



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2024년12월31일
(11) 등록번호 10-2748332
(24) 등록일자 2024년12월24일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01R 31/311 (2006.01) G01R 31/00 (2006.01)
H01S 3/00 (2023.01)
(52) CPC특허분류
G01R 31/311 (2013.01)
G01R 31/008 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2024-0151268
(22) 출원일자 2024년10월30일
심사청구일자 2024년10월30일
(56) 선행기술조사문헌
KR1020220145945 A
(뒷면에 계속)

(73) 특허권자
큐알티 주식회사
경기도 이천시 부발읍 경충대로 2091
(72) 발명자
이혁재
경기도 용인시 기흥구 한보라1로64번길 22, 103동
101호(보라동, 삼성래미안아파트)
김지석
경기도 수원시 영통구 광교로 116, 811호(이의동)
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
박상열, 최내윤, 정우상

전체 청구항 수 : 총 6 항

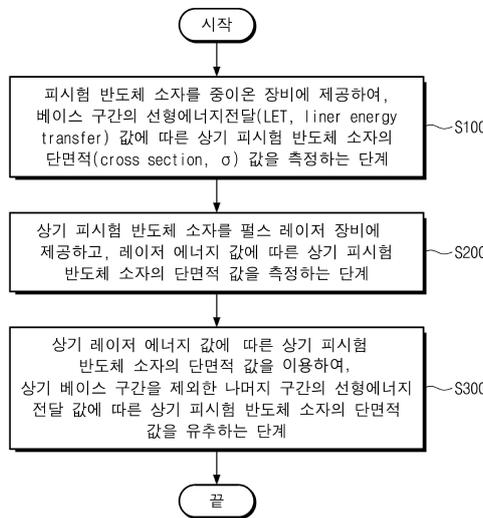
심사관 : 이종학

(54) 발명의 명칭 **중이온과 펄스 레이저를 이용한 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법**

(57) 요약

본 발명에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법은, 피시험 반도체 소자를 중이온 장비에 제공하여 베이스 구간의 선형에너지전달(LET, linear energy transfer) 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적(cross section, σ) 값을 측정하는 단계, 상기 피시험 반도체 소자를 펄스 레이저 장비에 제공하고, 레이저 에너지 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 측정하는 단계, 및 상기 펄스 레이저 장비에 제공된 상기 레이저 에너지 값을 상기 선형에너지전달 값으로 변환시켜, 상기 베이스 구간을 제외한 나머지 구간의 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 유추하는 단계를 포함할 수 있다.

대표도 - 도1



- | | |
|---|---|
| (52) CPC특허분류
<i>H01S 3/0014</i> (2013.01) | (56) 선행기술조사문헌
KR1020050095544 A |
| (72) 발명자
칸 무하마드 사킵
경기도 수원시 팔달구 월드컵로369번길 38-1, 101호(우만동) | US20050211890 A1
JP05226446 A
KR102591746 B1
KR102418634 B1
KR102547617 B1
KR102418633 B1
KR1020160055306 A
JP2013002992 A |
| 노재영
서울특별시 영등포구 63로 7, A동903호(여의도동, 은하아파트) | |
| 김영부
경기도 용인시 수지구 성북1로164번길 20, 버들치마을성북자이1차아파트 110동 1701호 | |
-

명세서

청구범위

청구항 1

피시험 반도체 소자를 중이온 장비에 제공하여, 베이스 구간의 선형에너지전달(LET, linear energy transfer) 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적(cross section, σ) 값을 측정하는 단계;

상기 피시험 반도체 소자를 펄스 레이저 장비에 제공하고, 레이저 에너지 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 측정하는 단계; 및

상기 레이저 에너지 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 이용하여, 상기 베이스 구간을 제외한 나머지 구간의 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 유추하는 단계를 포함하되,

상기 베이스 구간은, 상기 중이온 장비의 특성상 상기 중이온 장비가 제공할 수 있는 상기 선형에너지전달 값의 범위인 것을 포함하는 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법.

청구항 2

제1 항에 있어서,

상기 중이온 장비는 상기 베이스 구간의 상기 선형에너지전달 값을 제공하는 것을 포함하고,

상기 중이온 장비와 달리 국제적으로 통용된 중이온 장비는, 상기 베이스 구간 및 상기 나머지 구간의 선형에너지전달 값을 제공하는 장비인 것을 포함하고,

상기 국제적으로 통용된 중이온 장비는, 60LET 이상의 상기 선형에너지전달 값을 상기 피시험 반도체 소자에 제공할 수 있는 것을 포함하는 반도체 소자의 내방사선 평가 방법.

청구항 3

제2 항에 있어서,

상기 국제적으로 통용된 중이온 장비에 상기 피시험 반도체 소자를 제공하고 상기 베이스 구간 및 상기 나머지 구간의 상기 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값이 측정되는 것을 포함하고,

상기 국제적으로 통용된 중이온 장비에서 측정된 상기 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값과 상기 펄스 레이저 장비에서 측정된 상기 레이저 에너지 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 이용하여, 상기 레이저 에너지 값과 상기 선형에너지전달 값 사이의 상관 관계가 도출되는 것을 포함하는 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법.

청구항 4

제3 항에 있어서,

상기 레이저 에너지 값과 상기 선형에너지전달 값 사이의 관계가, 상기 펄스 레이저 장비의 레이저 광원에 따라 상이해지는 것을 포함하는 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법.

청구항 5

제4 항에 있어서,

상기 펄스 레이저 장비의 상기 레이저 광원이 단일 광자 흡수(SPA, single photon absorption)이고, 상기 레이

저 에너지 값과 상기 선형에너지전달 값의 관계가 선형적으로 비례하는 것을 포함하고,

상기 펄스 레이저 장비의 상기 레이저 광원이 비선형 흡수 이광자(two photon absorption)이고, 상기 선형에너지전달 값이 상기 레이저 에너지 값의 거듭 제곱으로 비례하는 것을 포함하는 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법.

청구항 6

제1 항에 있어서,

상기 피시험 반도체 소자를 상기 중이온 장비에 제공하여 상기 베이스 구간의 상기 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 측정하는 단계에서,

상기 피시험 반도체 소자의 문턱 에너지(threshold energy) 값, 또는 포화 단면적(saturation cross section) 값 중에서, 적어도 어느 하나가 확인되지 않는 것을 포함하고,

상기 피시험 반도체 소자를 상기 펄스 레이저 장비에 제공하고 상기 레이저 에너지 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 측정하는 단계와 상기 레이저 에너지 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 이용하여 상기 베이스 구간을 제외한 상기 나머지 구간의 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 유추하는 단계에 의해, 상기 피시험 반도체 소자의 상기 문턱 에너지 값, 또는 상기 포화 단면적 값 중에서 적어도 어느 하나 이상이 유추되는 것을 포함하는 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 중이온과 펄스 레이저를 이용한 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법에 관련된 것으로, 보다 상세하게는, 중이온 장비와 펄스 레이저 장비를 이용하여 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 유추하는 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법에 관련된 것이다.

배경 기술

[0002] 우주 공간에는 은하계로부터 전파되는 우주선과 태양에서 발생한 다양한 하전 입자 등 다양한 방사선 입자들이 많이 분포한 공간이다. 반면, 지상은 지구의 자기력선으로 인해, 많은 방사선으로부터 보호받고 있다. 따라서, 우주공간에는 다양한 방사선 입자들로부터 반도체 소자를 보호하기 위한 측정 등을 수행해야 한다.

[0003] 우주선에 사용되는 반도체는, 고 에너지 입자와의 충돌로 인해 발생하는 순간적인 오동작을 의미하는 SEE(Single-Event Effects)와 절연막 등에 트랩의 수가 증가함에 따라 누설 전류가 발생하거나 문턱 전압 값이 바뀌고 노출 정도에 따라 열화되는 TID(Total Ionizing Dose) 현상이 발생할 수 있으므로, 내방사선 특성을 평가 받드시 진행된 후에 통과된 제품을 사용해야 한다.

[0004] 특히, 중이온(heavy ion)에 대한 내방사선 평가와 TID (Total Ionizing Dose)와 같은 평가는 필수적이다. 극 제도를 도는 인공위성은, 중이온 그리고 적도 제도를 도는 경우 TID를 집중적으로 분석해야 한다.

[0005] TID는 감마선 등을 이용하여 평가하기 때문에, 시설 이용의 제약이 거의 없고 시설을 준비하는 것이 상대적으로 어렵지 않아 평가 대한 어려움이 없지만, 중이온은 거대 가속기 장치가 필요하다. 현재, 중이온 거대 가속 장치를 보유하고 있는 기관은 제한적이고, 한국에 반도체 측정이 가능한 중이온 장비는 국제적으로 통용 가능한 선형에너지전달 값 영역대를 만족하지 못하고 있다.

[0006] 우주 산업이 민간중심으로 중심축이 이동하면서 다방면으로 다양한 종류의 우주선 발사 빈도수 증가로 인해 내방사선 평가 요구가 증가하고 있는데, 평가 시설 확충은 상당한 시간을 필요로 한다. 따라서, 평가를 위한 설비 사용 기회를 확보하는 것은 매우 어려워지고 있다. 설비가 모자랄 뿐만 아니라, 유럽과 미국은 자국 위주의 배정으로 일본 같은 경우는 폐쇄적으로 운영하여 측정 기회를 잡기는 점점 어려워지고 있다. 그리고, 중국과 러시아 국제적으로 여러가지 규제 등 정치적인 문제로 민간기업이 접근하기 어려운 설비가 되었다.

[0007] 미국보다 유럽이 상대적으로 설비 사용이 용이하다. 이와 같이 중이온 거대 가속 장비 사용의 어려운 점을 개선하기 위해, 유럽 ECSS(European Space Components Coordination)의 SEE 평가 방법 및 가이드 라인(ESCC Basic

Specification No. 25100, pp.19-21) 등에서는, 대체 선원으로 알파입자 사용 가능성과 레이저 등의 사용 가능성 제시하고 있다. 예를 들어, 대한민국 등록특허공보 10-2514258에는 피시험 반도체 소자가 배치되는 스테이지, 상기 스테이지를 지지하는 지지 테이블, 상기 스테이지 상에 배치되어 상기 피시험 반도체 소자로 알파입자를 포함하는 빔을 조사하는 알파입자 선원, 및 상기 스테이지와 인접하게 배치되어 상기 알파입자 선원에서 조사되는 상기 빔의 조사 각도를 제어하는 빔 제어부를 포함하고, 상기 빔 제어부는 상기 지지 테이블의 상부 영역 내에 매립된 자성체를 포함하고, 상기 자성체는 상기 알파입자 선원과 중첩되는 제1 영역 및 상기 알파입자 선원과 중첩되지 않는 제2 영역을 포함하는 반도체 소자의 검사 장치가 개시되어 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0008] 본 발명이 해결하고자 하는 일 기술적 과제는, 피시험 반도체 소자의 유추된 단면적 값이 고신뢰성을 갖는 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법을 제공하는 데 있다.
- [0009] 본 발명이 해결하고자 하는 다른 기술적 과제는, 선형에너지전달 값(linear energy transfer, LET)의 제공 범위가 좁아 국제적으로 통용되지 못하는 중이온 장비의 한계를 극복할 수 있는 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법을 제공하는 데 있다.
- [0010] 본 발명이 해결하고자 하는 기술적 과제는 상술된 것에 제한되지 않는다.

과제의 해결 수단

- [0011] 상기 기술적 과제를 해결하기 위해, 본 발명은 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법이 제공된다.
- [0012] 일 실시 예에 따르면, 피시험 반도체 소자를 중이온 장비에 제공하여, 베이스 구간의 선형에너지전달(LET, liner energy transfer) 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적(cross section, σ) 값을 측정하는 단계, 상기 피시험 반도체 소자를 펄스 레이저 장비에 제공하고 레이저 에너지 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 측정하는 단계, 및 상기 레이저 에너지 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 이용하여 상기 베이스 구간을 제외한 나머지 구간의 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 유추하는 단계를 포함하고, 상기 베이스 구간은, 상기 중이온 장비의 특성상 상기 중이온 장비가 제공할 수 있는 상기 선형에너지전달 값의 범위인 것을 포함할 수 있다.
- [0013] 일 실시 예에 따르면, 상기 중이온 장비는 상기 베이스 구간의 상기 선형에너지전달 값을 제공하는 것을 포함하고, 상기 중이온 장비와 달리 국제적으로 통용된 중이온 장비는, 상기 베이스 구간 및 상기 나머지 구간의 선형에너지전달 값을 제공하는 장비인 것을 포함하고, 상기 국제적으로 통용된 중이온 장비는, 60LET 이상의 상기 선형에너지전달 값을 상기 피시험 반도체 소자에 제공할 수 있는 것을 포함할 수 있다.
- [0014] 일 실시 예에 따르면, 상기 국제적으로 통용된 중이온 장비에 상기 피시험 반도체 소자를 제공하고 상기 베이스 구간 및 상기 나머지 구간의 상기 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값이 측정되는 것을 포함하고, 상기 국제적으로 통용된 중이온 장비에서 측정된 상기 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값과 상기 펄스 레이저 장비에서 측정된 상기 레이저 에너지 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 이용하여, 상기 레이저 에너지 값과 상기 선형에너지전달 값 사이의 상관 관계가 도출되는 것을 포함할 수 있다.
- [0015] 일 실시 예에 따르면, 상기 레이저 에너지 값과 상기 선형에너지전달 값 사이의 관계가, 상기 펄스 레이저 장비의 레이저 광원에 따라 상이해지는 것을 포함할 수 있다.
- [0016] 일 실시 예에 따르면, 상기 펄스 레이저 장비의 상기 레이저 광원이 단일 광자 흡수(SPA, single photon absorption)이고, 상기 레이저 에너지 값과 상기 선형에너지전달 값의 관계가 선형적으로 비례하는 것을 포함하고, 상기 펄스 레이저 장비의 상기 레이저 광원이 비선형 흡수 이광자(two photon absorption)이고, 상기 선형에너지전달 값이 상기 레이저 에너지 값의 거듭 제곱으로 비례하는 것을 포함할 수 있다.
- [0017] 일 실시 예에 따르면, 상기 피시험 반도체 소자를 상기 중이온 장비에 제공하여 상기 베이스 구간의 상기 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 측정하는 단계에서, 상기 피시험 반도체 소자의 문턱 에너지 값(threshold energy), 또는 포화 단면적(saturation cross section) 값 중에서, 적어도 어느 하나가 확인되지 않는 것을 포함하고, 상기 피시험 반도체 소자를 상기 펄스 레이저 장비에 제공하여 상기 레이저

에너지 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 측정하는 단계와 상기 펄스 레이저 장비의 상기 레이저 에너지 값을 상기 선형에너지전달 값으로 변환시켜 상기 베이스 구간을 제외한 상기 나머지 구간의 상기 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 유추하는 단계에 의해, 상기 피시험 반도체 소자의 상기 문턱 에너지 값, 또는 상기 포화 단면적 값 중에서 적어도 어느 하나 이상이 유추되는 것을 포함할 수 있다.

발명의 효과

- [0018] 본 발명에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법은, 피시험 반도체 소자를 증이온 장비에 제공하여 베이스 구간(예를 들어, 10LET 이상 40LET 이하)의 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 측정하는 단계, 상기 피시험 반도체 소자를 펄스 레이저 장비에 제공하고 레이저 에너지 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 측정하는 단계, 및 상기 레이저 에너지 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 이용하여 상기 베이스 구간을 제외한 나머지 구간(예를 들어, 10LET 미만 40LET 초과)의 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 유추하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0019] 상기 펄스 레이저 장비를 이용하여 상기 레이저 에너지 값에 따라 측정된 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값과 상기 베이스 구간 및 상기 나머지 구간의 상기 선형에너지전달 값을 상기 피시험 반도체 소자에 제공할 수 있는 국제적으로 통용된 증이온 장비를 이용하여 상기 선형에너지전달 값에 따라 측정된 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값이 비교될 수 있다.
- [0020] 이에 따라, 상기 레이저 에너지 값과 상기 선형에너지전달 값의 상관 관계가 도출되어, 상기 레이저 에너지 값이, 상기 베이스 구간 및 상기 나머지 구간의 상기 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값에 대응되도록, 변환된 선형에너지전달 값으로 용이하게 변환될 수 있다.
- [0021] 이에 따라서, 상기 변환된 선형에너지전달 값에 대응되는 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값은 불연속적인 그래프로 표시될 수 있다. 이에 따라, 상기 증이온 장비로 측정할 수 없었던 상기 나머지 구간의 상기 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값이 용이하게 유추될 수 있다.
- [0022] 유추된 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값은, 상기 국제적으로 통용된 증이온 장비를 이용하여 측정된 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값과 실질적으로 동일한 값을 가지므로, 높은 신뢰성을 가질 수 있다.
- [0023] 그리고, 상기 불연속적인 그래프를 Weibull fitting 방법으로 연속적인 그래프로 피팅하여, 상기 증이온 장비로 확인할 수 없었던 상기 나머지 구간의 상기 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 문턱 에너지 값 및/또는 포화 단면적 값이 용이하게 계산될 수 있다.
- [0024] 계산된 상기 문턱 에너지 값 및/또는 상기 포화 단면적 값은, 상기 국제적으로 통용된 증이온 장비를 이용하여 측정된 상기 피시험 반도체 소자의 문턱 에너지 값 및/또는 상기 포화 단면적 값과 일치하므로, 높은 신뢰성을 가질 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0025] 도 1은 본 출원의 실시 예에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법을 설명하기 위한 순서도이다.
- 도 2는 본 출원의 실시 예에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법을 설명하기 위한 도면이다.
- 도 3은 본 발명의 비교 예 1에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 측정된 단면적 값과 실험 예 1에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 유추된 단면적 값을 비교하기 위한 그래프이다.
- 도 4는 본 발명의 비교 예 1에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 측정된 단면적 값과 실험 예 2에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 유추된 단면적 값을 비교하기 위한 그래프이다.
- 도 5는 본 발명의 실험 예 3 및 실험 예 4에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법에서 피시험 반도체 별로 선형에너지전달 값과 레이저 에너지 값과 상관 관계를 비교하기 위한 그래프이다.
- 도 6는 본 발명의 실험 예 3에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 유추된 단면적 값을 나타낸 그래프이다.
- 도 7은 본 발명의 비교 예 1에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 측정된 피시험 반도체 소자의 단면적 값과 실험 예 1에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 측정된 반도체 소자의 단면적

값을 비교하기 위한 그래프이다.

도 8은 본 발명의 비교 예 1에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 측정된 피시험 반도체 소자의 단면적 값과 실험 예 5에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 측정된 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 비교하기 위한 그래프이다.

도 9은 본 발명의 실험 예 5에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 측정된 피시험 반도체 소자의 단면적 값과 실험 예 6에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 유추된 단면적 값을 비교하기 위한 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0026] 이하, 첨부된 도면들을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시 예를 상세히 설명할 것이다. 그러나 본 발명의 기술적 사상은 여기서 설명되는 실시 예에 한정되지 않고 다른 형태로 구체화될 수도 있다. 오히려, 여기서 소개되는 실시 예는 개시된 내용이 철저하고 완전해질 수 있도록 그리고 당업자에게 본 발명의 사상이 충분히 전달될 수 있도록 하기 위해 제공되는 것이다.
- [0027] 본 명세서에서, 어떤 구성요소가 다른 구성요소 상에 있다고 언급되는 경우에 그것은 다른 구성요소 상에 직접 형성될 수 있거나 또는 그들 사이에 제 3의 구성요소가 개재될 수도 있다는 것을 의미한다. 또한, 도면들에 있어서, 막 및 영역들의 두께는 기술적 내용의 효과적인 설명을 위해 과장된 것이다.
- [0028] 또한, 본 명세서의 다양한 실시 예들에서 제1, 제2, 제3 등의 용어가 다양한 구성요소들을 기술하기 위해서 사용되었지만, 이들 구성요소들이 이 같은 용어들에 의해서 한정되어서는 안 된다. 이들 용어들은 단지 어느 구성요소를 다른 구성요소와 구별시키기 위해서 사용되었을 뿐이다. 따라서, 어느 한 실시 예에 제 1 구성요소로 언급된 것이 다른 실시 예에서는 제 2 구성요소로 언급될 수도 있다. 여기에 설명되고 예시되는 각 실시 예는 그것의 상보적인 실시 예도 포함한다. 또한, 본 명세서에서 '및/또는'은 전후에 나열한 구성요소들 중 적어도 하나를 포함하는 의미로 사용되었다.
- [0029] 명세서에서 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한 복수의 표현을 포함한다. 또한, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 명세서상에 기재된 특징, 숫자, 단계, 구성요소 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징이나 숫자, 단계, 구성요소 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 배제하는 것으로 이해되어서는 안 된다. 또한, 본 명세서에서 "연결"은 복수의 구성요소를 간접적으로 연결하는 것, 및 직접적으로 연결하는 것을 모두 포함하는 의미로 사용된다.
- [0030] 또한, 하기에 본 발명을 설명함에 있어 관련된 공지 기능 또는 구성에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우에는 그 상세한 설명은 생략할 것이다.
- [0032] 도 1은 본 출원의 실시 예에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법을 설명하기 위한 순서도이고, 도 2는 본 출원의 실시 예에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법을 설명하기 위한 도면이다.
- [0033] 도 1 및 도 2를 참조하면, 피시험 반도체 소자를 중이온 장비에 제공하여 베이스 구간의 선형에너지전달(LET, linear energy transfer) 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적(cross section, σ) 값이 측정된다(S100).
- [0034] 본 출원 명세서에서 상기 중이온 장비는 상기 중이온 장비의 특성상 상기 피시험 반도체 소자에 상기 베이스 구간의 상기 선형에너지전달 값을 제공할 수 있는 장비를 의미한다. 예를 들어, 상기 중이온 장비는, 국내에서 한 과학기술연구원(KIST)가 보유중인 6MV 중이온 장비일 수 있다.
- [0035] 그리고, 국제적으로 통용된 중이온 장비는 상기 베이스 구간과 상기 베이스 구간의 제외한 나머지 구간의 선형에너지전달 값을 제공할 수 있는 장비를 의미한다. 예를 들어, 상기 국제적으로 통용된 중이온 장비는, RADEF(RADIATION EFFECTS FACILITY, in Finland), TAMU(Texas A&M Univ.) REFHIT(RADIATION EFFECTS FACILITY HEAVY ION TESTING, in USA), BNL(BROOKHAVEN NATIONAL LABORATORY, in USA), LBNL(LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY, in USA), FRIB(FACILITY FOR RARE ISOTOPE BEAMS, in USA), ANIL(Grand Accelérateur National d'Ions Lourds, in France), CYCLONE(CYCLOTRON OF LOUVAIN LA NEUVS, in Netherlands), KVI-CART(Kernfysisch Versneller Instituut-Center for Advanced Radiation Technology, in Netherlands), GSI(Gesellschaft für Schwerionenforschung, in Germany), CERN Heavy ion(in Swiss & France), HIF-UCL(Heavy Ions Facility-Université Catholique de Louvain, in Belgium) 중에서 어느 하나일 수 있다.

- [0036] 그리고, 본 출원 명세서에서 상기 피시험 소자의 단면적 값은, 상기 피시험 반도체 소자에 발생하는 에러(error)의 개수를 의미한다.
- [0037] 일 실시 예에 따르면, 상기 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값의 σ 는, 아래의 <수학식 1>로 표기될 수 있다. 예를 들어, 상기 피시험 반도체 소자는, 우주 환경에서 이용될 수 있는 반도체 소자일 수 있다. 예를 들어, 상기 피시험 반도체 소자는, Cypress SRAM, 및 ISSI SRAM를 포함할 수 있다.
- [0038] <수학식 1>
- [0039]
$$\sigma = N_{SEU} / \phi_{beam}$$
- [0040] 상기 <수학식 1>에서, N_{SEU} 는 상기 중이온 장비에 제공된 상기 피시험 반도체 소자에 상기 선형에너지전달 값이 제공될 때, 상기 피시험 반도체 소자에서 감지되는 에러의 개수이고, ϕ_{beam} 은 상기 중이온 장비에 제공된 상기 피시험 반도체 소자에 제공된 상기 선형에너지전달 값을 의미한다.
- [0041] 그리고, 상기 중이온 장비의 특성상 상기 베이스 구간의 상기 선형에너지전달 값은, 10LET 이상 40LET 이하일 수 있다. 다른 예를 들어, 상기 베이스 구간의 선형에너지전달 값은, 13LET 이상 40LET 이하일 수 있다. 또 다른 예를 들어, 상기 베이스 구간의 선형에너지전달 값은, 9LET 이상 45LET 이하일 수 있다.
- [0042] 이에 따라, 도 2의 (c)에 도시된 바와 같이, 상기 중이온 장비를 이용하여, 상기 베이스 구간의 상기 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값이 측정될 수 있다.
- [0043] 하지만, 상기 중이온 장비를 이용하여 상기 나머지 구간의 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 측정하는 것이 불가능할 수 있다. 이에 따라서, 상기 나머지 구간의 상기 선형에너지전달 값 범위에서, 우주 환경에서 상기 피시험 반도체 소자의 오류 및 오동작과 관련된 문턱 에너지(threshold energy) 값, 및 포화 단면적(saturation cross section) 값 중에서 적어도 어느 하나 이상이 확인되지 않을 수 있다.
- [0044] 도 1 및 도 2를 참조하면, 상기 피시험 반도체 소자를 펄스 레이저 장비에 제공하고 레이저 에너지 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값이 측정된다(S200).
- [0045] 일 실시 예에 따르면, 상기 레이저 에너지 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값(σ_{Laser})은, 아래의 <수학식 2>로 표기될 수 있다.
- [0046] <수학식 2>
- [0047]
$$\sigma_{Laser} = \text{Error 발생 개수} / \text{주입된 레이저 펄스 개수}$$
- [0048] 상기 <수학식 2> 의해, 상기 피시험 반도체 소자에 제공되는 상기 레이저 에너지 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값이 측정될 수 있다. 예를 들어, 상기 펄스 레이저 장비는, 펨토 초 펄스 레이저일 수 있다. 예를 들어, 상기 펄스 레이저 장비의 펄스 폭은, 100~500fs일 수 있다. 예를 들어, 상기 펄스 레이저 장비의 레이저 광원은, 단일 광자 흡수(SPA, single photon absorption) 이거나 비선형 흡수 이광자(two photon absorption)일 수 있다. 이에 따라, 상기 펄스 레이저 장비의 레이저 광원에 따라서, 상기 레이저 에너지 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값이 다르게 측정될 수 있다.
- [0049] 그리고, 상기 국제적으로 통용된 중이온 장비를 이용하여, 도 2의 (a)에 도시된 바와 같이, 상기 베이스 구간 및 상기 나머지 구간의 상기 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값이 측정될 수 있다. 예를 들어, 상기 베이스 구간은, 10LET 이상 40LET 이하일 수 있다. 예를 들어, 상기 나머지 구간은, 10LET 미만 및 40LET 초과일 수 있다.
- [0050] 이에 따라, 상기 국제적으로 통용된 중이온 장비에서 측정된 상기 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값(도 2의 (a))과 상기 펄스 레이저 장비에서 측정된 상기 레이저 에너지 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 비교하여, 상기 레이저 에너지 값과 상기 선형에너지전달 값 사이의 상관 관계가 도출될 수 있다.
- [0051] 상기 국제적으로 통용된 중이온 장비의 상기 선형에너지전달 값과 상기 펄스 레이저 장비의 상기 레이저 에너지 값이 상관 관계를 갖는 이유는, 상기 국제적으로 인증된 중이온 장비에서 상기 피시험 반도체 소자에 제공되는 상기 선형에너지전달 값에 의해, 상기 피시험 반도체 소자의 기관에서 발생하는 전자 전공 쌍(EHP, electron hole pair)에 영향을 주어 상기 피시험 반도체 소자의 동작에 영향을 주는 점과 상기 펄스 레이저 장비에서 상

기 피시험 반도체 소자에 제공되는 상기 레이저 에너지 값에 의해, 상기 피시험 반도체 소자의 기관에서 발생되는 전자 전공 쌍에 영향을 주어 상기 피시험 반도체 소자의 동작에 영향을 주는 점이 서로 유사하기 때문이다.

[0052] 상술된 바와 같이, 상기 펄스 레이저 장비의 상기 레이저 광원에 따라, 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값이 다르게 측정되므로, 상기 국제적으로 통용된 중이온 장비의 상기 선형에너지전달 값과 상기 펄스 레이저 장비의 상기 레이저 에너지 값 사이의 상관 관계가 달라질 수 있다.

[0053] 일 실시 예에 따르면, 상기 펄스 레이저 장비의 상기 레이저 광원이 단일 광자 흡수(SPA, single photon absorption) 경우, 상기 선형에너지전달 값은 상기 레이저 에너지 값에 대해 선형적으로 비례할 수 있다. 구체적으로, 상기 레이저 에너지 값과 상기 선형에너지전달 값의 상관 관계는, 아래의 <수학식 3>으로 표시될 수 있다.

[0054] <수학식 3>

[0055] $LET \propto (\alpha E) \cdot e^{-\alpha z}$

[0056] 상기 <수학식 3>에서 α 는 단일 광자 흡수 비례 상수이고, E는 레이저 에너지이고, e는 지수함수이고, z는 z축 방향으로 입사하는 빔(Beam)일 수 있다. 이에 따라, 상기 <수학식 3>은 아래의 <수학식 3-1>로 정리될 수 있다.

[0057] <수학식 3-1>

[0058] $LET = A \cdot E \quad (A = \alpha_s e^{-\alpha z})$

[0059] 상기 <수학식 3-1>에서 상기 α_s 는 단일 광자 흡수 비례 상수일 수 있다. 따라서, 상기 <수학식 3> 및 상기 <수학식 3-1> 의해, 상기 펄스 레이저 장비의 상기 레이저 광원이 단일 광자 흡수인 경우, 상기 레이저 에너지 값과 상기 선형에너지전달 값의 상관 관계가, 선형적으로 비례하는 것을 알 수 있다.

[0060] 일 실시 예에 따르면, 상기 펄스 레이저 장비의 상기 레이저 광원이 비선형 흡수 이광자(two photon absorption)인 경우, 상기 선형에너지전달 값이 상기 레이저 에너지 값의 거듭 제곱으로 비례할 수 있다. 구체적으로, 상기 레이저 에너지 값과 상기 선형에너지전달 값의 상관 관계는, 아래의 <수학식 4>로 표시될 수 있다.

[0061] <수학식 4>

[0062] $LET \propto (\beta_2 E^2 / \omega_0^2 \tau) \cdot e^{-\alpha z} \cdot S(z, z_{foc})$

[0063] 상기 <수학식 4>에서 β_2 는 비선형 흡수 비례 상수이고, E는 레이저 에너지이고, ω_0 는 각진동수(예를 들어, $2\pi V_0$, 여기서 V_0 는 진동수(Hz))이고, τ 는 펄스 시간(예를 들어, ~100fs)이고, $S(z, z_{foc})$ 는 초점이 잡힌 펄스 레이저의 에너지 공간 분포 함수이고, z_{foc} 는 펄스 레이저 광원의 표면에서 피시험 반도체 소자의 표면 상에 초점이 잡힌 위치까지의 수직 거리(예를 들어, z축)일 수 있다. 이에 따라, 상기 <수학식 4>는 아래의 <수학식 4-1>로 정리될 수 있다.

[0064] <수학식 4-1>

[0065] $LET = B \cdot E^2 \quad (B = (\beta_T \cdot S) / \omega_0^2 \tau)$

[0066] 상기 <수학식 4-1>에서 β_T 는 비선형 흡수 비례 상수이고, S는 초점이 잡힌 펄스 레이저의 에너지 공간 분포 함수일 수 있다. 따라서, 상기 <수학식 4> 및 상기 <수학식 4-1> 의해, 상기 펄스 레이저 장비의 상기 레이저 광원이 비선형 흡수 이광자인 경우, 상기 레이저 에너지 값과 상기 선형에너지전달 값의 상관 관계가 거듭 제곱으로 비례하는 것을 알 수 있다.

[0067] 따라서, 상기 레이저 에너지 값과 상기 선형에너지전달 값 사이의 상관 관계를 이용하여, 상기 레이저 에너지 값이, 상기 베이스 구간 및 상기 나머지 구간의 상기 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값에 대응되도록, 변환된 선형에너지전달 값(Equivalent LET)으로 변환될 수 있다.

[0068] 도 1 및 도 2를 참조하면, 상기 레이저 에너지 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 이용하여, 상

기 베이스 구간을 제외한 상기 나머지 구간의 상기 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값이 유추된다(S300).

- [0069] 일반적으로, 상기 피시험 반도체 소자에 제공되는 상기 선형에너지전달 값이 동일하면, 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값이 동일하게 측정된다.
- [0070] 따라서, 상기 S200 단계로부터 측정된 상기 레이저 에너지 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값 중에서, 상기 변환된 선형에너지전달 값에 대응되는 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값이, 도 2의 (d)에서 파란색 실선으로 도시된 바와 같이, 불연속적인 그래프로 도시될 수 있다. 따라서, 상기 중이온 장비가 측정할 수 없었던 상기 나머지 구간의 상기 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값이 유추될 수 있다.
- [0071] 그리고, 아래의 <수학식 5>를 이용하여, 상기 불연속적인 그래프가 연속적인 그래프로 피팅될 수 있다. 예를 들어, 상기 <수학식 5>는 Weibull fitting을 위한 일반적인 수학적일 수 있다.
- [0072] <수학식 5>
- [0073]
$$F(x) = A[1 - \exp(-((x - x_0)/P_w)^s)]$$
- [0074] 상기 <수학식 5>에서, $F(x)$ 는 상기 피시험 반도체 소자의 유추된 단면적 값이고, A 는 포화 단면적(saturation cross section)이고, x 축은 에너지 값(예를 들어, 선형에너지전달 값(LET))에 해당되는 변수이고, x_0 는 stopping power threshold이고, P_w 는 width parameter이고, s 는 dimensionless exponent로 전체적인 곡선의 형태를 결정하는 계수이다. 이에 따라, 상기 변환된 선형에너지전달 값에 대응되는 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 나타내는 상기 불연속적인 그래프가, 상기 <수학식 5>에 의해, 연속적인 그래프로 피팅될 수 있다. 이에 따라서, 상기 중이온 장비를 이용하여 확인하기 어려웠던 상기 나머지 구간에서의 상기 피시험 반도체 소자에 제공되는 에너지 값에 따라 에너지 발생되는 상기 문턱 에너지 값, 및 상기 피시험 반도체 소자에 제공되는 에너지 값이 증가함에 따라 에너지가 더 이상 발생하지 않고 포화되는 상기 포화 단면적 값 중에서 적어도 어느 하나 이상이, 용이하게 계산될 수 있다.
- [0075] 결론적으로, 본 출원의 실시 예에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법은, 상기 피시험 반도체 소자를 상기 중이온 장비에 제공하여 상기 베이스 구간의 상기 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 측정하는 단계, 상기 피시험 반도체 소자를 상기 펄스 레이저 장비에 제공하고 상기 레이저 에너지 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 측정하는 단계, 및 상기 레이저 에너지 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 이용하여 상기 베이스 구간을 제외한 상기 나머지 구간의 상기 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 유추하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0076] 상기 펄스 레이저 장비를 이용하여 상기 레이저 에너지 값에 따라 측정된 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값과 상기 베이스 구간 및 상기 나머지 구간의 상기 선형에너지전달 값을 제공할 수 있는 상기 국제적으로 통용된 중이온 장비를 이용하여 상기 선형에너지전달 값에 따라 측정된 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값이 비교될 수 있다.
- [0077] 이에 따라, 상기 레이저 에너지 값과 상기 선형에너지전달 값의 상관 관계가 도출되어, 상기 레이저 에너지 값이 상기 베이스 구간 및 상기 나머지 구간의 상기 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값에 대응되도록, 상기 변환된 선형에너지전달 값으로 용이하게 변환될 수 있다.
- [0078] 이에 따라서, 상기 변환된 선형에너지전달 값에 대응되는 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값이 상기 불연속적인 그래프로 표시될 수 있다. 이에 따라, 상기 중이온 장비로 측정할 수 없었던 상기 나머지 구간의 상기 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값이 용이하게 유추될 수 있다.
- [0079] 유추된 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값은, 상기 국제적으로 통용된 중이온 장비를 이용하여 측정된 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값과 실질적으로 동일한 값을 가지므로, 높은 신뢰성을 가질 수 있다.
- [0080] 그리고, 상기 불연속적인 그래프를 Weibull fitting을 방법으로 연속적인 그래프로 피팅하여, 상기 중이온 장비로 측정할 수 없었던 상기 나머지 구간의 상기 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 상기 문턱 에너지 값 및/또는 상기 포화 단면적 값이 용이하게 계산될 수 있다.
- [0081] 계산된 상기 문턱 에너지 값 및/또는 상기 포화 단면적 값은, 상기 국제적으로 통용된 중이온 장비를 이용하여

측정된 상기 피시험 반도체 소자의 문턱 에너지 값 및/또는 상기 포화 단면적 값과 일치하므로, 높은 신뢰성을 가질 수 있다.

- [0083] 이하, 본 발명의 실시 예에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법 대한 구체적인 실험 예 및 특성 평가 결과가 설명된다.
- [0085] 도 3은 본 발명의 비교 예 1에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 측정된 단면적 값과 실험 예 1에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 유추된 단면적 값을 비교하기 위한 그래프이다.
- [0086] 도 3의 (a)를 참조하면, 비교 예 1에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법은, 국제적으로 통용된 증이온 장비(제공 가능한 선형에너지전달 값; 2LET ~ 85.6LET)에, 피시험 반도체 소자(Cypress SRAM, ISSI SRAM)를 각각 제공하여, 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 각각 측정하는 방법으로 진행되었다. 그리고, 본 출원의 실시 예에서 상술된 <수학식 5>를 이용하여, 불연속적인 그래프를 연속적인 그래프로 피팅하여, 상기 피시험 반도체 소자의 문턱 에너지 값과 포화 단면적 값을 확인하였다. 도 3의 (b)를 참조하면, 실험 예 1에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법은, 레이저 장비(SPA 광원, 펄스 폭 800fs~1,200fs)를 이용하여 상기 피시험 반도체 소자(Cypress SRAM, ISSI SRAM) 각각에 대해 단면적을 측정하는 방법으로 진행되었다. 그리고, 본 출원의 실시 예에서 상술된 <수학식 3> 및 <수학식 3-1>을 이용하여, 레이저 에너지 값을 선형에너지전달 값으로 변환시켰다. 그리고, 본 출원의 실시 예에서 상술된 <수학식 5>를 이용하여, 불연속적인 그래프를 연속적인 그래프로 피팅하여, 상기 피시험 반도체 소자의 문턱 에너지 값과 포화 단면적 값을 확인하였다.
- [0087] 도 3의 (a) 및 (b)에서 알 수 있듯이, 비교 예 1에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 측정된 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값과 실험 예 1에 따른 상기 피시험 반도체 내방사선 평가 방법으로 측정된 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 비교하면, 서로 유사한 것을 알 수 있고, 또한, 상기 피시험 반도체 소자(Cypress SRAM, ISSI SRAM)의 문턱 에너지 값과 포화 단면적 값이 서로 일치하는 것을 알 수 있다.
- [0088] 그리고, 실험 예 1에 따른 상기 피시험 반도체 내방사선 평가 방법에서, 상기 피시험 반도체 소자가 Cypress SRAM인 경우, 변환된 선형에너지전달 값은 110LET까지 확장되는 것을 알 수 있다. 또한, 상기 피시험 반도체 소자가 ISSI SRAM인 경우, 변환된 선형에너지전달 값은 70LET까지 확장되는 것을 알 수 있다.
- [0090] 도 4는 본 발명의 비교 예 1에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 측정된 단면적 값과 실험 예 2에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 유추된 단면적 값을 비교하기 위한 그래프이다.
- [0091] 도 4의 (a)를 참조하면, 비교 예 1에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법은, 국제적으로 통용된 증이온 장비(2LET ~ 85.6LET)에, 피시험 반도체 소자(Cypress SRAM)를 제공하여, 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 각각 측정하는 방법으로 진행되었다. 그리고, 본 출원의 실시 예에서 상술된 <수학식 5>를 이용하여, 불연속적인 그래프를 연속적인 그래프로 피팅하여, 상기 피시험 반도체 소자의 문턱 에너지 값과 포화 단면적 값을 확인하였다. 도 4의 (b)를 참조하면, 실험 예 2에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법은, 레이저 장비(TPA 광원, 펄스 폭 100fs~500fs)를 이용하여 상기 피시험 반도체 소자(Cypress SRAM)에 대해 단면적을 측정하는 방법으로 진행되었다. 그리고, 본 출원의 실시 예에서 상술된 <수학식 4> 및 <수학식 4-1>을 이용하여, 레이저 에너지 값을 선형에너지전달 값으로 변환시켰다. 그리고, 본 출원의 실시 예에서 상술된 <수학식 5>를 이용하여, 불연속적인 그래프를 연속적인 그래프로 피팅하여, 상기 피시험 반도체 소자의 문턱 에너지 값과 포화 단면적 값을 확인하였다.
- [0092] 도 4의 (a) 및 (b)에서 알 수 있듯이, 비교 예 1에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 측정된 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값과 실험 예 2에 따른 상기 피시험 반도체 내방사선 평가 방법으로 측정된 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 비교하면, 서로 유사한 것을 알 수 있고, 또한, 상기 피시험 반도체 소자(Cypress SRAM)의 문턱 에너지 값과 포화 단면적 값이 서로 일치하는 것을 알 수 있다.
- [0093] 그리고, 실험 예 2에 따른 상기 피시험 반도체 내방사선 평가 방법에서, 상기 피시험 반도체 소자가 Cypress SRAM인 경우, 변환된 선형에너지전달 값은 120LET까지 확장되는 것을 알 수 있다.
- [0095] [표 1]은 본 발명의 실험 예 1 및 실험 예 2에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법에서 펄스 레이저 장비를 이용하여 측정된 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 비교하기 위한 표이다.
- [0096] [표 1]을 참조하면, 도 3의 (b)에서 상술된 실험 예 1에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로, 펄스 레이저 장비(SPA 광원, 펄스 폭 800fs~1,200fs)를 이용하여 상기 피시험 반도체 소자(Cypress SRAM, ISSI

SRAM) 각각에 대해 단면적을 측정하였다. 그리고, 도 4의 (b)에서 상술된 실험 예 2에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로, 펄스 레이저 장비(TPA 광원, 펄스 폭 100fs~500fs)를 이용하여 상기 피시험 반도체 소자(Cypress SRAM)에 대해 단면적을 측정하였다.

[0097] [표 1]에서 알 수 있듯이, 실험 예 1에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 측정된 상기 피시험 반도체 소자(Cypress SRAM)의 단면적 값이, 실험 예 2에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 측정된 상기 피시험 반도체 소자(Cypress SRAM)의 단면적 값보다, 제공된 레이저 에너지 값 별로 낮은 것을 알 수 있다.

표 1

레이저 에너지 값(nJ)	실험 예 1에 따른 Cypress SRAM의 Mbit 당 단면적 값 (σ /Mbit)	실험 예 1에 따른 ISSI SRAM의 Mbit 당 단면적 값(σ /Mbit)	실험 예 2 Cypress SRAM의 Mibit 당 단면적 값(σ /Mbit)
0.1	0.145	0.004	9.00×10^{-5}
0.15	0.19	0.0115	-
0.2	0.205	0.0165	6.00×10^{-3}
0.3	0.225	0.025	1.10×10^{-2}
0.4	0.235	0.03	1.20×10^{-1}
0.5	0.245	0.0325	1.90×10^{-1}
0.6	0.2425	0.034	1.90×10^{-1}

[0099] 도 5는 본 발명의 실험 예 3 및 실험 예 4에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법에서 피시험 반도체 별로 선형에너지전달 값과 레이저 에너지 값과 상관 관계를 비교하기 위한 그래프이고, 도 6는 본 발명의 실험 예 3에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 유추된 단면적 값을 나타낸 그래프이다.

[0100] 도 5의 (a)를 참조하면, 실험 예 3에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법은, 국제적으로 통용된 중이온 장비(2LET ~ 85.6LET)를 이용하여 피시험 반도체 소자(Cypress SRAM, ISSI SRAM) 별로 측정된 단면적 값과, 펄스 레이저 장비(SPA, 펄스 폭 800fs~1,200fs)를 이용하여 상기 피시험 반도체 소자 별로 측정된 단면적 값을 측정하는 방법으로 진행되었다. 그리고, 선형에너지전달 값($\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$)과 레이저 에너지 값(nJ)의 상관 관계를 그래프로 나타냈다. 도 5의 (b)를 참조하면, 실험 예 4에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법은, 국제적으로 통용된 중이온 장비(2LET ~ 85.6LET)를 이용하여 피시험 반도체 소자(Cypress SRAM, ISSI SRAM) 별로 측정된 단면적 값과, 펄스 레이저 장비(TPA, 펄스 폭 100fs~500fs)를 이용하여 상기 피시험 반도체 소자 별로 측정된 단면적 값을 측정하는 방법으로 진행되었다. 그리고, 선형에너지전달 값($\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$)과 레이저 에너지 값(nJ)의 상관 관계를 그래프로 나타냈다. 구체적으로, 도 5 (a) 및 (b)에 도시된 빨간색 실선은, Cypress SRAM에 대한 선형에너지전달 값($\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$)과 레이저 에너지 값(nJ)의 상관 관계를 나타내고, 녹색 실선은 ISSI SRAM에 대한 선형에너지전달 값($\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$)과 레이저 에너지 값(nJ)의 상관 관계를 나타내고, 보라색 실선은 빨간색 실선과 녹색 실선의 평균을 나타낸 것이다.

[0101] 도 6의 (a)를 참조하면, 도 5의 (a)에 도시된 상기 피시험 반도체 소자(Cypress SRAM, ISSI SRAM)의 선형에너지전달 값($\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$)과 레이저 에너지 값(nJ)과 상관 관계인 기울기 값을 이용하여, 레이저 에너지 값을 선형에너지전달 값으로 변환시키고, 변환된 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자(Cypress SRAM, ISSI SRAM)의 단면적 값을 그래프로 나타냈다. 도 6의 (b)를 참조하면, 도 5의 (a)에서 보라색으로 도시된 Cypress SRAM와 ISSI SRAM의 선형에너지전달 값($\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$)과 레이저 에너지 값(nJ)의 평균 상관 관계인 기울기 값을 이용하여, 레이저 에너지 값을 선형에너지전달 값으로 변환시키고, 변환된 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자(Cypress SRAM, ISSI SRAM)의 단면적 값을 그래프로 나타냈다.

[0102] 도 5의 (a) 및 (b)에서 알 수 있듯이, 펄스 레이저 장비의 광원이 SPA인 경우, 선형에너지전달 값과 레이저 에너지 값은 선형적으로 비례하는 것을 알 수 있다. 이와 달리, 펄스 레이저 장비의 광원이 TPA인 경우, 선형에너지

지전달 값과 레이저 에너지 값은 서로 거듭 제곱으로 비례하는 것을 알 수 있다.

- [0103] 도 6의 (a) 및 (b)에서 알 수 있듯이, 상기 피시험 반도체 소자(Cypress SRAM, ISSI SRAM) 별로 선형에너지전달 값과 레이저 에너지 값의 상관 관계를 이용한 상기 피시험 반도체 소자(Cypress SRAM, ISSI SRAM)의 단면적 값과, Cypress SRAM과 레이저 에너지 값의 상관 관계와 ISSI SRAM의 선형에너지전달 값과 레이저 에너지 값의 상관 관계의 평균 값(평균 상관 관계)을 적용한 상기 피시험 반도체 소자(Cypress SRAM, ISSI SRAM)의 단면적 값을 비교하면, 상기 피시험 반도체 소자(Cypress SRAM, ISSI SRAM)의 단면적 값이 서로 유사한 것을 알 수 있다.
- [0105] 도 7은 본 발명의 비교 예 1에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 측정된 피시험 반도체 소자의 단면적 값과 실험 예 1에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 측정된 반도체 소자의 단면적 값을 비교하기 위한 그래프이다.
- [0106] 도 7의 (a)를 참조하면, 비교 예 1에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법은, 국제적으로 통용된 중이온 장비(2LET ~ 85.6LET)를 이용하여 선형에너지전달 값에 따른 피시험 반도체 소자 피시험 반도체 소자(Cypress SRAM, ISSI SRAM)의 단면적 값을 측정하는 방법으로 진행되었다. 도 7의 (b)를 참조하면, 실험 예 1에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법은, 펄스 레이저 장비(SPA 광원, 펄스 폭 800fs~1,200fs)를 이용하여 레이저 에너지 값(nJ)에 따른 상기 피시험 반도체 소자(Cypress SRAM, ISSI SRAM)의 단면적 값을 각각 측정하는 방법으로 진행되었다.
- [0107] 도 7의 (a) 및 (b)에서 알 수 있듯이, 비교 예 1에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 측정된 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값과, 실험 예 1에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 측정된 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 비교하면, Cypress SRAM의 경우에 문턱 에너지 값 주위에서 Cypress SRAM의 단면적 값이 급격하게 감소되는 현상과 ISSI SRAM의 경우에 문턱 에너지 에너지 값 주위에서 ISSI SRAM 단면적 값이 Cypress SRAM에 보다 완만하게 감소되는 현상이, 서로 동일하게 관찰된 것을 알 수 있다. 이에 따라서, 상기 국제적으로 통용된 중이온 장비의 상기 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값과 상기 펄스 레이저 장비의 상기 레이저 에너지 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값의 그래프 사이에 상관 관계가 있는 것을 알 수 있다.
- [0109] 도 8은 본 발명의 비교 예 1에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 측정된 피시험 반도체 소자의 단면적 값과 실험 예 5에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 측정된 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 비교하기 위한 그래프이다.
- [0110] 도 8을 참조하면, 비교 예 1(RADEF)에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법은, 국제적으로 통용된 중이온 장비(2LET ~ 85.6LET)에, 피시험 반도체 소자(Cypress SRAM, ISSI SRAM)를 각각 제공하여, 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 각각 측정하는 방법으로 진행되었다. 그리고, 실험 예 5(KIST)에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법은 중이온 장비(13LET 이상 40LET 이하)에 상기 피시험 반도체 소자(Cypress SRAM, ISSI SRAM)를 각각 제공하고, 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 측정하였다. 그리고, 그 결과를 <표 2>로 정리하였다. 그리고, 비교 예 1(RAFDEF)에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 측정된 상기 피시험 반도체 소자(Cypress SRAM, ISSI SRAM)의 단면적 값과 실험 예 5(KIST)에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 측정된 상기 피시험 반도체 소자(Cypress SRAM, ISSI SRAM)의 단면적 값을 본 발명의 실시 예에서 상술된 <수학식 5>를 이용하여, 연속적인 그래프로 도시화하였다.
- [0111] 도 8과 <표 2>에서 알 수 있듯이, 동일한 구간(13LET 이상 40LET 이하)의 선형에너지전달 값에서, 비교 예 1에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 측정된 상기 피시험 반도체 소자(Cypress SRAM, ISSI SRAM)의 단면적 값과 실험 예 5에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 측정된 상기 피시험 반도체 소자(Cypress SRAM, ISSI SRAM)의 단면적 값이 실질적으로 유사한 것을 알 수 있다.
- [0112] 그리고, 비교 예 1에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 측정된 상기 피시험 반도체 소자(Cypress SRAM, ISSI SRAM)의 단면적 값에 상기 추세선을 적용시킨 값들을 살펴보면, 상기 피시험 반도체 소자에 대한 문턱 에너지 값과 포화 단면적 값이 관찰된 것을 알 수 있다.
- [0113] 이와 달리, 실험 예 5에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 측정된 상기 피시험 반도체 소자(Cypress SRAM, ISSI SRAM)의 단면적 값에 상기 추세선을 적용시킨 값들을 살펴보면, 상기 피시험 반도체 소자의 포화 단면적 값이 관찰되었지만, 상기 중이온 장비의 특성상 13LET 미만의 선형에너지전달 값을 제공하

지 못하므로, 상기 피시험 반도체 소자(Cypress SRAM, ISSI SRAM)에 대한 문턱 에너지 값의 확인이 불가능한 것을 알 수 있다.

표 2

선형에너지전달 값 (MeV · cm ² /mg)	비교 예 1에 따른 Cypress SRAM의 Mbit 당 단면적 값(σ /Mbit)	비교 예 1에 따른 ISSI SRAM의 Mbit 당 단면적 값(σ /Mbit)	선형에너지전달 값 (MeV · cm ² /mg)	실험 예 1에 따른 Cypress SRAM의 Mbit 당 단면적 값(σ /Mbit)	실험 예 1에 따른 ISSI SRAM의 Mbit 당 단면적 값(σ /Mbit)
2.3	9.20x10 ⁻³	5.80x10 ⁻⁴	14.3	2.15x10 ⁻¹	1.85x10 ⁻²
7.2	1.10x10 ⁻¹	6.20x10 ⁻³	20.4	2.27x10 ⁻¹	2.80x10 ⁻²
13.3	1.80x10 ⁻¹	1.50x10 ⁻²	30	2.35x10 ⁻¹	3.50x10 ⁻²
24.5	1.90x10 ⁻¹	2.70x10 ⁻²	40	2.46x10 ⁻¹	3.60x10 ⁻²
45.5	1.90x10 ⁻¹	3.00x10 ⁻²	-	-	-
60	1.91x10 ⁻¹	3.10x10 ⁻²	-	-	-

[0115] 도 9는 본 발명의 실험 예 5에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 측정된 피시험 반도체 소자의 단면적 값과 실험 예 6에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 유추된 단면적 값을 비교하기 위한 그래프이다.

[0116] 도 9의 (a)를 참조하면, 실험 예 5(KIST)에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법은 중이온 장비(10LET 이상 40LET 이하)에 피시험 반도체 소자(Cypress SRAM, ISSI SRAM)를 각각 제공하고, 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 각각 측정하였다. 도 9의 (b)를 참조하면, 실험 예 6에 따른 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법은 중이온 장비(10LET 이상 40LET 이하)와 펄스 레이저 장비(SPA 광원, 펄스 폭 800fs-1,200fs)를 이용하여 상기 피시험 반도체 소자(Cypress SRAM, ISSI SRAM)의 단면적을 각각 측정하였고, 본 출원의 실시 예에서 상술된 <수학식 3> 및 <수학식 3-1>을 이용하여, 레이저 에너지 값과 선형에너지전달 값의 상관 관계를 이용하여, 10LET 미만 및 40LET를 초과하는 선형에너지전달 값에 따른 상기 피시험 반도체(Cypress SRAM, ISSI SRAM)의 단면적 값을 유추하였다.

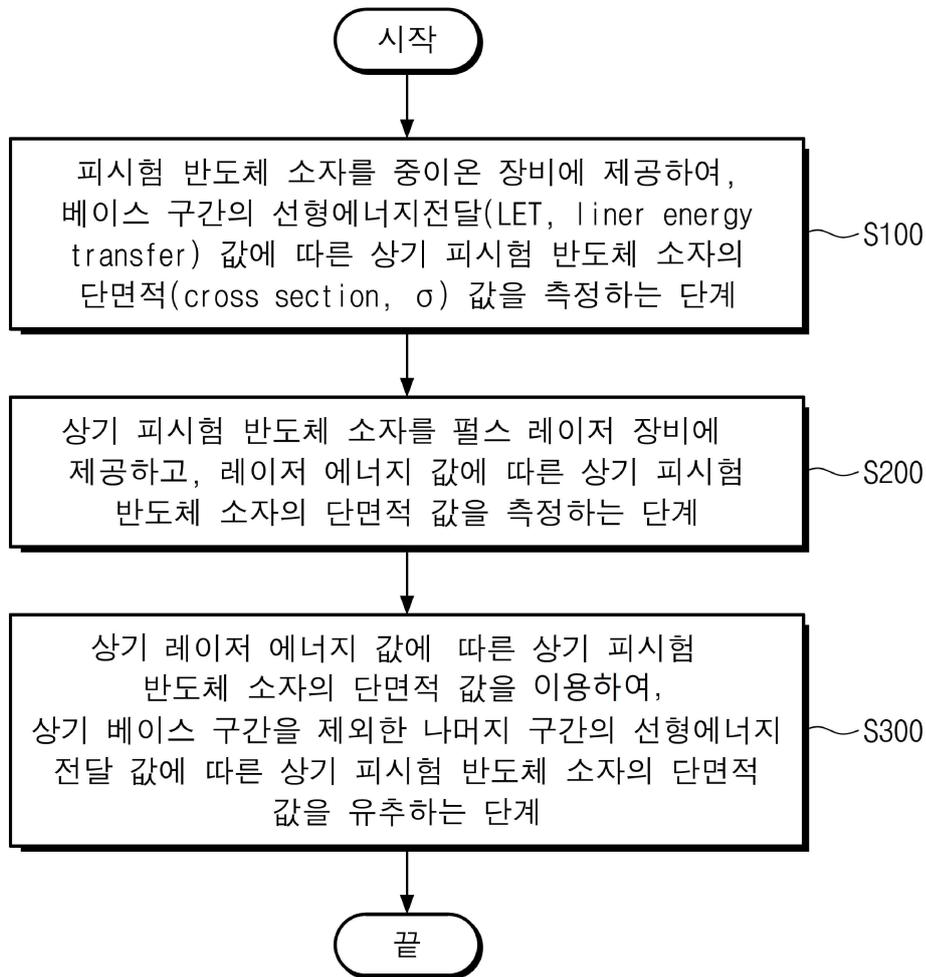
[0117] 도 9의 (a) 및 (b)에서 알 수 있듯이, 실험 예 5에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 측정된 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값을 보면, 포화 단면적 값을 확인할 수 있지만, 상기 중이온 장비의 특성상 10LET 미만의 선형에너지전달 값을 상기 피시험 반도체 소자에 제공하지 못하므로, 상기 피시험 반도체 소자의 문턱 에너지 값의 확인이 불가능한 것을 알 수 있다.

[0118] 이와 달리, 실험 예 6에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 측정된 상기 피시험 반도체 소자의 유추된 단면적 값을 보면, 10LET 이상 40LET 이하의 선형에너지전달 값을 제외한 10LET 미만 및 40LET를 초과하는 상기 선형에너지전달 값에 대해 상기 피시험 반도체 소자의 단면적 값이 유추되어, 상기 피시험 반도체 소자의 문턱 에너지 값도 확인이 가능한 것을 알 수 있다. 또한, 도 3의 (a)에 도시된 그래프와 함께 비교하면, 실험 예 6에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 유추된 단면적 값과 비교 예 1에 따른 상기 피시험 반도체 소자의 내방사선 평가 방법으로 실제 측정된 단면적 값이 유사한 것을 알 수 있다.

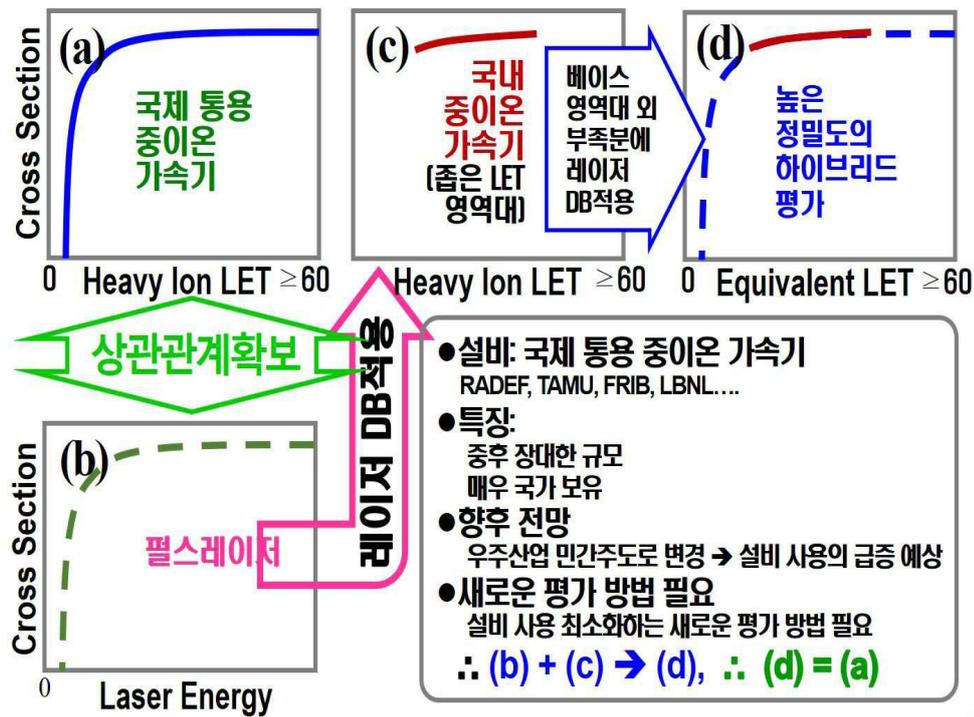
[0120] 이상, 본 발명을 바람직한 실시 예를 사용하여 상세히 설명하였으나, 본 발명의 범위는 특정 실시 예에 한정되는 것은 아니며, 첨부된 특허청구범위에 의하여 해석되어야 할 것이다. 또한, 이 기술분야에서 통상의 지식을 습득한 자라면, 본 발명의 범위에서 벗어나지 않으면서도 많은 수정과 변형이 가능함을 이해하여야 할 것이다.

도면

도면1

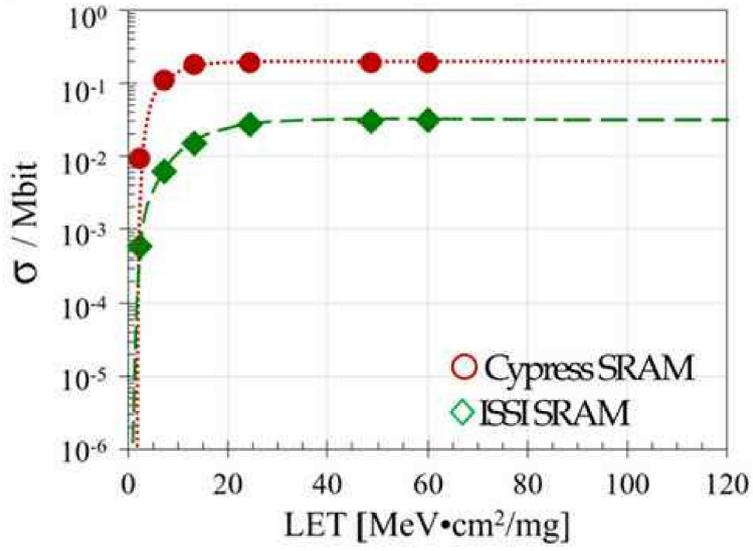


도면2

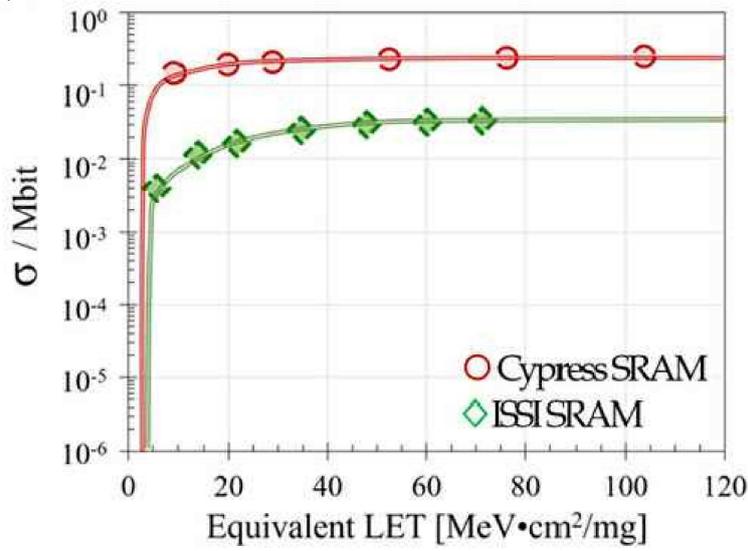


도면3

(a)

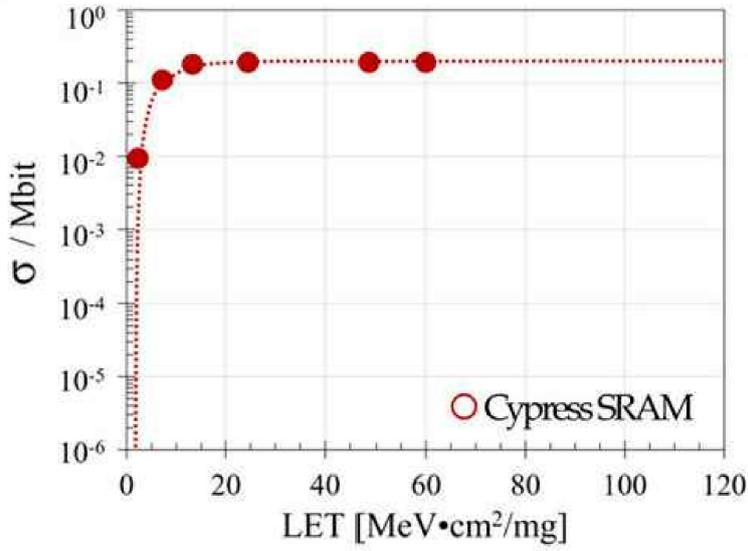


(b)

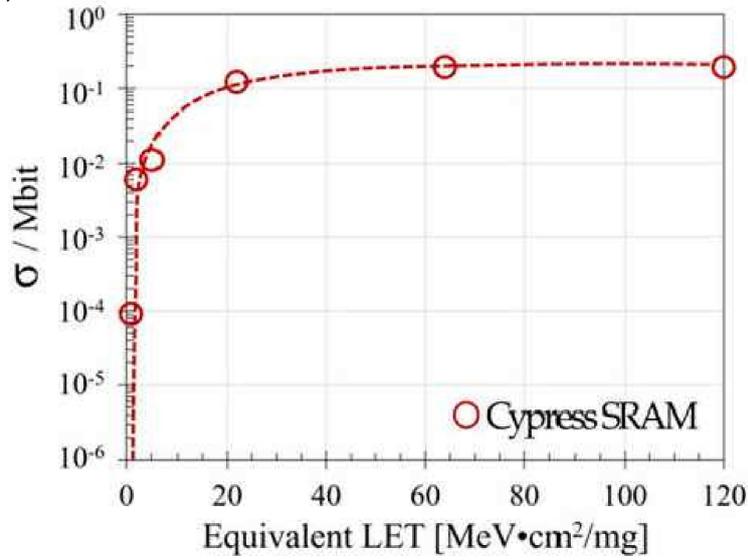


도면4

(a)

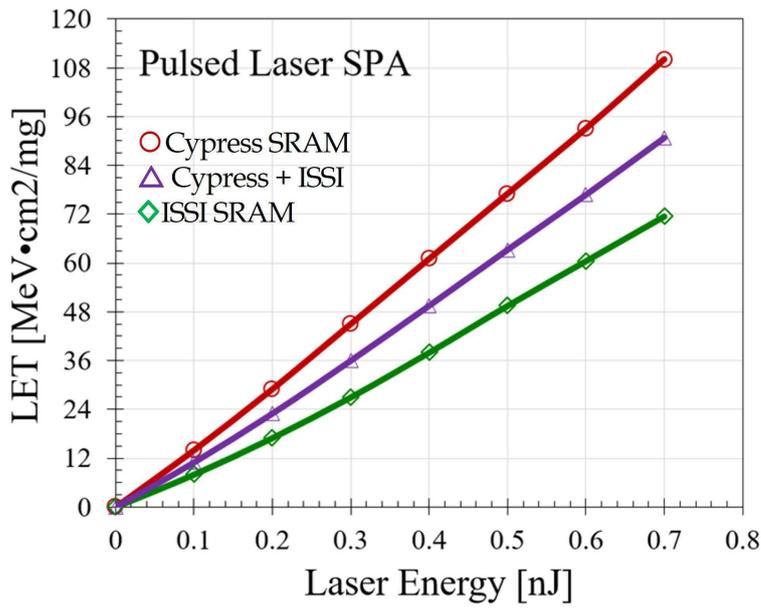


(b)

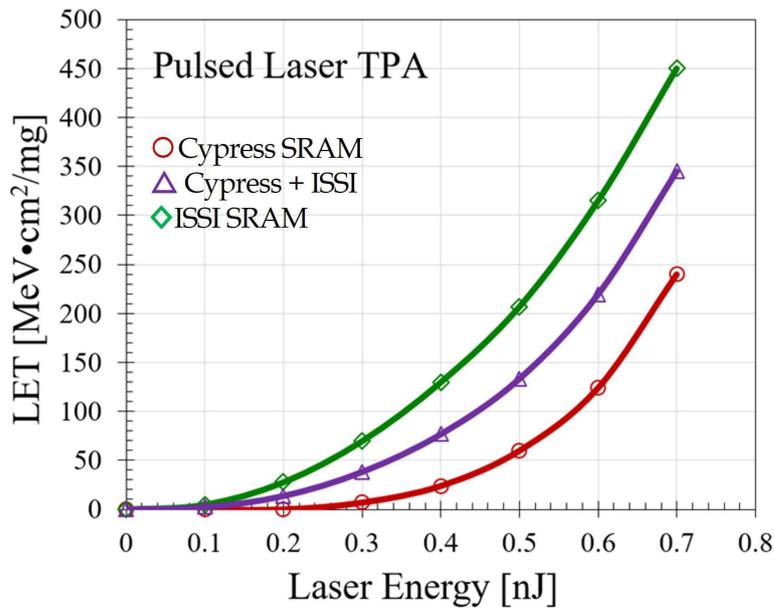


도면5

(a)

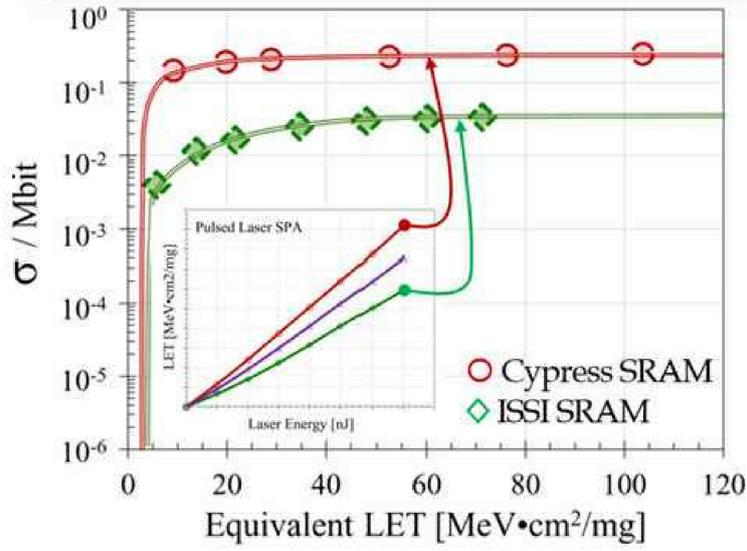


(b)

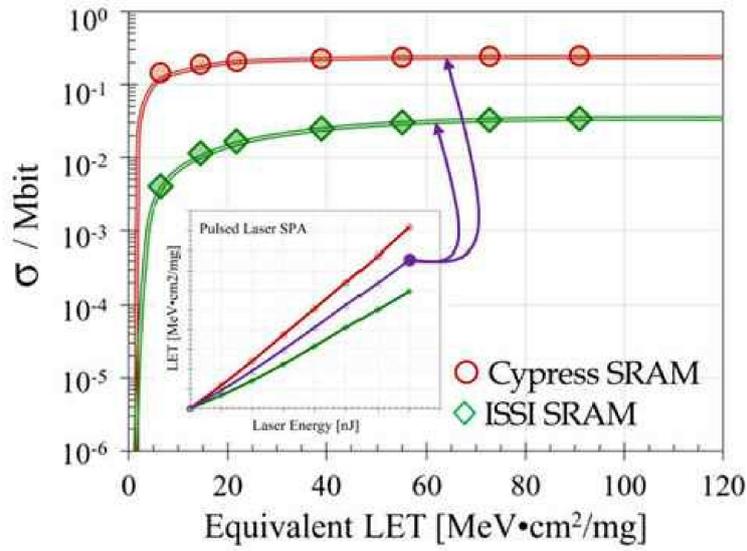


도면6

(a)

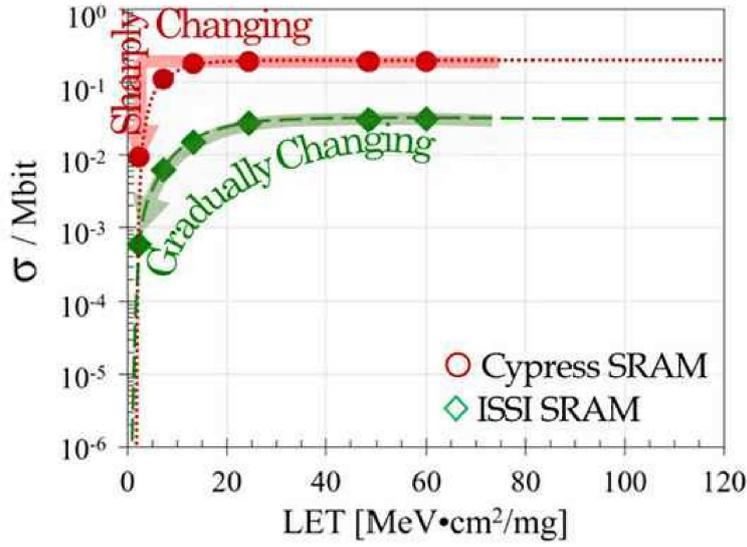


(b)

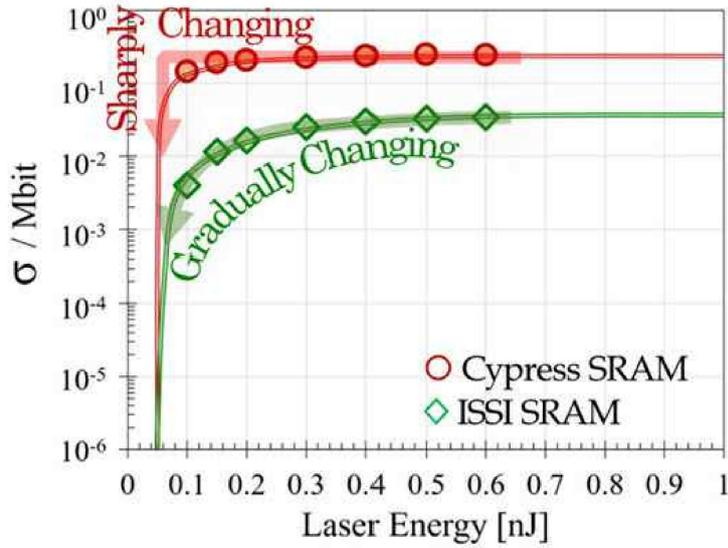


도면7

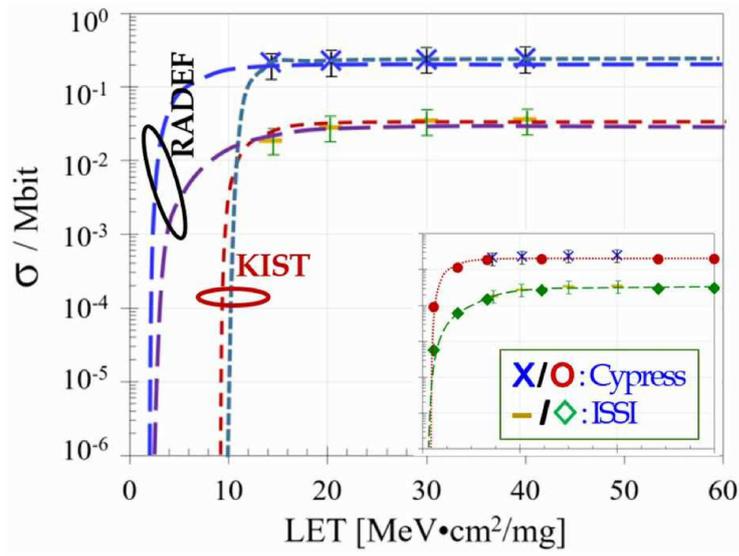
(a)



(b)



도면8



도면9

