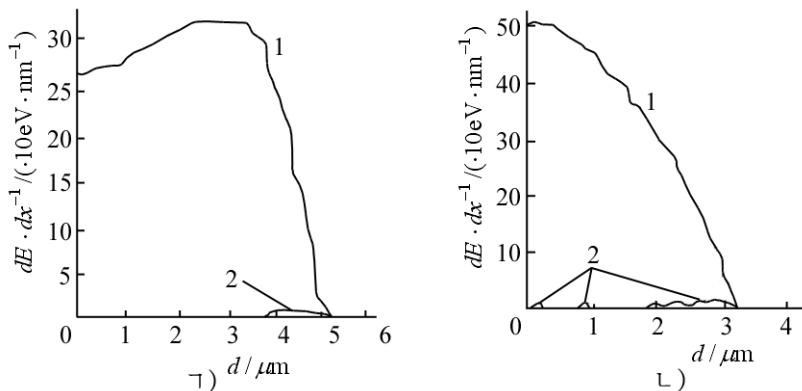


그림 4. 규소반도체물질속에서 1.4MeV  $\alpha$  입자(1)와 1MeV  $^7\text{Li}$  입자(2)의 에너지손실특성  
1-이온화, 2-변위

그림 4에서 보는바와 같이 1.4MeV  $\alpha$  입자와 1MeV  $^7\text{Li}$  입자의 최대주행거리는 각각  $(5.23 \pm 0.17)$ ,  $(3.16 \pm 0.18)\mu\text{m}$ 이며 두 핵반응생성물들은 규소반도체물질속에서 거의 전체 에너지를 이온화에 의하여 잃는다는것을 알수 있다.

이러한 결과는 집적소자에 중성자조임이 진행될 때 탄성충돌에 의하여 형성되는 규소살창이온들과 열중성자와 p형반도체 붕소혼입물과의 핵반응생성물인  $\alpha$  입자와  $^7\text{Li}$  핵들의 이온화에너지손실과정에 만들어지는 전하나르개들이 소자의 전기적특성에 심중한 영향을 미칠수 있다는것을 보여준다. 또한 밀봉재료를 투과한 중성자들에 의하여 반도체결

정소편속에 만들어지는 빈살창점과 같은 변위형결함들은 소자내에서 나르개들의 농도와 이동도의 감소를 통하여 점차적인 열화를 일으키는 기본원인으로 된다는것을 알수 있다.

## 맺 는 말

- 1) 집적소자들의 밀봉재료에서 중성자입사흐름의 차폐특성을 모의평가하였다.
- 2) 규소반도체속에서 중성자의 탄성충돌에 의하여 만들어진 규소양이온들의 에너지손실특성을 밝혔다.
- 3) 열중성자와 p형반도체 붕소혼입물과의 핵반응으로 만들어진  $\alpha$  입자와  ${}^7\text{Li}$  핵의 에너지손실특성을 밝혔다.

## 참 고 문 헌

- [1] Joseph Barak et al.; IEEE Trans. Nucl. Sci., 62, 6, 3369, 2015.
- [2] R. Velazco et al.; IEEE Trans. Nucl. Sci., 61, 6, 3103, 2014.

주체107(2018)년 9월 5일 원고접수

## Investigation on the Energy Loss Characteristics of Neutron and the Secondary Ions Penetrating Semiconductor IC

*Ri Chol Min, Ko Pyong Chun*

In this paper we study the energy loss of silicon cations formed by neutron elastic collision in Si semiconductor. Also we study the energy loss characteristics of  $\alpha$  particle and  ${}^7\text{Li}$  ions formed by the nuclear reaction of thermal neutron and p-Si boron dopants.

Key words: silicon ion, integral circuit