

Al-Si계에서 고에너지양성자의 선량특성

김혁, 김래성

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《우리는 위대한 장군님의 우주강국건설업적을 만년토대로 하여 우주과학기술을 더욱 발전시켜 첨단기술의 집합체이며 정수인 실용위성들을 더 많이 제작, 발사하여야 합니다.》
(《조선로동당 제7차대회에서 한 중앙위원회사업총화보고》 단행본 39~40페이지)

Al-Si계는 우주복사선조임환경에서 운행되는 위성내부의 반도체소자들에서 관측되는 일련의 특성열화를 평가할 때 고려하는 대표적인 수송모의구조이다.[5] 지금까지 진행한 다층계에서의 대전립자수송모의에서는 입사립자들의 에너지가 충분히 크지 않으며 Si반도체소자에서 양성자에 의한 방사선조임손상평가에서 중요한 특성량인 비이온화선량과 같은 모의결과들은 거의 알려진것이 없다.

우리는 다층차폐모의프로그램 MULASSIS 1.2로 알루미늄차폐층속에서 고에너지양성자의 수송과정을 모의하고 Si에서 양성자의 이온화 및 비이온화손실특성을 평가하였다.

1. 입사립자의 에너지에 따르는 핵적제동능과 주행거리

MULASSIS에서는 1차원다층계에서 립자수송과정을 몽떼-까를로방법으로 Geant핵심부를 그대로 리용하여 모의한다.

우주복사선에서 대부분을 차지하는 양성자의 에너지는 수MeV~수GeV이다.

우주환경에서 리용되는 반도체소자들은 우주선의 영향을 직접 받지 않도록 알루미늄을 차폐재료로 리용한다.

대전립자가 물질속을 통과할 때 이온화 및 비이온화과정을 통하여 에너지를 잃는다.

이온화과정은 대전립자가 물질속에서 정지되면서 에너지를 잃는 과정으로 볼수 있다.[1]

핵적제동능은 다음과 같이 계산한다.[2]

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{핵}} = 2n_A \pi (zZe^2)^2 \frac{E^2}{p^2 Mc^4} \left[\frac{A_s}{A_s + 1} - 1 + \ln \left(\frac{A_s + 1}{A_s} \right) \right]$$

여기서 n_A 는 단위체적당 핵수, z 는 입사립자의 원자번호, Z 는 표적핵의 원자번호, p 는 입

사립자의 운동량, $A_s = \left(\frac{\hbar}{2pa_1} \right)^2 \left[1.13 + 3.76 \times \left(\frac{\alpha z Z}{\beta} \right)^2 \right]$, E 는 입사립자의 에너지, M 은 표적

핵의 나머지질량, a_1 는 차폐길이, α 는 구조상수이다.

비이온화에너지손실(NIEL)은 변위손상과정을 통하여 입사립자가 잃는 에너지변화로써 다음과 같다.[3, 4]

$$-\left(\frac{dE}{dT}\right)_{\text{핵}}^{\text{NIEL}} = n_A \int_{T_d}^{T_{\max}} TL(T) \frac{d\sigma^{\text{WM}}(T)}{dT} dT$$

여기서 T 는 표적핵에 전달되는 운동에너지, $L(T)$ 는 변위손상과정에 침적되는 T 의 몫, $\frac{d\sigma^{\text{WM}}(T)}{dT} = 2\pi(zZe^2)^2 \frac{E^2}{p^2 Mc^4} \frac{1}{(T_{\max} A_s + T)^2}$ 이다.

입사양성자의 에너지를 50MeV부터 1TeV까지 변화시키면서 핵적제동능을 계산한 결과는 그림과 같다.

그림에서 보는바와 같이 입사입자의 에너지가 커질수록 잃는 에너지는 작아지고 1GeV이상부터는 그 값이 거의 변하지 않는다.

물질속에 입자가 에너지를 잃으면서 어느 정도 침투하는가를 알기 위하여 주행거리라는 개념을 받아들였다.

물질속에서 입자의 주행거리는 여러가지로 정의되는데 여기서는 물질속에 흡수되는 이온화선량이 초기값보다 10%이하로 될 때의 침투깊이를 주행거리로 하였다.

표 1. 입사입자의 에너지에 따른 주행거리변화

에너지/MeV	주행거리/mm
10	0.7
20	2.25
40	7.6
100	37.9
200	126.2
400	397.5
1 000	1 700.2

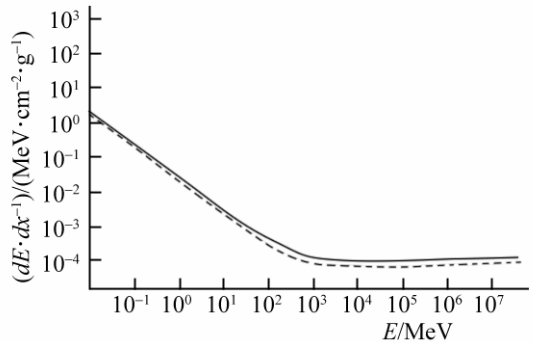


그림. 입사양성자의 에너지에 따른 핵적제동능

실선은 식계산결과, 점선은 모의계산결과

입사입자의 에너지에 따른 주행거리는 표 1과 같다. 모의된 평균주행거리로부터 최소두께급법을 리용하여 다음과 같은 식을 얻을수 있다.

$$R = 0.014 \cdot 81 \times E^{1.703}$$

2. 양성자의 이온화 및 비이온화선량

표 1에서 보는바와 같이 1GeV이상의 양성자를 완전히 차폐하는것은 어렵다. 우주환경에서의 차폐를 위하여 보통 가벼운 금속인 알루미늄을 리용하는데 질량을 최소로 하기 위해 차폐벽의 두께를 10mm이상 크게 할수 없다.

두께가 10mm인 알루미늄육차폐층을 리용할 때 규소층에서 비이온화선량(NID)과 이온화선량(DOSE)을 모의한 결과는 표 2와 같다.

표 2. 이온화선량과 비이온화선량

E/MeV	NID/(MeV·g ⁻¹)	DOSE/rad	E/MeV	NID/(MeV·g ⁻¹)	DOSE/rad
10	0	0	60	4.669 6·10 ¹⁰	2.263 5·10 ⁶
20	0	0	100	2.835 6·10 ¹⁰	1.034 5·10 ⁶
40	0	0	200	1.840 2·10 ¹⁰	6.082 2·10 ⁵
45	0	0	400	1.698 5·10 ¹⁰	3.900 2·10 ⁵
47	3.183 8·10 ⁹	1.342 1·10 ⁵	1 000	1.399 2·10 ¹⁰	2.773 5·10 ⁵
48	2.423 0·10 ¹⁰	1.108 9·10 ⁶	2 000	1.261 4·10 ¹⁰	2.517 6·10 ⁵
49	9.104 9·10 ¹⁰	6.282 1·10 ⁶	3 000	1.214 2·10 ¹⁰	2.575 7·10 ⁵
50	6.821 6·10 ¹⁰	4.736 4·10 ⁶	9 000	1.043 6·10 ¹⁰	2.759 7·10 ⁵

표 2에서 보는바와 같이 입사에너지가 49MeV일 때 선량값이 최대로 되며 1GeV이상에서는 변화가 그리 크지 않다.

48~49MeV에서 더 세분화하여 모의한 결과 차폐층의 두께가 10mm일 때 가장 큰 영향을 미치는 입사입자의 에너지는 48.6MeV이라는것을 알수 있다.

맺는 말

MULASSIS를 리용하여 알루미늄에서 고에너지양성자의 에너지와 주행거리사이 관계를 모의평가하였다. 양성자가 두께가 10mm인 알루미늄차폐층을 통과할 때 규소에 가장 큰 영향을 미치는 입사입자의 에너지는 48.6MeV이다.

참고 문헌

- [1] Y. Hayashi et al.; A Comparative Study on Space Technology in the World, JST, 33~78, 2014.
- [2] J. F. Ziegler et al.; The Stopping and Range of Ions in Matter, Montana State University, 173 ~198, 2008.
- [3] S. R. Messenger et al.; IEEE Trans. on Nucl. Sci., 50, 1919, 2003.
- [4] C. Leroy et al.; Reports on Progress in Physics, 70, 4, 2007.
- [5] I. Jun et al.; IEEE Trans. on Nucl. Sci., 50, 1924, 2003.

주체105(2016)년 10월 5일 원고접수

Dose Feature of High-Energy Proton in Al-Si System

Kim Hyok, Kim Thae Song

We simulated and estimated the relationship between energy and flight distance of high-energy proton in aluminum by using MULASSIS.

When proton passes across the Al shield layer with 10mm thickness, the incident energy which strongly affects on Si is 48.6MeV.

Key words: Al-Si system, MULASSIS, proton