

## 집적회로보호용 $\text{CoO}/\text{Ni}/\text{SiC}$ /에폭시수지계재료의 방사선차폐특성

박호남, 한금혁

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《과학연구부문에서는 주체공업, 사회주의자립경제의 위력을 강화하고 인민생활을 향상시키는데서 나서는 과학기술적문제들을 우선적으로 해결하며 최첨단의 새로운 경지를 개척하기 위한 연구사업을 심화시켜야 합니다.》

엄혹한 우주환경에서 비행하는 비행체안에 내장되어있는 집적회로를 비롯한 전자요소들을 방사선피해로부터 보호하는 문제는 매우 중요하게 제기된다.

선행연구[1]에서는 Al에 대하여 입사양성자의 에너지를 50MeV부터 1TeV까지 변화시키면서 핵적제동능을 모의계산한 결과 입사입자의 에너지가 커질수록 제동능은 작아지고 1GeV이상부터는 그 값이 거의 변하지 않는다는 결과를 얻었다. 선행연구[3]에서는  $\alpha$  선,  $\beta$  선, 중성자,  $\gamma$  선, 렌트겐선 등 방사선을 막는데 쓰이는 재료에 대하여 논의하였다. 선행연구[4]에서는 탄화붕소와 립방질화붕소의 특성을 분석하고 차폐재료의 중성자차폐능력을 측정하였다. 개발한 차폐재료는 37.9%의 중성자차폐률을 가졌다.

한편 몽떼까를로립자수송프로그램인 MCNP에 기초하여 새로운 유리섬유와  $\text{B}_4\text{C}$ , 에폭시수지를 합성하여 고강도와 저밀도를 보장하면서 중성자를 차폐하는 재료를 개발하였다.[5] 그것들의 중성자투과율은 Am-Be원천에서 전통적인 차폐재료와 유리섬유,  $\text{B}_4\text{C}$ , 에폭시수지합성물질사이의 차이를 고려하여 계산하였다.

또한 서로 다른 에너지를 가진 중성자(느린중성자, 중간중성자, 빠른중성자)차폐성능에 미치는  $\text{B}_4\text{C}$ 의 질량분률의 효과를 해석하였다. 결과는  $\text{B}_4\text{C}$ 함유량이 10%인 경우가 중성자차폐성능이 더 좋으며 특히 A1,  $\text{B}_4\text{C}$ 합금이 포함되어있는 폴리에틸렌붕소에 비하여 느린중성자차단성능이 더 좋다는것을 보여주었다.  $\text{B}_4\text{C}$ 의 함량을 더 증가시킬 때에는 다른 변화가 관측되지 않았다.

우리는 반 알렌띠에 존재하는 방사선흐름에 주목하고 양성자와 전자흐름에 대하여 고찰하였으며 중성자와  $\gamma$ 선에 대하여서도 모의하였다. 그리고 집적회로의 안전성문제는 양성자에 대하여서만 고찰하였다.

### 1. $\text{CoO}/\text{Ni}/\text{SiC}$ /에폭시수지계재료의 방사선차폐특성모의

우리는 방사선원천으로서 방사선분포모의도구 OMERE를 리용하여 원지점고도 35 780km, 근지점고도 180km에서의 반 알렌띠에 존재하는 양성자와 전자흐름을 모의하고 그 값을 리용하였다. 중성자의 흐름은 양성자와 같고  $\gamma$ 선은 전자흐름과 같다고 가정하였다.

론문에서 제기한 재료와 몇가지 재료들과의 비교를 위하여 두께를 다같이 4mm로 일치시켰다. 모의는 다층차폐모의도구인 MULASSIS로 진행하였다.

몇 가지 재료에서 양성자, 중성자,  $\gamma$  선, 전자투과흐름은 표 1과 같다.

표 1. 몇 가지 재료에서 양성자, 중성자,  $\gamma$  선, 전자투과흐름 ( $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

재료	방사선립자			
	양성자	중성자	$\gamma$ 선	전자
Al	6 225 149	77 606	11 028.5	404.7
Wc/B <sub>4</sub> C/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiC/흑연/에폭시수지	6 182 811	57 164	3 900.7	26.4
WC/Ni/흑연/에폭시수지	6 156 401	49 932	11 882.5	897.71
CoO/Ni/에폭시수지	6 115 354	38 500	15 163.5	239.5
CoO/Ni/SiC/에폭시수지	6 148 407	51 835	6 408	91.8

표 1에서 보는바와 같이 투과된 양성자흐름에서는 CoO/Ni/에폭시수지계가 Al보다는 10만단위에서, 다른 재료들보다는 만단위에서 차이가 난다. 문제는 이러한 방사선립자들이 2차, 3차립자를 만들수 있다는데 있다.

각이한 재료에서 방사선립자의 차폐률은 표 2와 같다.

표 2. 각이한 재료에서 방사선립자의 차폐률(%)

재료	방사선립자			
	양성자	중성자	$\gamma$ 선	전자
Al	99.993 564 83	99.999 919 78	99.999 992 76	99.999 999 73
Wc/B <sub>4</sub> C/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiC/흑연/에폭시수지	99.993 608 59	99.999 940 91	99.999 997 44	99.999 999 98
WC/Ni/흑연/에폭시수지	99.993 635 89	99.999 948 38	99.999 992 2	99.999 999 94
CoO/Ni/에폭시수지	99.993 678 32	99.999 960 20	99.999 990 05	99.999 999 84
CoO/Ni/SiC/에폭시수지	99.993 644	99.999 946 42	99.999 995 8	99.999 999 94

표 2에서 보여주는바와 같이 차폐률에서 정도의 차이는 크지 않지만 CoO/Ni/에폭시수지계재료가 양성자와 중성자의 차폐률이 제일 좋다. 특히 우주비행체가 반 알렌띠를 통과해야 하기때문에 양성자차폐에 각별한 주의를 돌려야 한다. 이렇게 놓고볼 때 현재까지 모의한 자료에 기초하면 CoO/Ni/에폭시수지계재료가 양성자차폐에 적합하다는 결론이 얻어진다. 이 재료에 대한 밀도를 계산한데 의하면 알루미늄의 절반정도이다.

우리는 CoO/Ni/에폭시수지계재료의 력학적세기를 크게 하기 위하여 SiC수염결정을 재료조성에 포함시켰다. 물론 이 경우 CoO/Ni/에폭시수지계재료보다는 양성자와 중성자의 차폐률에서는 떨어지지만  $\gamma$  선과 전자에 대한 차폐률은 더 좋았다.

비행체에 설치하는 방사선차폐재료는 차폐특성도 좋아야 하지만 력학적특성도 일정하게 좋아야 하므로 우리는 이 마지막계 즉 CoO/Ni/SiC/에폭시수지계재료를 선택하였다. 비중을 Al의 절반정도로 하는것을 기준으로 하고 품질공학적수법을 도입하여 합리적인 배합비를 선정하였다.

## 2. 집적회로의 안전성평가

방사선조임을 받은 반도체집적회로특성변화의 유무에 대하여 연산증폭소자 TL082와 MOS소자를 가지고 양성자조임을 받는 경우를 고찰하자. 반도체재료가 방사선조임을 받으면 손상된다. 손상률은 다음의 식으로 계산된다.[2]

$$\Phi \cdot \sigma_s \cdot \frac{\Lambda \cdot \bar{E}_n}{4E_d} (\text{dpa/s})$$

여기서  $\Phi$  는 방사선흐름 ( $\text{cm}^{-2}/\text{s}$ ) ,  $\sigma_s$  는 산란자름면적(강체구모형에서  $\sigma_s = \pi R_N^2$  ),  $R_N = A^{1/3} \cdot 10^{-13} \text{cm}$  (Si인 경우  $A=28$  ),  $\Lambda = 4A(1+A^2)$  ,  $\bar{E}_n$  은 방사선의 평균에너지,  $E_d$  는 변위턱에너지(Ge의 경우 30eV)이다.

평균에너지  $\bar{E}_n$  는 다음과 같이 계산한다.

$$\bar{E}_n = \frac{\sum_{i=1}^m E_i \times n_i}{\sum_{i=1}^m n_i}$$

여기서  $E_i$  는  $i$ 번째 에너지,  $n_i$ 는  $i$ 번째 에너지에 대응하는 립자수,  $m$ 은  $i$ 의 총개수이다.

OMERE모의에서 얻어진 결과에 의하면  $m$ 은 32이다. 이 모의결과로부터 평균에너지를 계산한데 의하면 양성자에 대하여서는 0.293MeV, 전자에 대하여서는 0.67MeV이다. Si와 Ge이 다같은 4족원소이며 결정구조가 같다는것을 고려하여 Si의 변위턱에너지를 Ge와 같이 가정하였다. Si의 경우 강체구모형으로 산란자름면적을 구하면  $\sigma_s = \pi R_N^2$  이다. 여기서  $R_N = A^{1/3} \cdot 10^{-13} \text{cm}$  이므로 이 값을 대입하면  $\sigma_s = 9.42 \cdot 10^{-26} \text{cm}^2$  이다. 한편  $\Lambda = 0.133$  이다.

CoO/Ni/SiC/에폭시수지계에 대한 모의실험에서 차폐막을 투과한 양성자의 흐름은  $\sim 6.1 \cdot 10^6 \text{cm}^{-2}/\text{s}$  이므로 그것을 그대로 리용하였다. 따라서 손상률은 다음과 같다.

$$6.1 \cdot 10^6 \text{cm}^{-2}/\text{s} \times 9.42 \cdot 10^{-26} \text{cm}^2 \times (0.133 \times 0.293 \cdot 10^6 \text{eV}) / (4 \times 30 \text{eV}) \approx 4.78 \cdot 10^{-16} \text{dpa/s}$$

만일 우주비행체가 자기궤도에 진입하는데 걸린 시간이  $8.64 \cdot 10^4 \text{s}$  라면 손상량은  $4.78 \cdot 10^{-16} \text{dpa/s} \times 8.64 \cdot 10^4 \text{s} = 4.13 \cdot 10^{-11} \text{dpa}$  이다.

TL082소자활성통로의 자름면적을  $S = 0.25 \mu\text{m}^2$  , 통로길이를  $L = 1 \mu\text{m}$  로 가정하였다. 따라서 활성구역의 체적은  $2.5 \cdot 10^{-13} \text{cm}^3$  이다. 이 구역에서 손상된 개수는 다음과 같이 계산된다.

규소에서  $1 \text{cm}^3$  안에  $5 \cdot 10^{22}$  개의 원자가 있으므로 활성구역의 체적  $0.25 \mu\text{m}^3$  안에 있는 원자수는  $1.25 \cdot 10^{10}$  개이다. 손상량  $4.13 \cdot 10^{-11} \text{dpa}$  는 1개 원자당 변위원자가  $4.13 \cdot 10^{-11}$  개라는것을 의미하므로  $0.25 \mu\text{m}^3$  체적안에 존재하는 변위원자의 총수는  $4.13 \cdot 10^{-11} \times 1.25 \cdot 10^{10} \approx 0.5$  개로 계산된다. 즉 이 값은 활성구역에서의 원자수  $1.25 \cdot 10^{10}$  개의  $4 \cdot 10^{-7} \%$  에 대응된다. 따라서 소자의 특성에서는 아무러한 변화도 나타나지 않는다.

이러한 원리에 기초하여 CPU에 내장되어있는 CMOS소자에 대하여 통로너비  $0.5 \mu\text{m}$  , 통로길이  $0.5 \mu\text{m}$  , 통로길이  $0.18 \mu\text{m}$  인 MOSFET라고 가정하면 변위원자총수는  $9.29 \cdot 10^{-2}$  개로 계산된다.

우와 같은 방법으로 변위원자수를 %로 표시하면  $4 \cdot 13^{-9} \%$  가 얻어진다.

이로부터 개발한 복합재료는 반도체집적회로보호용방사선차폐재료로서 쓸모가 있다고 말할수 있다.

## 맺 는 말

CoO/Ni/SiC/에폭시수지계재료에 대한 방사선차폐특성을 고찰한데 의하면 이 재료에 방사선이 쏘여질 때 변위원자수의 백분률이  $10^{-7}\%$  보다 작으므로 집적회로가 안전할것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] 김일성종합대학학보(자연과학), 63, 2, 88, 주체106(2017).
- [2] 고병춘; 재료의 방사선조임효과, 외국문도서출판사, 115~120, 주체105(2016).
- [3] R. D. Schrimpf et al.; International Journal of High Speed Electronics and Systems, 34, 2, 367, 2014.
- [4] A. S. Kipcak et al.; Energy Conversion and Management, 72, 39, 2013.
- [5] 陈飞达 等; 强激光与粒子束, 24, 12, 2012.

주체109(2020)년 6월 5일 원고접수

## **Radiation Shielding Property of CoO/Ni/SiC/Epoxy Resin Material for Protection of the Integrated Circuit**

*Pak Ho Nam, Han Kum Hyok*

We considered the radiation shielding property of CoO/Ni/SiC/epoxy resin material and obtained the result that integrated circuit would be safe because the percentage of displacement atom number is little than  $10^{-7}\%$  when radioactive rays irradiate on this material.

Keywords: damage modulus, average energy, displacement atom number