

Cu/Ni/에폭시수지계 방사선차폐재료의 양성자차폐특성에 대한 연구

박 호 남

경애하는 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《우리는 우주과학기술을 계속 발전시키고 우주개발사업을 더욱 본격적으로 벌려나가야 합니다. 우리는 우주과학기술분야에서 패권을 쥐여야 합니다.》

보통 약 60MeV정도의 양성자를 완전히 멈추려면 알루미늄의 경우에 약 20mm정도의 두께를 가져야 한다. 다른 재료를 리용하는 경우에도 양성자를 완전히 멈추려면 두꺼운 재료가 요구되는데 이렇게 되면 부득이 질량이 증가하므로 실용적이지 못하다. 그러나 방사선을 완전히 차폐하지 못하더라도 반도체소자가 견딜수 있을 정도로 차폐하면 소자를 보호할수 있다.

선행연구[1]에서는 Mulassis모의를 통하여 지구정지궤도인 경우 차폐재료로서 Ta가 적합하다는것을 제기하였다. 한편 선행연구[3]에서는 CCD카메라에 미치는 양성자복사의 영향을 제기하였으며 차폐재료에 대한 문제를 논의하지 않고 모의의 정확성을 리론적으로 립증하는데 주목하였다.

우리는 무거운 원소와 가벼운 원소를 엇바꾸어 배치하면 차폐가 훨씬 개선된다는것을 고려하여 방사선차폐재료로서 Cu/Ni/에폭시수지계를 선정하고 양성자차폐특성을 고찰한데 기초하여 MOS소자의 턴전압변화를 해석하였다.

1. Mulassis에 의한 재료의 양성자차폐모의

우주비행체가 정지위성궤도에 진입하려면 반 알렌띠를 반드시 거쳐야 한다. 이때 우주비행체는 양성자의 영향을 가장 많이 받는다.

론문에서는 원지점고도 35 870km, 근지점고도 180km, 경사각 6°, 토막지속시간을 5y로 설정하고 반 알렌띠안에 존재하는 양성자를 OMER로 모의하였다.

Cu/Ni/에폭시수지계를 이 원천으로 쪼여줄 때 투과흐름이 가장 작은 층두께를 확정하기 위하여 품질공학적수법을 리용하였다. 공정조건을 고려한 인자와 수준은 표 1과 같다.

표 1. 인자와 수준(mm)

인자 수준	Cu	Ni	에폭시수지
1	0.08	0.05	3.87
2	0.15	0.07	3.78
3	0.2	0.09	3.71

다음으로 L_9 직교표를 작성하고 다층차폐모의도구 Mulassis로 모의하였다. 모의결과에 대한 양성자의 투과흐름 및 차폐률은 표 2와 같다.

표 2. 양성자의 투과흐름 및 차폐률

No.	투과흐름/(개·cm ⁻² ·s ⁻¹)	차폐률/%
1	6 138 494.91	93.25
2	6 175 437.98	93.21
3	6 167 639.98	93.22
4	6 157 904.79	93.23
5	6 192 694.93	93.20
6	6 186 389.99	93.20
7	6 163 569.57	93.23
8	6 190 785.88	93.20
9	6 154 014.14	93.24

최적조건은 Cu-0.08mm, Ni-0.05mm, 에폭시수지-3.87mm이다. MOS소자의 턴전압은 최적조건에서의 결과들을 리용하여 평가하였다.

2. MOS소자의 턴전압변화에 대한 평가

반도체소자에 방사선이 쏘여지면 손상되어 결함이 형성된다. 만일 이 손상이 조종극 산화막에 공간전하를 만든다면 MOS소자의 턴전압을 변화시킨다.

일반적으로 MOS소자의 턴전압은 다음과 같이 표시할 수 있다.[4]

$$V_{\text{턴}} = -\frac{Q_B}{C_o} + \varphi_{\text{Si}} \quad (1)$$

여기서 Q_B 는 체적전하이며 $\varphi_{\text{Si}} \approx 2\varphi_B$ 는 강한 반전조건에서의 결면포텐셜이다.

강한 반전조건에서 체적전하와 결면포텐셜, 조종극산화막용량은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$Q_B = -\sqrt{2q\varepsilon_0\varepsilon_s N_A (V_c + \varphi_{\text{Si}})} \quad (2)$$

$$\varphi_{\text{Si}} \approx 2\varphi_B = \left(\frac{2k_B T}{q} \right) \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) \quad (3)$$

$$C_o = \frac{\varepsilon_o \varepsilon_0}{d_o} \quad (4)$$

여기서 ε_0 , ε_s , ε_o 는 진공, 반도체, 산화막의 유전률이며 V_c , d_o 는 통로전압과 산화막의 두께이다. 식 (2)–(4)를 식 (1)에 대입하면 턴전압은 다음과 같다.

$$V_{\text{턴}} = -\frac{\sqrt{2q\varepsilon_0\varepsilon_s N_A \left[V_c + \left(\frac{2k_B T}{q} \right) \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) \right]}}{\frac{\varepsilon_o \varepsilon_0}{d_o}} + \left(\frac{2k_B T}{q} \right) \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) \quad (5)$$

조종극산화막의 두께를 100nm라고 가정하면 조종극산화막용량은 다음과 같다.

$$C_o = \frac{3.5 \cdot 10^{-13} \text{ F/cm}}{10^{-5} \text{ cm}} = 3.5 \cdot 10^{-8} \text{ F/cm}^2 \quad (6)$$

또한 혼입물농도를 $N_A=10^{16}\text{cm}^{-3}$ 이라고 가정하면 결면포텐셜은 다음과 같다.

$$\phi_{\text{Si}} = \frac{2 \times 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \times 300 \text{ K}}{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}} \ln \left(\frac{10^{16} \text{ cm}^{-3}}{10^{10} \text{ cm}^{-3}} \right) \approx 0.69 \text{ V} \quad (7)$$

만일 배출극전압 $V_c = 5 \text{ V}$ 라고 하고 식 (6), (7)을 고려하여 식 (5)를 구하면

$$V_{\text{턱}} = 2.28 + 0.69 = 2.97 \text{ (V)}$$

이다. 이 값은 MOS소자에 방사선이 쏘여지지 않은 경우의 턱전압이다.

만일 방출일차와 산화막전하효과가 있다면 위에서 주어진 턱전압은 변화되어 다음과 같이 표시된다.

$$V'_{\text{턱}} = \phi_{ms} + \phi_{\text{Si}} - \frac{Q_o}{C_o} - \frac{Q_B}{C_o} = V_{FB} + \phi_{\text{Si}} + \sqrt{2q\epsilon_s\epsilon_o\phi_{\text{Si}}/C_o} \quad (8)$$

여기서 ϕ_{ms} 는 금속-반도체방출일차이며 Q_o/C_o 는 산화막전하로 인한 전압밀립, V_{FB} 는 다음의 식으로 표시되는 평띠전압이다.

$$V_{FB} = \phi_{ms} - \frac{Q_o}{C_o} \quad (9)$$

방사선쏘임후 MOS구조에서 만들어지는 산화층공간전하와 경계면상태전하들이 이 소자의 전기적특성량들을 변화시킬수 있으므로 턱전압에 대한 부의 방향이동은 주로 두 가지 성분으로 구성된다고 볼수 있다.

따라서 n 통로증가형마당효과3극소자에서 턱전압이동은 다음과 같이 표시할수 있다.

$$\Delta V_{\text{턱}} = -\frac{e}{C_o} \Delta Q_{ot} + \frac{e}{C_o} \Delta Q_{it} \quad (10)$$

여기서 ΔQ_{ot} 는 방사선쏘임에 의하여 소자의 조종극막에 만들어진 정의 공간전하들, ΔQ_{it} 는 조종극산화막과 통로층계면에 형성된 계면결함들에 의한 정의 전하이다.

금속과 반도체의 방출일차는 다음과 같이 계산된다.

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi_s - \frac{E_{\text{gap}}}{2q} - \phi_B \right) \quad (11)$$

여기서 ϕ_m 은 금속의 방출일, χ_s 는 반도체의 전자친화력, E_{gap} 은 반도체의 금지띠너비, q 는 전자의 전하, ϕ_B 는 금속-반도체접촉경계에서 장벽높이이다.

우리의 경우 금속이 알루미늄이므로 방출일이 $\sim 3 \text{ eV}$, 규소의 전자친화력은 1.39 eV , 규소의 금지띠너비는 1.12 eV , 알루미늄과 규소접촉시 장벽높이는 0.69 eV 라고 보면 방출일차는 다음과 같이 계산된다.

$$\phi_{ms} = 3 - (1.39 - 0.56 - 0.69) = 2.86 \text{ (eV)}$$

한편 조종극산화막은 너비 $0.5 \mu\text{m}$, 길이 $0.18 \mu\text{m}$, 두께 $0.1 \mu\text{m}$ 로 가정하였다. 이때 체적은 $9 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^3$ 이다.

따라서 변위원자의 총수를 다음과 같이 계산할수 있다. 선행연구[2]에서 고찰한대로 손상량을 $4.13 \cdot 10^{-11} \text{ dpa}$ 라고 보자. 한편 산화규소에서 1 cm^3 안에 10^{22} 개의 원자가 있다고 보면 활성구역의 체적안에 있는 원자수는 약 10^9 개이다.

손상량 $4.13 \cdot 10^{-11} \text{ dpa}$ 는 한개 원자당 변위원자가 $4.13 \cdot 10^{-11}$ 개라는것을 의미하므로 $9 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^3$ 안에 존재하는 변위원자의 총수는 $4.13 \cdot 10^{-11} \times 10^9 \approx 4 \cdot 10^{-2}$ 개이다.

만일 계면에서의 공간전하를 무시한다면 턱전압변화는 다음과 같다.

$$\Delta V_{\text{턱}} \approx -\frac{e}{C_o} \Delta Q_{ot} = -1.6 \cdot 10^{-19} \times 4 \cdot 10^{-2} / 3.5 \cdot 10^{-8} \approx -1.83 \cdot 10^{-13} (\text{V})$$

우의 계산에서 방사선조임이 없을 때 턱전압이 2.97V라고 보면 턱전압변화 $-1.83 \cdot 10^{-13} \text{V}$ 는 무시할수 있다.

맺 는 말

모의결과에 의하면 위성이 정지위성궤도에 진입하는 동안 Cu/Ni/에폭시수지계 방사선차폐재료를 통과한 양성자흐름은 MOSFET의 턱전압변화를 일으키지 않았다.

참 고 문 헌

- [1] 김일성종합대학학보 물리학, 65, 2, 115, 주체108(2019).
- [2] 김일성종합대학학보 물리학, 66, 4, 41, 주체109(2020).
- [3] K. Smith et al.; High Energy, Optical and Infrared Detectors for Astronomy VII, 9915 08-12, 2016.
- [4] S. S. Li; Semiconductor Physical Electronics, Springer, 582~596, 2006.

주체109(2020)년 12월 5일 원고접수

On Proton Shielding Characteristic of Radiation Shielding Material for Cu/Ni/Epoxy Resin System

Pak Ho Nam

According to the result of simulation, while the satellite is put into the orbit of stationary satellite, proton flow that passed through radiation sheilding material of Cu/Ni/epoxy resin system has not given rise to the change of threshold voltage of MOSFET.

Keywords: proton shielding, Van Allen Belts, stationary satellite