



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2023-0150225
(43) 공개일자 2023년10월30일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01T 1/24 (2006.01) G01T 1/29 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01T 1/241 (2013.01)
G01T 1/243 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2023-0052438
(22) 출원일자 2023년04월21일
심사청구일자 2023년04월21일
(30) 우선권주장
1020220049263 2022년04월21일 대한민국(KR)

(71) 출원인
고려대학교 산학협력단
서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암
동5가)
(72) 발명자
이원호
서울특별시 성북구 안암로 145
김영학
서울특별시 성북구 안암로 145
박지수
서울특별시 성북구 안암로 145
(74) 대리인
정은열, 김태훈

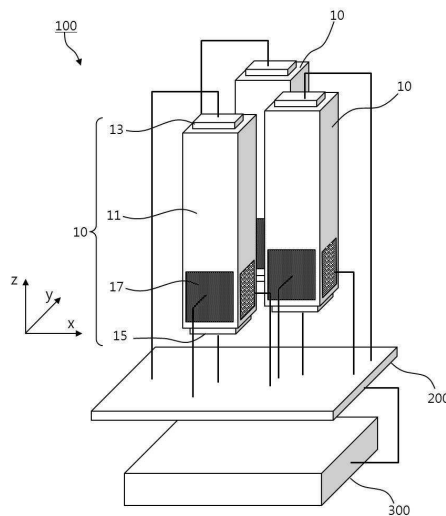
전체 청구항 수 : 총 7 항

(54) 발명의 명칭 비집속식 이중 방식 방사선 영상화 장비

(57) 요약

본 발명은 방사선 영상화 장비에 관한 것으로, 본 발명의 실시예에 따른 방사선 영상화 장비는 소정의 모자이크 패턴으로 배열된 반도체 검출기의 음극, 양극 및 4개의 옆전극을 통해 획득된 선원의 위치별 반도체 검출기의 반응신호를 기반으로 비집속식 영상기법, 컴프턴 영상기법, 이들을 융합한 융합 영상기법에 따라 넓은 에너지 영역에 대한 영상을 재구성할 수 있다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

G01T 1/2921 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711157520
과제번호	2021M2E8A1046041
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	방사선이용미래핵심기반기술연구(R&D)
연구과제명	딥러닝 기반 XRF 물질분석 및 영상화 시스템 개발
기 여 율	33/100
과제수행기관명	고려대학교
연구기간	2022.01.01 ~ 2022.12.31

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711147394
과제번호	2020R1A2C1005924
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	개인기초연구(과기정통부)(R&D)
연구과제명	전방위 측정이 가능한 섬광체 기반 단일 3차원 구분형 컴프턴 카메라
기 여 율	34/100
과제수행기관명	고려대학
연구기간	2021.03.01 ~ 2022.02.28

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1415176092
과제번호	20214000000070
부처명	산업통상자원부
과제관리(전문)기관명	한국에너지기술평가원
연구사업명	에너지인력양성(R&D)
연구과제명	방사선기술 에너지산업 고도화 인력양성
기 여 율	33/100
과제수행기관명	(사)한국방사선진흥협회
연구기간	2021.04.01 ~ 2021.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

사각기둥 형상으로 형성되고 일단에서 타단을 향하는 깊이 방향이 가상의 XYZ 좌표계의 Z축 방향을 따라 배치되고 방사선과 반응하는 반도체 소자, 상기 반도체 소자의 일단에 연결된 음극(cathode), 상기 반도체 소자의 타단에 연결된 양극(anode), 및 상기 반도체 소자의 측면에 각각 연결된 4개의 옆전극을 각각 구비하는 다수의 반도체 검출기를 포함하고, 다수의 상기 반도체 검출기가 상기 XYZ 좌표계의 XY 평면 상에 소정의 모자이크 패턴으로 부호화되어 배열되는 검출부;

상기 방사선이 상기 검출부에 입사될 때에, 상기 음극, 상기 양극 및 상기 옆전극으로부터 반응 신호를 측정하는 신호측정부; 및

상기 신호측정부에서 측정한 상기 반응 신호를 기반으로 상기 방사선을 방출하는 선원의 영상 이미지를 생성하는 영상처리부;를 포함하는 방사선 영상화 장비.

청구항 2

청구항 1에 있어서,

다수의 상기 반도체 검출기가 소정의 상기 모자이크 패턴으로 부호화되어 배열되도록, 다수의 상기 반도체 검출기를 고정하는 프레임;을 더 포함하는 방사선 영상화 장비.

청구항 3

청구항 1에 있어서,

상기 영상처리부는,

입사된 상기 방사선과 반응한 다수의 상기 반도체 검출기 내 반응 위치를 산출하고, 기설정된 상기 반도체 검출기 내 반응 위치별 상기 선원이 위치하는 구형좌표계의 선원면 픽셀 정보와 대비하여, 상기 선원의 위치 정보를 획득하는 비집속식 영상기법,

다수의 상기 반도체 검출기 중 어느 하나의 상기 반도체 검출기에 입사된 상기 방사선에 의해 발생하는 산란 반응에 대한 산란 반응 신호, 및 상기 산란 반응에 의해 산란된 상기 방사선에 의해 다른 하나의 상기 반도체 검출기에서 발생하는 흡수 반응에 대한 흡수 반응 신호를 기반으로, 상기 산란 반응 및 상기 흡수 반응이 일어난 다수의 상기 반도체 검출기 내 반응 위치를 산출하고, 상기 선원의 위치 정보를 획득하는 컴프턴 영상기법, 및

상기 비집속식 영상기법과 상기 컴프턴 영상기법을 융합하여 상기 선원의 위치 정보를 획득하는 융합 영상기법, 중 어느 하나의 영상기법에 따라 상기 영상 이미지를 생성하되,

상기 XYZ 좌표계의 X축, Y축 및 Z축 방향을 따라 배열되는 다수의 복셀로, 각각의 상기 반도체 소자의 체적영역을 구획하여 복셀화하고,

상기 신호측정부에서 측정한 상기 반응 신호에 따라, 각각의 상기 반도체 소자의 상기 복셀에 반응 광자를 분포시켜 상기 복셀을 기반으로 하는 상기 반응 위치를 산출하는 방사선 영상장비.

청구항 4

청구항 3에 있어서,

상기 영상처리부는,

상기 방사선의 에너지 대역이 250 keV 미만일 때에는, 상기 비집속식 영상기법에 의하고,

상기 방사선의 에너지 대역이 600 keV 초과일 때에는, 상기 콤프턴 영상기법에 의하며,

상기 방사선의 에너지 대역이 250 ~ 600 keV일 때에는, 상기 융합 영상기법에 의하여, 상기 영상 이미지를 생성하는 방사선 영상장비.

청구항 5

청구항 3에 있어서,

상기 양극과 상기 음극으로부터 측정된 반응 신호 크기의 비를 기반으로, 상기 Z축 방향의 상기 반응 위치를 산출하는 방사선 영상장비.

청구항 6

청구항 3에 있어서,

상기 옆전극으로부터 측정된 반응 신호 크기를 기반으로, 무게중심법(center of gravity method)을 적용하여, 상기 X축 및 상기 Y축 방향 각각의 상기 반응 위치를 산출하는 방사선 영상장비.

청구항 7

청구항 3에 있어서,

상기 융합 영상기법은,

MLEM (maximum likelihood expectation maximization) 기반의 하기 [수학식 1]에 따라 상기 영상 이미지를 생성하는 방사선 영상장비.

[수학식 1]

$$\lambda_j^{n+1} = \lambda_j^n \frac{\sum_i^N \frac{c_{i,j}^a Y_i^a}{\sum_k^M c_{i,k}^a \lambda_k^n} + \sum_{i'}^{N'} \frac{c_{i',j}^b Y_{i'}^b}{\sum_k^M c_{i',k}^b \lambda_k^n}}{\sum_i^N c_{i,j}^a + \sum_{i'}^{N'} c_{i',j}^b}$$

여기서,

$\lambda_j^n, \lambda_j^{n+1}$ 은 n, n+1 (n은 1 이상의 자연수) 번째 반복 후 선원면 픽셀 j (j는 1 이상의 자연수)의 추정치,

M은 선원면 픽셀의 전체 개수,

Y_i^a 는 비집속식 영상기법에서 반도체 검출기의 복셀 i (i는 1 이상의 자연수)에서 측정된 반응 광자수,

N은 비집속식 영상기법에서 반도체 검출기에서 측정된 전체 반응 광자수,

$c_{i,j}^a$ 는 비집속식 영상기법에서 선원면 픽셀 j에서 발생한 광자가 반도체 검출기의 복셀 i에서 측정될 확률,

$Y_{i'}^b$ 는 콤프턴 영상기법에서 이벤트(event) i' (i'은 1 이상의 자연수)로써 측정된 반응 광자수,

N' 은 컴프턴 영상기법에서 이벤트 i' 의 종류,

$C_{i',j}^b$ 는 컴프턴 영상기법에서 선원면 픽셀 j 에서 발생한 광자가 이벤트 i' 로 측정될 확률임.

발명의 설명

기술 분야

[0001]

본 발명은 비집속식 이중 방식 방사선 영상화 장비에 관한 것으로, 보다 상세하게는 비집속식 방사선 영상화와 컴프턴 카메라를 동시에 사용할 수 있는 방사선 영상화 장비에 관한 것이다.

배경 기술

[0003]

감마선 영상기법은 크게 기계적 집속과 전기적 집속으로 분류된다. 하기 선행기술문헌의 특허문헌 1에 개시된 바와 같이 기계적 집속은 납, 텅스텐 등 고원자번호 물질로 이루어진 집속기를 사용하는 방식이며, 산업 분야에서는 일반적으로 바늘구멍 집속기와 같이 높은 분해능을 유지하면서도 동시에 민감도를 향상시키기 위해 수학적으로 차폐체의 배치가 도출된 부호화 구경 집속기 방식을 활용한다. 이 방법의 원리는 선원 위치 및 집속기 패턴에 따른 검출기 응답을 기반으로 측정된 데이터(shadowgram)를 해독(decoding)하여 선원의 위치를 파악하는 것으로, 집속기에 의해 쉽게 차폐되는 저에너지 감마선 영상화에 매우 유리하다. 하지만, 고에너지 영역에서는 두꺼운 차폐체가 요구되어 휴대성이 떨어지며, 근본적으로 집속기에 의해 시야각이 제한되는 한계점이 존재한다.

[0004]

하기 선행기술문헌의 특허문헌 2에 개시된 바와 같이 컴프턴 영상화라고도 불리는 전기적 집속은 별도의 집속기 없이 검출기 내 산란-흡수 반응을 통해 방사선원을 영상화하는 방식이다. 산란 및 흡수 반응의 위치 및 에너지 정보를 기반으로 산란각을 계산하고 선원면에서 두 산란각이 같아지는 지점에 컴프턴 링을 역투사하게 된다. 여러 유효 이벤트에 대해 해당 과정을 반복하여 컴프턴 링이 중첩되는 지점을 선원의 위치로 파악한다. 기존 컴프턴 카메라는 산란부와 흡수부로 구성되어 시야각이 제한되었지만, 최근에는 단일 3차원 위치 민감형 검출기 내에서 산란-흡수 반응을 측정하여 모든 방향에서 입사하는 감마선을 영상화할 수 있다. 하지만 이 방법은 컴프턴 산란이 거의 발생하지 않는 300 keV 미만의 감마선에는 적용할 수 없다.

[0005]

이에 종래 감마선 영상기법의 문제를 해결하기 위한 방안이 절실히 요구되고 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0007]

(특허문헌 0001) KR 10-2409778 B1

(특허문헌 0002) KR 10-2013-0039566 A

발명의 내용

해결하려는 과제

[0008]

본 발명은 상술한 종래기술의 문제점을 해결하기 위한 것으로, 본 발명의 일 측면은 소정의 모자이크 패턴으로 배열된 반도체 검출기의 음극, 양극 및 4개의 옆전극을 통해 획득된 선원의 위치별 반도체 검출기의 반응신호를 기반으로 비집속식 영상기법, 컴프턴 영상기법, 이들을 융합한 융합 영상기법에 따라 넓은 에너지 영역에 대한 영상을 재구성하는 비집속식 이중 방식 방사선 영상화 장비를 제공하는 데 있다.

과제의 해결 수단

- [0010] 본 발명의 실시예에 따른 방사선 영상화 장비는 사각기둥 형상으로 형성되고 일단에서 타단을 향하는 깊이 방향 이 가상의 XYZ 좌표계의 Z축 방향을 따라 배치되고 방사선과 반응하는 반도체 소자, 상기 반도체 소자의 일단에 연결된 음극(cathode), 상기 반도체 소자의 타단에 연결된 양극(anode), 및 상기 반도체 소자의 측면에 각각 연결된 4개의 옆전극을 각각 구비하는 다수의 반도체 검출기를 포함하고, 다수의 상기 반도체 검출기가 상기 XYZ 좌표계의 XY 평면 상에 소정의 모자이크 패턴으로 부호화되어 배열되는 검출부; 상기 방사선이 상기 검출부에 입사될 때에, 상기 음극, 상기 양극 및 상기 옆전극으로부터 반응 신호를 측정하는 신호측정부; 및 상기 신호측정부에서 측정된 상기 반응 신호를 기반으로 상기 방사선을 방출하는 선원의 영상 이미지를 생성하는 영상처리부;를 포함한다.
- [0011] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 방사선 영상화 장비에 있어서, 다수의 상기 반도체 검출기가 소정의 상기 모자이크 패턴으로 부호화되어 배열되도록, 다수의 상기 반도체 검출기를 고정하는 프레임;을 더 포함할 수 있다.
- [0012] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 방사선 영상화 장비에 있어서, 상기 영상처리부는, 입사된 상기 방사선과 반응한 다수의 상기 반도체 검출기 내 반응 위치를 산출하고, 기설정된 상기 반도체 검출기 내 반응 위치별 상기 선원이 위치하는 구형좌표계의 선원면 픽셀 정보와 대비하여, 상기 선원의 위치 정보를 획득하는 비집속식 영상기법, 다수의 상기 반도체 검출기 중 어느 하나의 상기 반도체 검출기에 입사된 상기 방사선에 의해 발생하는 산란 반응에 대한 산란 반응 신호, 및 상기 산란 반응에 의해 산란된 상기 방사선에 의해 다른 하나의 상기 반도체 검출기에서 발생하는 흡수 반응에 대한 흡수 반응 신호를 기반으로, 상기 산란 반응 및 상기 흡수 반응이 일어난 다수의 상기 반도체 검출기 내 반응 위치를 산출하고, 상기 선원의 위치 정보를 획득하는 컴프턴 영상기법, 및 상기 비집속식 영상기법과 상기 컴프턴 영상기법을 융합하여 상기 선원의 위치 정보를 획득하는 융합 영상기법, 중 어느 하나의 영상기법에 따라 상기 영상 이미지를 생성하되, 상기 XYZ 좌표계의 X축, Y축 및 Z축 방향을 따라 배열되는 다수의 복셀로, 각각의 상기 반도체 소자의 체적영역을 구획하여 복셀화하고, 상기 신호측정부에서 측정된 상기 반응 신호에 따라, 각각의 상기 반도체 소자의 상기 복셀에 반응 광자를 분포시켜 상기 복셀을 기반으로 하는 상기 반응 위치를 산출할 수 있다.
- [0013] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 방사선 영상화 장비에 있어서, 상기 영상처리부는, 상기 방사선의 에너지 대역이 250 keV 미만일 때에는, 상기 비집속식 영상기법에 의하고, 상기 방사선의 에너지 대역이 600 keV 초과일 때에는, 상기 컴프턴 영상기법에 의하며, 상기 방사선의 에너지 대역이 250 ~ 600 keV일 때에는, 상기 융합 영상기법에 의하여, 상기 영상 이미지를 생성할 수 있다.
- [0014] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 방사선 영상화 장비에 있어서, 상기 비집속식 영상기법은, 상기 양극과 상기 음극으로부터 측정된 반응 신호 크기의 비를 기반으로, 상기 Z축 방향의 상기 반응 위치를 산출할 수 있다.
- [0015] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 방사선 영상화 장비에 있어서, 상기 비집속식 영상기법은, 상기 옆전극으로부터 측정된 반응 신호 크기를 기반으로, 무게중심법(center of gravity method)을 적용하여, 상기 X축 및 상기 Y축 방향 각각의 상기 반응 위치를 산출할 수 있다.
- [0016] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 방사선 영상화 장비에 있어서, 상기 융합 영상기법은, MLEM (maximum likelihood expectation maximization) 기반의 하기 [수학식 1]에 따라 상기 영상 이미지를 생성할 수 있다.
- [0017] [수학식 1]

$$\lambda_j^{n+1} = \lambda_j^n \frac{\sum_i^N \frac{c_{ij}^a Y_i^a}{\sum_k c_{ik}^a \lambda_k^n} + \sum_{i'}^{N'} \frac{c_{i'j}^b Y_{i'}^b}{\sum_k c_{i'k}^b \lambda_k^n}}{\sum_i^N c_{ij}^a + \sum_{i'}^{N'} c_{i'j}^b}$$

[0018]

[0019] 여기서, λ_j^n , λ_j^{n+1} 은 n, n+1 (n은 1 이상의 자연수) 번째 반복 후 선원면 픽셀 j (j는 1 이상의 자연수)의 추

정치, M 은 선원면 픽셀의 전체 개수, Y_i^a 는 비집속식 영상기법에서 반도체 검출기의 복셀 i (i 는 1 이상의 자연수)에서 측정된 반응 광자수, N 은 비집속식 영상기법에서 반도체 검출기에서 측정된 전체 반응 광자수, $C_{i,j}^a$ 는 비집속식 영상기법에서 선원면 픽셀 j 에서 발생한 광자가 반도체 검출기의 복셀 i 에서 측정될 확률, Y_i^b 는 컴프턴 영상기법에서 이벤트(event) i' (i' 은 1 이상의 자연수)로써 측정된 반응 광자수, N' 은 컴프턴 영상기법에서 이벤트 i' 의 종류, $C_{i',j}^b$ 는 컴프턴 영상기법에서 선원면 픽셀 j 에서 발생한 광자가 이벤트 i' 로 측정될 확률임.

[0021] 본 발명의 특징 및 이점들은 첨부도면에 의거한 다음의 상세한 설명으로 더욱 명백해질 것이다.

[0022] 이에 앞서 본 명세서 및 청구범위에 사용된 용어나 단어는 통상적이고 사전적인 의미로 해석되어서는 아니 되며, 발명자가 그 자신의 발명을 가장 최선의 방법으로 설명하기 위해 용어의 개념을 적절하게 정의할 수 있다는 원칙에 입각하여 본 발명의 기술적 사상에 부합하는 의미와 개념으로 해석되어야만 한다.

발명의 효과

[0024] 본 발명에 따르면, 대면적 검출기를 구성할 수 있고, 우수한 에너지 및 공간 분해능을 가지며, 전에너지 영역의 방사선을 영상화할 수 있다. 특히, 감마선의 투과 깊이에 따라 감쇠가 큰 저에너지 감마선 영상화에 유리하여 컴프턴 영상기법에 의한 영상화가 불가능했던 에너지 영역에서의 영상화가 가능하다.

[0025] 또한, 별도의 집속기가 요구되지 않아 전방위(4π) 영상화가 가능하며 휴대성이 뛰어나다.

도면의 간단한 설명

[0027] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 비집속식 이중 방식 방사선 영상화 장비의 구성을 개략적으로 도시한 도면이다.

도 2는 도 1에 도시된 반도체 검출기의 배열을 도시한 도면이다.

도 3 내지 도 6은 본 발명의 실시예에 따른 반도체 검출기의 배열 패턴을 예시적으로 도시한 도면이다.

도 7은 선원면 및 픽셀을 설명하는 도면이다.

도 8은 도 1에 도시된 반도체 검출기의 깊이에 따른 양극 및 음극 신호 크기를 나타낸다.

도 9는 도 1에 도시된 반도체 검출기 내부에서 전자 이동에 따른 전극의 유도 신호 파형을 나타낸다.

도 10은 실험예에 사용된 비집속식 이중 방식 방사선 영상화 장비를 나타내는 사진이다.

도 11 내지 도 15는 실험예에서 다양한 위치의 ^{57}Co 을 비집속식 영상기법으로 재구성한 결과이다.

도 16 내지 도 22는 실험예에서 선원이 반도체 검출기의 정면에 위치할 때에 에너지별 비집속식 영상기법, 컴프턴 영상기법 및 융합 영상기법에 따라 생성된 이미지이다.

도 23은 실험예에서 선원이 반도체 검출기의 정면에 위치할 때에 에너지에 따라 평가된 정량 지표를 나타내는 그래프이다.

도 24는 실험예에서 다양한 위치의 ^{57}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs 을 융합 영상기법으로 재구성한 결과이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0028] 본 발명의 목적, 특정한 장점들 및 신규 특징들은 첨부된 도면들과 연관되어지는 이하의 상세한 설명과 바람직한 실시예들로부터 더욱 명백해질 것이다. 본 명세서에서 각 도면의 구성요소들에 참조번호를 부가함에 있어서, 동일한 구성 요소들에 한해서는 비록 다른 도면상에 표시되더라도 가능한 한 동일한 번호를 가지도록 하고 있음에 유의하여야 한다. 또한, "제1", "제2" 등의 용어는 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하기 위해

사용되는 것으로, 구성요소가 상기 용어들에 의해 제한되는 것은 아니다. 이하, 본 발명을 설명함에 있어서, 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있는 관련된 공지 기술에 대한 상세한 설명은 생략한다.

- [0029] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시형태를 상세히 설명하기로 한다.
- [0031] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 비집속식 이중 방식 방사선 영상화 장비의 구성을 개략적으로 도시한 도면이고, 도 2는 도 1에 도시된 반도체 검출기의 배열을 도시한 도면이며, 도 3 내지 도 6은 본 발명의 실시예에 따른 반도체 검출기의 배열 패턴을 예시적으로 도시한 도면이다.
- [0032] 도 1 내지 도 2에 도시된 바와 같이, 본 발명의 실시예에 따른 방사선 영상화 장비는 사각기둥 형상으로 형성되고 일단에서 타단을 향하는 깊이 방향이 가상의 XYZ 좌표계의 Z축 방향을 따라 배치되고 방사선과 반응하는 반도체 소자(11), 반도체 소자(11)의 일단에 연결된 음극(cathode, 13), 반도체 소자(11)의 타단에 연결된 양극(anode, 15), 및 반도체 소자(11)의 측면에 각각 연결된 4개의 옆전극(17)을 각각 구비하는 다수의 반도체 검출기(10)를 포함하고, 다수의 반도체 검출기(10)가 상기 XYZ 좌표계의 XY 평면 상에 소정의 모자이크 패턴으로 부호화되어 배열되는 검출부(100), 방사선이 검출부(100)에 입사될 때에, 음극(13), 양극(15) 및 옆전극(17)으로부터 반응 신호를 측정하는 신호측정부(200), 및 신호측정부(200)에서 측정한 반응 신호를 기반으로 방사선을 방출하는 선원의 영상 이미지를 생성하는 영상처리부(300)를 포함한다.
- [0034] 본 발명은 비집속식 방사선 영상화와 컴프턴 카메라를 동시에 사용할 수 있는 방사선 영상화 장비에 관한 것이다. 방사선 영상법은 집속기를 사용하는 기계적 집속과 컴프턴 영상화라고 불리는 전기적 집속으로 구분되는데, 기계적 집속 방식은 고에너지 영역에서는 두꺼운 차폐체가 요구되어 휴대성이 떨어지며, 근본적으로 집속기에 의해 시야각이 제한되는 한계점이 존재하고, 전기적 집속 방식은 컴프턴 산란이 거의 발생하지 않는 300 keV 미만의 에너지를 갖는 방사선에는 적용할 수 없는 문제가 있다. 이에 종래 방사선 영상법의 문제를 해결하기 위한 수단으로서 본 발명이 안출되었다.
- [0035] 구체적으로, 본 발명의 실시예에 따른 방사선 영상화 장비는 검출부(100), 신호측정부(200), 및 영상처리부(300)를 포함한다.
- [0037] 검출부(100)는 방사선을 검출하는 다수의 반도체 검출기(10)를 포함한다. 반도체 검출기(10)는 반도체를 이용하여 방사선을 검출하는 기기로서, 반도체 소자(11), 음극(13), 양극(15) 및 옆전극(17)을 구비한다.
- [0038] 반도체 소자(11)는 입사되는 방사선과 반응하는 소자이다. 반도체 소자(11)는 사각기둥 형상으로 형성되고, 일단에서 타단을 향하는 깊이 방향이 가상의 XYZ 좌표계의 Z축 방향을 따라 배치된다. 반도체 소자(11)의 측면에는 절연체가 배치될 수 있다. 방사선이 반도체 검출기(10)로 입사되면, 반도체 소자(11)의 내부에서 광자가 반응한다. 이하에서는 반도체 소자(11)와 반응하는 광자를 반응 광자라고 한다. 이러한 반도체 소자(11)는 CdTe, CdZnTe(CZT) 결정 등과 같은 반도체로 이루어지는데, 그 종류에 특별한 한정이 있는 것은 아니고, 방사선과 반응하여 반응 신호를 출력할 수 있는 반도체이기만 하면 어떤 것을 사용해도 무방하다.
- [0039] 음극(cathode, 13)은 반도체 소자(11)의 일단에 연결되고, 양극(anode, 15)은 반도체 소자(11)의 타단에 연결된다. 옆전극(17)은 반도체 소자(11)의 측면에 배치되는데, 반도체 소자(11)가 사각기둥 형상으로 형성되므로, 4개의 측면마다 하나씩 옆전극(17)이 연결된다. 즉, X축 상에 배치되어 서로 마주보는 반도체 소자(11)의 2 측면(X1 및 X2)에 각각 하나씩 옆전극(17)이, 또한 Y축 상에 배치되어 서로 마주보는 반도체 소자(11)의 2 측면(Y1 및 Y2)에도 각각 하나씩 옆전극(17)이 배치된다.
- [0040] 이러한 음극(13), 양극(15) 및 옆전극(17)은 방사선이 반도체 소자(11) 내에서 반응할 때에 반응 신호, 즉 전기적 신호를 출력한다. 이러한 반도체 검출기(10)에 따르면, 방사선의 광자에 의해 반응 신호가 발생할 때마다 문턱 에너지(threshold energy) 이상의 에너지를 갖는 광자를 계수(counting)할 수 있다. 여기서, 방사선은 감마선일 수 있다.
- [0041] 검출부(100)는 다수의 반도체 검출기(10)를 포함하는데, 여기서 다수의 반도체 검출기(10)는 XYZ 좌표계의 XY 평면 상에 소정의 모자이크 패턴으로 부호화되어 배열된다. 도 3을 참조하면, 본 발명에 따른 반도체 검출기(10)는 21×21 행렬 형태의 격자에 소정의 모자이크 패턴을 배열되어 있는 것을 알 수 있다. 다만, 반도체 검출

기(10)의 배열 패턴이 반드시 도 3과 같이 배열되어야 하는 것은 아니고, 다양한 패턴으로 배열될 수 있으며, 이에 대해서는 후술한다. 부호화된 반도체 검출기(10)의 배열에 의하면, 종래 기계적 집속에 따른 부호화 구경 방식과 유사하게 방사선을 방출하는 선원의 위치에 따라 반도체 검출기(10)의 응답이 달라진다. 즉, 방사선의 선원의 위치에 따라 반응 광자가 각각의 반도체 소자(11) 내에서 반응하는 반응 위치 분포가 달라지고, 이러한 반응 위치 분포를 통해 선원의 위치를 산출함으로써, 그 선원에 대한 영상 이미지를 생성할 수 있다.

[0042] 반도체 검출기(10)가 배열되는 패턴은 선원으로부터 입사되는 방사선의 방향을 용이하게 파악할 수 있도록 한다. 입사되는 방사선의 방향에 따라 반도체 검출기(10)의 응답이 달라지는데, 방사선의 입사 방향이 부호화된 반도체 검출기(10)의 패턴에 의해 명확히 구별되므로, 반도체 검출기(10)의 반응 정보를 통해 보다 정확하게 선원의 위치를 파악할 수 있다.

[0043] 반도체 검출기(10)가 배열되는 패턴에 대해 설명하면, 반도체 검출기(10)는 $N(N$ 은 1 이상의 자연수) 개의 행과 $M(M$ 은 1 이상의 자연수) 개의 열을 을 가지는 $N \times M$ 행렬 형태의 격자 내에서, 기준 패턴으로 배열될 수 있다.

[0044] 도 3을 참조로 설명하면, 5×5 행렬 형태의 격자에서, 제1 행의 모든 열((1,1) ~ (1,5)), 제2 행의 제3 및 제4 열((2,3), (2,4)), 제3 행의 제2 및 제5열((3,2), (3,5)), 제4 행의 제2 및 제5열((4,2), (4,5)), 제5 행의 제3 및 제4 열((5,3), (5,4))의 위치에 하나씩 반도체 검출기(10)가 배열되어 제1 기준 패턴이 구성될 수 있다. 또한, 그 제1 기준 패턴을 행 및/또는 열 방향을 따라 나란하게 배열함으로써, 제1 기준 패턴이 확장된 확장 패턴을 형성할 수도 있다. 도 3에서는 5×5 행렬 내 제1 기준 패턴을 9×9 행렬로 확장하는 경우를 예시하고 있다. 여기서, 4 개의 제1 기준 패턴(점선 표시)이 나란하게 배치되면 10×10 행렬로 확장되는데, 최외곽 열 및 행을 제거하여 9×9 행렬로 확장할 수 있다.

[0045] 이와 동일한 방식으로, 도 4와 같이 7×7 행렬 형태의 격자 내에 제2 기준 패턴이 형성되고, 13×13 행렬 형태로 제2 기준 패턴이 확장되거나, 도 5와 같이 11×11 행렬 형태의 격자 내에 제3 기준 패턴이 형성되고, 13×13 행렬 형태로 제3 기준 패턴이 확장되거나, 도 6과 같이 13×13 행렬 형태의 격자 내에 제4 기준 패턴이 형성되고, 25×25 행렬 형태로 제4 기준 패턴이 확장될 수 있다.

[0046] 이와 같이, 다양한 모자이크 패턴으로 반도체 검출기(10)가 배열될 수 있지만, 반드시 그 패턴이 도 3 내지 도 6에 한정되는 것은 아니다.

[0047] 한편, 본 발명의 실시예에 따른 방사선 영상장비는 프레임(도시되지 않음)을 더 포함할 수 있다. 프레임은 다수의 반도체 검출기(10)가 소정의 모자이크 패턴으로 배열될 수 있도록, 반도체 검출기(10)를 고정하는 수단이다. 일례로, 프레임은 반도체 검출기(10)가 삽입될 수 있는 다수의 중공형 격자를 구비함으로써, 그 격자 내에 소정의 패턴으로 반도체 검출기(10)가 삽입되어 배열될 수 있다.

[0049] 신호측정부(200)는 방사선이 검출부(100)에 입사될 때에, 각각의 반도체 검출기(10)의 음극(13), 양극(15), 및 옆전극(17)으로부터 반응 신호를 측정한다. 반응 신호는 전기적 신호일 수 있다. 신호측정부(200)는 다수의 반도체 검출기(10)로부터 반응 신호를 측정하기 위해서, 다수의 반도체 검출기(10) 각각의 음극(13)과 전기적으로 연결되는 음극(13) 기관, 각각의 양극(15)과 전기적으로 연결되는 양극(15) 기관, 및 각각의 옆전극(17)과 전기적으로 연결되는 그리드 기관을 포함할 수 있다.

[0051] 영상처리부(300)는 신호측정부(200)에서 측정한 반응 신호를 기반으로 선원의 영상 이미지를 생성할 수 있다. 이러한 영상처리부(300)는 반도체 검출기(10)의 영상처리 알고리즘을 수행하는 하드웨어로 구현될 수 있다.

[0052] 이하에서 영상처리부(300)의 영상 이미지 생성 동작에 대해 설명한다.

[0054] 도 7은 선원면 및 픽셀을 설명하는 도면이고, 도 8은 도 1에 도시된 반도체 검출기의 깊이에 따른 양극 및 음극 신호 크기를 나타내며, 도 9는 도 1에 도시된 반도체 검출기 내부에서 전자 이동에 따른 전극의 유도 신호 파형을 나타낸다.

[0055] 영상처리부(300)는 비집속식 영상기법, 컴프턴 영상기법, 및 비집속식 영상기법과 컴프턴 영상기법이 융합된 융합 영상기법 중 어느 하나에 따라 선원의 위치 정보를 획득하여 영상 이미지를 생성한다. 여기서, 방사선의 에너지 대역이 250 keV 미만일 때에는 비집속식 영상기법에 의하고, 방사선의 에너지 대역이 600 keV 초과일 때에는

는 컴프턴 영상기법에 의하며, 방사선의 에너지 대역이 250 ~ 600 keV일 때에는 융합 영상기법에 의하여 영상 이미지를 생성할 수 있다.

[0056] 도 7을 참고로 선원면 및 픽셀에 대해 먼저 설명하면, 선원면은 도 7의 왼쪽과 같이 구면좌표계로 설정될 수 있다. 해당 좌표계에서 특정 지점 P는 길이 r, 원점과 P를 이은 직선이 Z축과 이루는 각도인 ϕ , 원점과 P를 이은 직선을 XY 평면으로 투영시킨 직선과 X축이 이루는 각도 θ 로 표현된다. 이를 방사선 영상에 대입하면, r은 선원과 반도체 검출기(10) 사이 거리, ϕ , θ 는 반도체 검출기(10)를 기준으로 선원이 입사하는 방향을 의미한다. 도 7의 오른쪽을 참고로, 구면좌표계는 ϕ , θ 를 기반으로 나뉘지며, ϕ 가 0 ~ 180도 범위일 때 θ 는 0 ~ 359도 범위를 가지게 되며, 일정한 간격으로 픽셀을 나눌 수 있다. 예를 들어, 1도 간격으로 픽셀을 나누면, 선원면에는 총 $181 \times 360 = 65,160$ 개의 픽셀이 존재할 수 있다.

[0058] 비집속식 영상기법은 입사된 방사선과 반응한 다수의 반도체 검출기(10) 내 반응 위치를 산출하고, 기설정된 반도체 검출기(10) 내 반응 위치별 선원이 위치하는 구형좌표계의 선원면 픽셀 정보와 대비하여, 선원의 위치 정보를 획득할 수 있다. 여기서, 반응 위치를 산출하기 위해서, XYZ 좌표계의 X축, Y축 및 Z축 방향을 따라 배열되는 다수의 복셀로, 각각의 반도체 소자(11)의 체적영역을 구획하여 복셀화하고, 신호측정부(200)에서 측정된 반응 신호에 따라, 각각의 반도체 소자(11)의 복셀에 반응 광자를 분포시킬 수 있다. 이에 따라, 복셀을 기반으로 하는 반응 위치가 산출될 수 있다.

[0059] Z축 방향에 따른 반응 광자의 반응 위치는 양극(15)과 음극(13)으로부터 측정된 반응 신호 크기의 비(C/A ratio)를 기반으로 산출될 수 있다. 반응 위치별 양극(15) 신호 및 음극(13) 신호의 크기를 나타내는 도 8을 참고로, 양극(15)과 옆전극(virtual Frisch-grid, 17) 영역을 제외한 나머지 영역(옆전극(17)과 음극(13) 사이)에서 양극(15) 신호는 일정하게 유지되는 반면, 음극(13) 신호는 선형적으로 증가한다. 여기서, 양극(15)과 옆전극(17) 사이 영역에서 발생한 반응은 제거하고, 옆전극(17)과 음극(13) 사이에서 발생한 반응만 사용하여, 음극(13) 신호와 양극(15) 신호의 비를 통해 깊이 방향에 대한 반응 위치 정보를 유추할 수 있다. 다만, 깊이 방향에 대한 반응위치 정보가 반드시 양극(15)과 음극(13)의 신호 크기의 비를 통해서만 구할 수 있는 것은 아니고, Drift time 등을 이용해서도 산출할 수 있다.

[0060] X축, 및 Y축에 따른 반응 광자의 반응 위치는 옆전극(17)의 신호 크기를 기반으로 생성할 수 있다. 반도체 검출기(10) 내부에서 전자 이동에 따른 전극의 유도 신호 파형을 각각 나타내는 도 9에서 그 파형은 원신호를 반전한 결과이다. 도 9를 참고로, 방사선과의 반응에 의해 생성된 전자는 음극(13)으로부터 멀어지고 양극(15)에서 수집되기 때문에, 두 전극은 반대 극성을 보인다. 옆전극(17)의 경우, 전자가 가까워지다가 반도체 소자(11)와 옆전극(17) 사이에 배치된 절연체로 인해 수집되지 못하고 양극(15)으로 이동하므로 신호가 증가하다가 감소하는 형태를 보인다. 여기서, 신호가 증가하는 부분을 positive step, 신호가 감소하는 부분을 negative step이라고 한다. 이러한 negative step에 무게중심법(center of gravity method)을 적용하면, 아래 [수학식 1]과 같이 X축 및 Y축에 대한 반응 위치를 산출할 수 있다.

[0061] [수학식 1]

$$x = \frac{A_{x1}}{A_{x1} + A_{x2}}, y = \frac{A_{y1}}{A_{y1} + A_{y2}}$$

[0062]

[0063] (여기서, A_{x1} 는 X1 방향 옆전극(17)의 negative step 크기, A_{x2} 는 X2 방향 옆전극(17)의 negative step 크기, A_{y1} 는 Y1 방향 옆전극(17)의 negative step 크기, A_{y2} 는 Y2 방향 옆전극(17)의 negative step 크기임)

[0065] 반도체 소자(11)로부터 소정의 거리만큼 이격된 위치의 선원으로부터 방출되는 방사선은 반도체 소자(11) 내부에서 반응하는데, 이때 음극(13), 양극(15) 및 4개의 옆전극(17)을 통해 전기적 신호를 측정되고, 측정된 전기적 신호는 방사선이 반도체 소자(11) 내부에서 반응한 반응 광자수(count)에 대응되므로, 이를 통해 반응 광자의 위치 분포와 반응수를 산출할 수 있다.

[0066] 여기서, 반도체 검출기(10) 내 반응 위치에 따른 선원이 위치하는 구형좌표계의 선원면 픽셀에 관한 정보는 기 설정되어 있으므로, 산출된 반응 위치 분포와 기설정된 반응 위치 분포별 선원면 픽셀 정보를 대비함으로써, 선

원의 위치 정보를 획득하고, 영상 이미지를 생성할 수 있다.

[0068] 컴프턴 영상기법은 컴프턴 산란과 광전흡수가 연속적으로 일어나는 반응, 즉 컴프턴 이벤트(event)를 이용하여 영상화는 방식이다. 즉, 산란 반응과 흡수 반응이 일어나는 각각의 반응 위치 및 에너지 정보를 기반으로 컴프턴 콘을 생성하여 선원의 위치를 결정할 수 있다. 실제 선원에서는 수많은 방사선이 방출되고, 컴프턴 이벤트마다 반응 위치 및 에너지의 조합에 따른 컴프턴 콘이 달라지므로 다수의 컴프턴 콘이 생성되고, 각 위치에서 누적되는 컴프턴 콘의 횟수를 상대적 밝기로 변환함으로써 영상 이미지를 생성할 수 있다.

[0069] 본 발명에 따른 방사선 영상장비에서는, 다수의 반도체 검출기(10) 중 어느 하나의 반도체 검출기(10)에 입사된 방사선에 의해 발생하는 산란 반응이 일어나고, 그 산란 반응에 의해 산란된 방사선에 의해 다른 하나의 반도체 검출기(10)에서 흡수 반응이 일어난다. 여기서, 신호측정부(200)가 산란 반응 및 흡수 반응에 따른 산란 반응 신호 및 흡수 반응 신호를 측정하고, 영상처리부(300)가 그 신호를 기반으로 컴프턴 영상기법에 따라 선원의 위치 정보를 획득하고 영상 이미지를 생성할 수 있다. 이때, 산란 반응 및 흡수 반응이 일어나는 다수의 반도체 검출기(10) 내 반응 위치는, 비집속식 영상기법에서 진술한 바와 같이, 반도체 소자(11)를 복셀화하고, 그 복셀 기반으로 반응 위치를 산출할 수 있으며, 이때 축 방향에 따른 반응 위치는 양극(15)과 음극(13)으로부터 측정된 반응 신호 크기의 비(C/A ratio)를 기반으로 산출하고, X축, 및 Y축에 따른 반응 광자의 반응 위치는 옆전극(17)의 신호 크기를 기반으로 산출할 수 있다.

[0071] 융합 영상기법은 비집속식 영상기법과 컴프턴 영상기법을 융합하여 선원의 위치 정보를 획득하여 영상 이미지를 생성한다. 여기서, 융합 영상기법은 MLEM (maximum likelihood expectation maximization) 기반의 하기 [수학식 2]에 따라 영상 이미지를 생성할 수 있다.

[0072] [수학식 2]

$$\lambda_j^{n+1} = \lambda_j^n \frac{\sum_i^N \frac{c_{ij}^a Y_i^a}{\sum_k^M c_{ik}^a \lambda_k^n} + \sum_{i'}^{N'} \frac{c_{i'j}^b Y_{i'}^b}{\sum_k^M c_{i'k}^b \lambda_k^n}}{\sum_i^N c_{ij}^a + \sum_{i'}^{N'} c_{i'j}^b}$$

[0073]

[0074] (여기서, λ_j^n , λ_j^{n+1} 은 n, n+1 (n은 1 이상의 자연수) 번째 반복 후 선원면 픽셀 j (j는 1 이상의 자연수)의 추정치, M은 선원면 픽셀의 전체 개수, Y_i^a 는 비집속식 영상기법에서 반도체 검출기(10)의 복셀 i (i는 1 이상의 자연수)에서 측정된 반응 광자수, N은 비집속식 영상기법에서 반도체 검출기(10)에서 측정된 전체 반응 광자수, $C_{i,j}^a$ 는 비집속식 영상기법에서 선원면 픽셀 j에서 발생한 광자가 반도체 검출기(10)의 복셀 i에서 측정될 확률, $Y_{i'}^b$ 는 컴프턴 영상기법에서 이벤트(event) i' (i'은 1 이상의 자연수)로써 측정된 반응 광자수, N'은 컴프턴 영상기법에서 이벤트 i'의 종류, $C_{i',j}^b$ 는 컴프턴 영상기법에서 선원면 픽셀 j에서 발생한 광자가 이벤트 i'로 측정될 확률임)

[0075] λ_j^n , λ_j^{n+1} 은 n, n+1번째 반복 후 선원면 픽셀 j의 추정치로서, λ_j 는 전체 픽셀 중 특정 픽셀 j에서의 추정치를 의미하며, 이 추정치가 높을수록 선원이 있을 확률이 높다는 것을 의미한다. 초기 추정치는 0 ~ 1 사이 값을 입력해야 하며, 이 값을 식에 대입하면 그 해로써 다음 추정치가 도출된다. 해당 과정을 여러 번 반복함으로써 추정치의 정확도를 높일 수 있으나, 일정 이상이 되면 영상에서의 noise가 증폭되는 등 성능이 악화되기 때문에 적절한 횟수를 반복한다. 이 추정치를 2차원 행렬로 배열하면 방사선 영상을 획득할 수 있다.

[0076] Y_i^a 는 특정 위치에 있는 미지의 선원을 측정할 때 특정 반도체 검출기(10)의 복셀 위치 i에서 측정된 반응 수를 의미하며, i는 반도체 검출기(10)의 구조나 복셀에 따라 그 수가 달라진다. 예를 들면, 반도체 검출기(10)가 2

$\times 2$ 행렬 형태로 배열되고, 개별 반도체 검출기(10)가 $3 \times 3 \times 10$ 복셀로 나뉜 경우에 i 는 $3 \times 3 \times 10 \times 4 = 360$ 개가 된다.

[0077] $C_{i,j}^a$ 는 반도체 검출기(10)의 응답함수로서, 비집속식 영상기법에서 선원면의 특정 픽셀 j 에 선원이 위치했을 때에 발생한 광자가 반도체 검출기(10)의 복셀 i 에서 측정될 확률을 의미한다. 구면좌표계 내에 가능한 모든 위치에 선원을 두고 각 위치에 따른 반도체 검출기(10) 내 반응 위치 분포를 통해 도출되며, 일반적으로 실험을 통해 구현하기 어렵기 때문에 전산모사를 활용할 수 있다. 데이터 양이 많아질수록 더욱 정확한 응답함수를 획득할 수 있다.

[0078] Y_i^b 는 컴프턴 영상기법에서 컴프턴 이벤트(event) i '로써 측정된 반응 광자수로서, 특정 위치에 있는 미지의 선원을 측정할 때 특정 event i '로 측정되는 반응 수를 의미한다.

[0079] $C_{i,j}^b$ 는 컴프턴 영상기법에서 선원면 픽셀 j 에서 발생한 광자가 이벤트 i '로 측정될 확률, 즉 선원이 특정 픽셀 j 에 위치했을 때 event i '로 측정될 확률을 말한다.

[0080] MLEM식에서 영상 재구성을 위해 발생 가능한 모든 event i '의 합이 요구되나, 반응 위치 및 산란 광자의 조합이 매우 다양하기 때문에 모든 반응에 대한 확률을 획득하기가 매우 어려우며, 이는 막대한 연산시간과 메모리를 요구한다. 따라서, 이를 해결하기 위해 list-mode 방식이 활용될 수 있다. event i '는 그 종류가 매우 많기 때문에 측정된 event끼리 값을 확률은 매우 낮아 측정 데이터는 모든 종류의 반응에 대해 균일하게 한번씩 발생했다고 가정할 수 있다. 따라서, 모든 반응 종류는 측정된 반응 종류로 대체되며, 측정된 반응에 대해서만 Y_i^b 를 1로 설정하고 그 반응의 발생 확률을 컴프턴 산란 각도 및 검출기내 감쇠 등을 고려하여 이론적으로 계산할 수 있다.

[0082] 이하에서는 실험예를 통해 본 발명을 보다 상세하게 설명한다.

[0083] 실험 방법: 전산모사 기반 실험

[0084] 본 발명에서 제안한 방식의 유효성을 확인하기 위해 Geant4 Application for Emission Tomography(GATE) v7.0 전산모사 툴을 사용했으며, 모델링 조건은 다음과 같다. 도 10은 실험예에 사용된 비집속식 이중 방식 방사선 영상화 장비를 나타내는 사진으로, 반도체 검출기는 2×2 배열형 CZT 검출기를 모델링했다. 해당 장비는 VFG(virtual Frisch-grid) 방법이 적용된 $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 19 \text{ mm}$ CZT 검출기 4개가 배열된 형태이며, 검출기 사이 공간은 6 mm이다.

[0085] 각 검출기는 $3 \times 3 \times 10$ 으로 복셀화되어 X, Y, Z 방향의 공간 분해능은 각각 2, 2, 1.9 mm이다. 선원면은 검출기 배열의 중심으로부터 1 m 반지름을 가진 구로 설정되었으며, 1도 간격으로 나뉘져 181×360 픽셀로 구성된다. 실험을 통해 측정된 에너지 분해능인 662 keV에서 2%를 반영했으며, 두 종류의 전산모사가 수행되었다. 첫 번째는 비집속식 영상기법의 system matrix를 획득하는 전산모사이다. 위의 [수학식 2]에서 $C_{i,j}^a$ 로 표기된 system matrix는 선원 위치에 따른 검출기 응답을 의미하며, 통계적 오차를 감소시키기 위해 충분한 양의 데이터가 요구된다. 따라서, 구 형태의 선원을 모델링하여 장시간 데이터를 획득했다. 두 번째는 영상을 재구성하기 위한 event를 획득하는 전산모사이며, 측정시간은 1시간으로 설정했다. 검출기 중심으로부터 1 m 떨어진 곳에 선원을 위치시켰으며, 획득된 데이터를 기반으로 비집속식, 컴프턴, 융합 영상을 재구성하여 성능을 비교했다. 전산모사 된 선원은 ^{57}Co (122 keV), ^{133}Ba (356 keV), ^{137}Cs (662 keV)이며, 감마선의 주된 반응이 광전흡수에서 컴프턴 산란으로 바뀌는 150 ~ 300 keV의 감마선도 추가로 측정되었다.

[0087] 평가 1: 검출기 구조에 따른 결과

[0088] 도 10의 배열형 검출기 구조와 함께 일반적으로 널리 상용화된 CZT 검출기의 구조 역시 전산모사하여 그 성능을 비교분석했다. 모델링된 상용 장비는 IDEAS사의 SRE-3021 장비로, 내부에 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 의 단일 CZT 검출기가 내장되어 있으며, 측정된 에너지 분해능은 662 keV에서 대략 2.1%이다. 해당 장비는 측면 전극을 대신하여 11×11 로 픽셀화된 양극 구조를 사용하여 VFG 방법과 동일한 효과를 냈으며, 이 픽셀을 통해 X, Y 좌표

를 획득할 수 있다. pixel pitch는 대략 1.72 mm이며, 해당 값을 공간 분해능으로 반영했다. Z 좌표는 앞선 VFG 검출기와 동일하게 양극과 음극의 신호를 기반으로 계산할 수 있으며, 공간 분해능을 1.5 mm로 설정했다. 그 외의 조건은 동일하게 설정했다.

[0089] 도 11 내지 도 15는 실험예에서 다양한 위치의 ^{57}Co 을 비집속식 영상기법으로 재구성한 결과이다. 단일 CZT 검출기는 배열형 검출기에 비해 그 구조가 대칭형에 가깝기 때문에, $(180^\circ, 0^\circ)$, $(270^\circ, 0^\circ)$ 와 같이 검출기면에 대해 수직으로 입사하는 선원은 원형으로 나타났으나, 그로 인해 방향에 따른 검출기 응답 특성이 모호해지는 각도가 발생하여 45° 방향으로 입사하는 선원은 그 분포가 매우 넓게 재구성된다. 반면, 배열형 검출기는 비대칭형 구조로 인해 선원 형태가 원형이 아니지만, 방향에 따른 응답 특성이 명확하게 구분되어 그 위치를 비교적 정확하게 파악할 수 있다. 결론적으로, 검출기는 감마선 입사방향에 따른 비대칭적인 구조를 가지는 것이 중요하며, 부호화된 배열형은 이에 적합하다.

[0091] 평가 2: 에너지별 결과

[0092] 도 16 내지 도 22는 실험예에서 선원이 반도체 검출기의 정면에 위치할 때에 에너지별 비집속식 영상기법, 컴프턴 영상기법 및 융합 영상기법에 따라 생성된 이미지이고, 도 23은 실험예에서 선원이 반도체 검출기의 정면에 위치할 때에 에너지에 따라 평가된 정량 지표를 나타내는 그래프이다.

[0093] (1) 영상 반응수

[0094] 영상화에 사용된 반응수는 비집속식 방식에서 에너지가 증가함에 따라 지수함수적으로 감소한 반면, 컴프턴 방식에서는 250 keV까지 증가하다가 그 이후부터 감소한다. 모든 에너지 대역에서 비집속식 영상의 반응수가 압도적으로 많으며, 융합 영상은 두 영상의 반응을 모두 사용하기 때문에 가장 많다.

[0095] (2) 각도 분해능

[0096] 각도 분해능은 영상에서 선원의 분포가 퍼져있는 정도를 평가하는 지표이며, 영상의 최고점 주변 분포의 full width at half maximum(FWHM)으로 표기하고 그 값이 낮을수록 좋다. 비집속식 영상은 에너지가 증가함에 따라 지수함수적으로 증가하다가 356 keV부터는 그 증가가 완만해졌으나, 실질적으로 300 keV 이상부터는 분포가 너무 넓게 나타나 선원의 위치를 정확하게 파악할 수 없다. 컴프턴 영상은 컴프턴 반응이 거의 발생하지 않아 영상 재구성이 힘든 200 keV 미만의 결과를 제외한 모든 에너지 대역에서 매우 우수한 성능을 보였으며, 에너지가 증가함에 따라 감소하나 662 keV에서는 약간 증가했다. 융합 영상은 두 영상의 중간 정도에서 좋은 쪽에 가까운 값을 보이며, 모든 에너지 대역에서 대략 $10 \sim 20^\circ$ 정도의 값을 나타냈다.

[0097] (3) 선원 부분의 정규화된 표준편차

[0098] 선원 부분의 정규화된 표준편차는 재구성된 선원에 해당하는 픽셀에서의 통계적 요동을 의미하며, 그 값이 낮을수록 좋다. 선원 부분은 영상에서 최고점을 중심으로 거리가 측정된 FWHM보다 작은 픽셀들로 정의된다. 비집속식 영상은 에너지가 증가함에 따라 감소했으며 300 keV부터는 거의 포화되었으나, 이는 영상의 성능이 좋아서 값이 낮은 것이 아닌 선원이 제대로 재구성되지 않았기 때문이다. 컴프턴 영상은 증가하다가 356 keV부터 거의 일정해졌으며, 융합영상은 거의 모든 에너지 영역에서 일정한 값을 나타냈다. 이는 두 영상기법의 변화가 상쇄된 것으로 보인다.

[0099] (d) figure-of-merit

[0100] figure-of-merit(FOM)은 효율과 각도 분해능을 동시에 고려하는 지표로 효율을 FWHM^3 으로 나눈 값으로 정의된다. 본 실험에서는 효율을 반응수로 대체했다. 비집속식 영상은 FOM이 매우 빠르게 감소하며 250 keV를 기점으로 컴프턴 영상보다 낮아졌다. 컴프턴 영상은 356 keV까지 증가하다가 662 keV에서 효율 감소로 인해 같이 감소하는 경향을 보인다. 융합영상은 두 영상기법 중 한 쪽이 압도적으로 우세한 경우(122 keV나 662 keV)에는 해당하는 영상과 동일한 값을 나타내며, 모든 에너지 대역에서 다른 두 영상기법보다 같거나 높다.

[0102] 평가 3: 선원 위치별 결과

[0103] 도 24는 실험예에서 다양한 위치의 ^{57}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs 을 융합 영상기법으로 재구성한 결과이다.

[0104] 도 24는 다양한 (θ, φ) 에 위치한 선원을 재구성한 융합 영상을 보여주며, 각 행은 순서대로 ^{57}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs 의 결과이다. 모든 결과에서 선원이 올바른 위치에 재구성됨을 확인했으며, 영상에서의 최고점을 통해 판단된 선원 위치와 실제 위치의 차이는 평균과 최대값은 각각 2.5° 로 오차가 매우 작았다.

[0106] 이상 본 발명을 구체적인 실시예를 통하여 상세히 설명하였으나, 이는 본 발명을 구체적으로 설명하기 위한 것으로, 본 발명은 이에 한정되지 않으며, 본 발명의 기술적 사상 내에서 당 분야의 통상의 지식을 가진 자에 의해 그 변형이나 개량이 가능함이 명백하다.

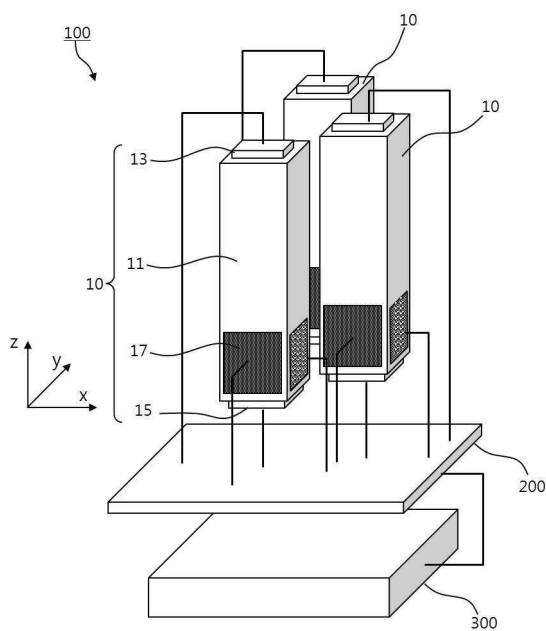
[0107] 본 발명의 단순한 변형 내지 변경은 모두 본 발명의 영역에 속한 것으로 본 발명의 구체적인 보호 범위는 첨부된 특허청구범위에 의하여 명확해질 것이다.

부호의 설명

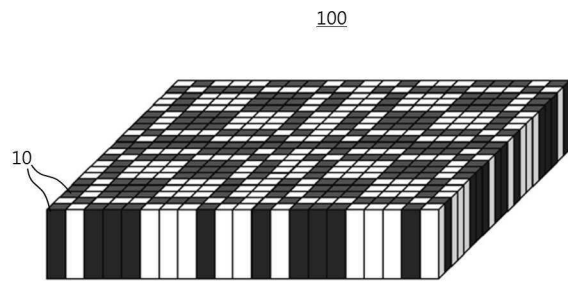
[0109] 10: 반도체 검출기 11: 반도체 소자
13: 음극 15: 양극
17: 옆전극 100: 검출부
200: 신호측정부 300: 영상처리부

도면

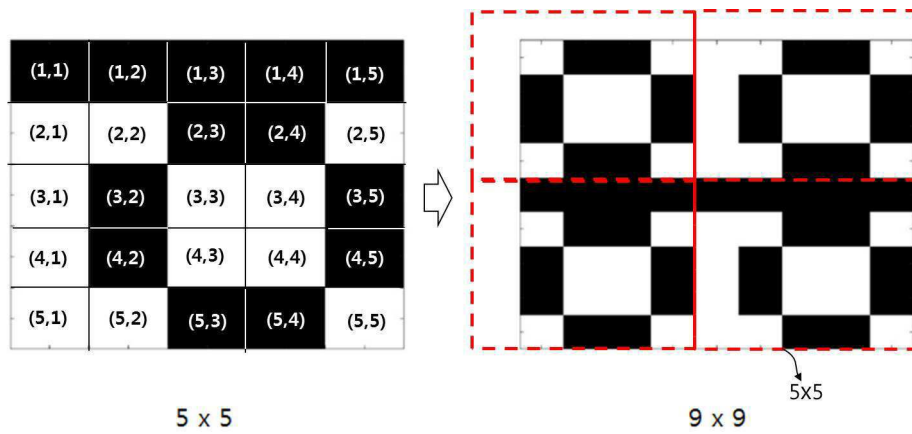
도면1



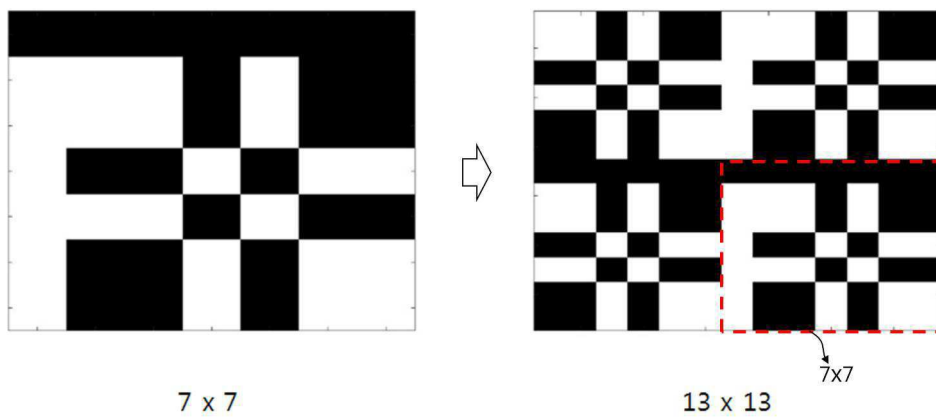
도면2



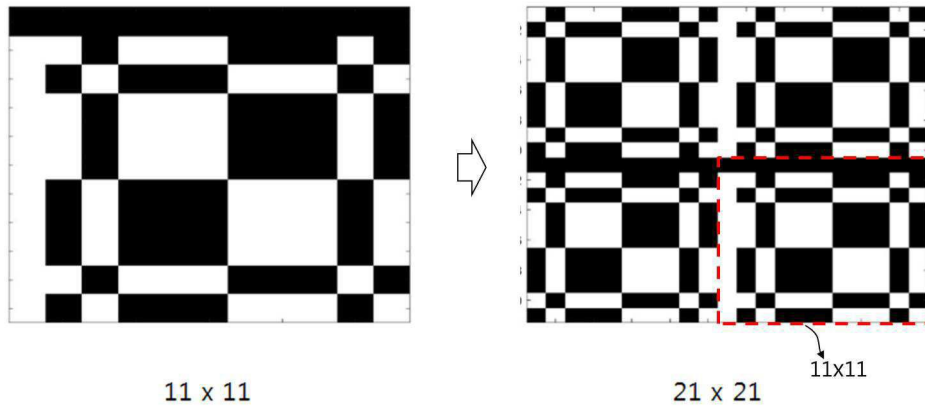
도면3



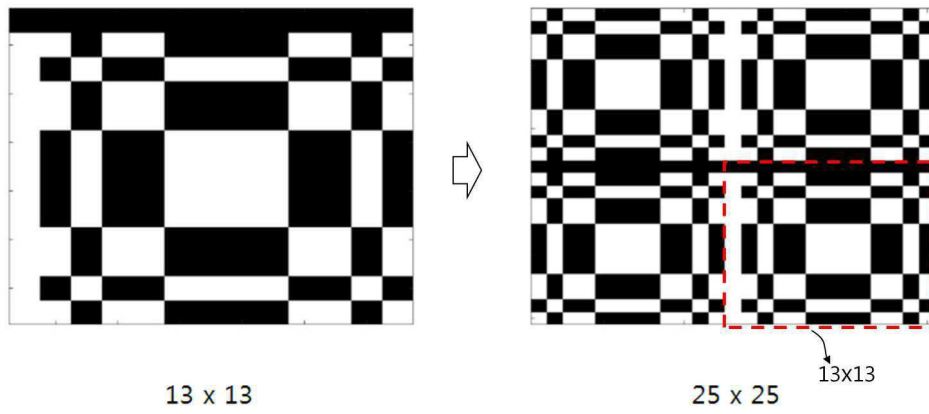
도면4



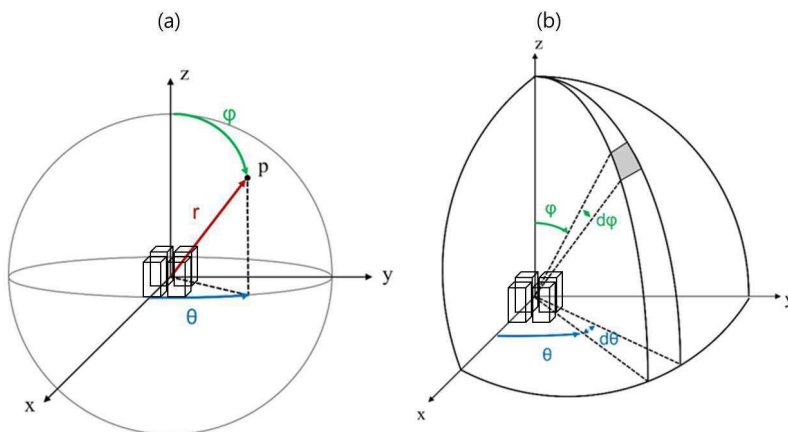
도면5



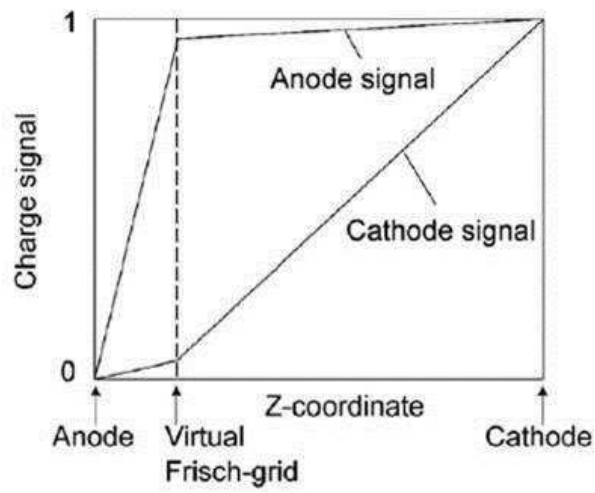
도면6



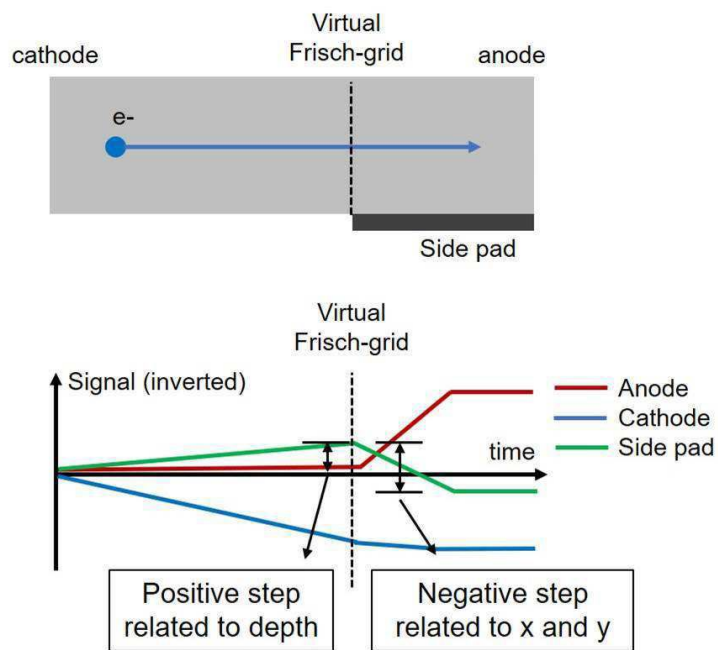
도면7



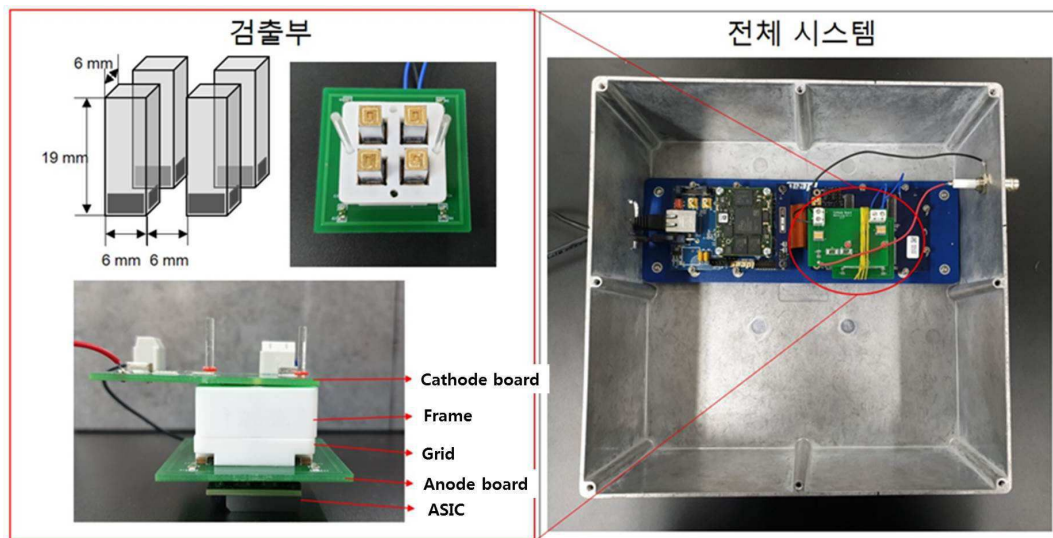
도면8



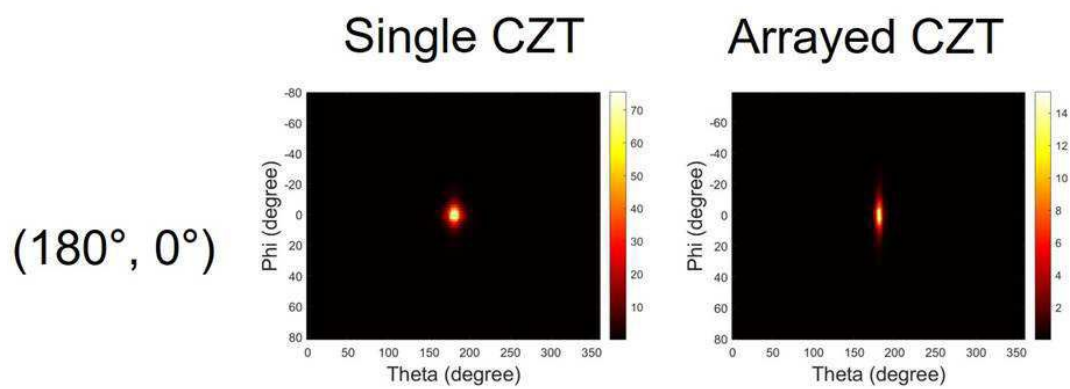
도면9



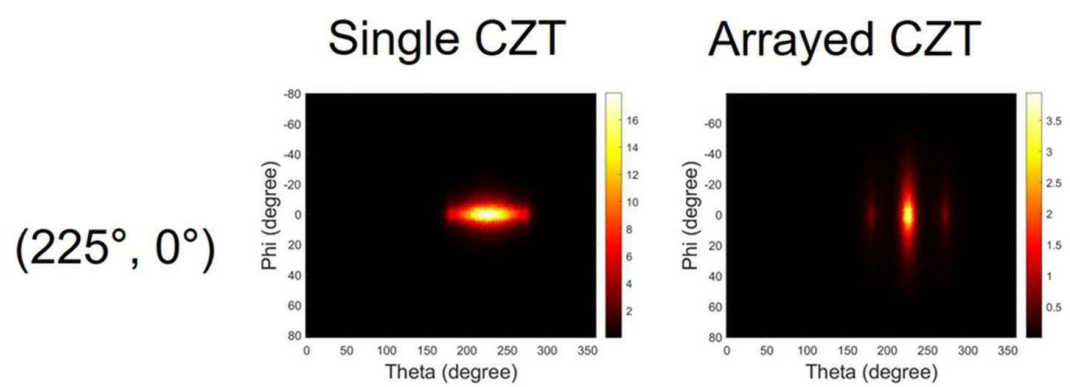
도면10



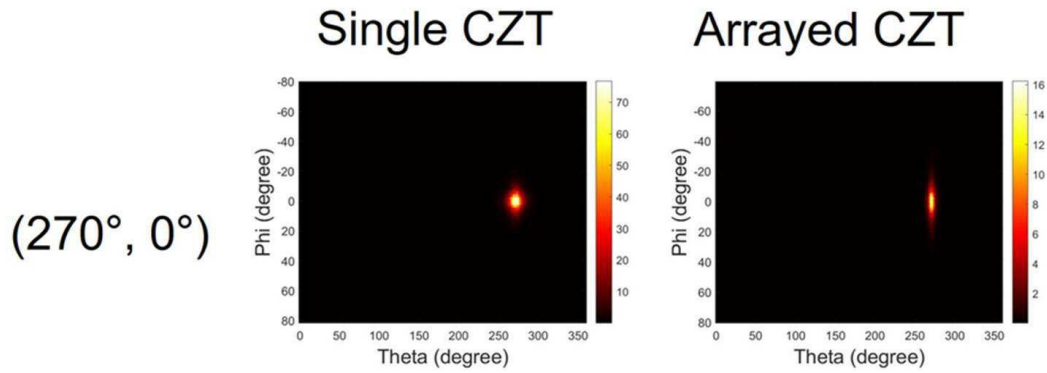
도면11



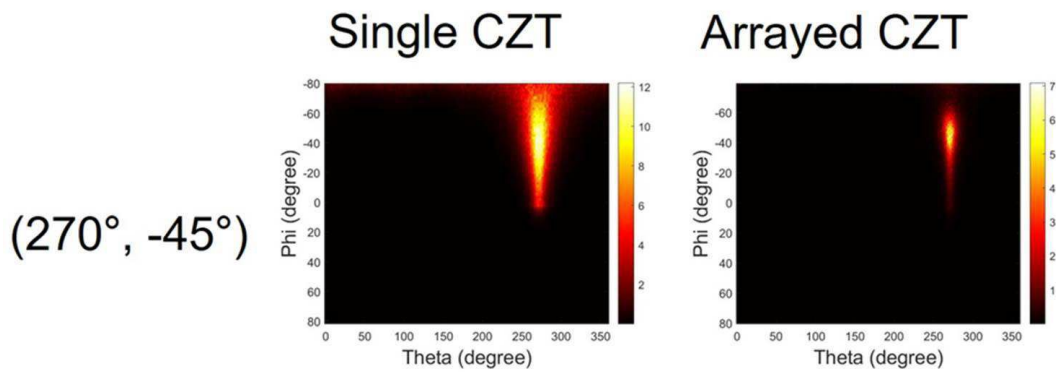
도면12



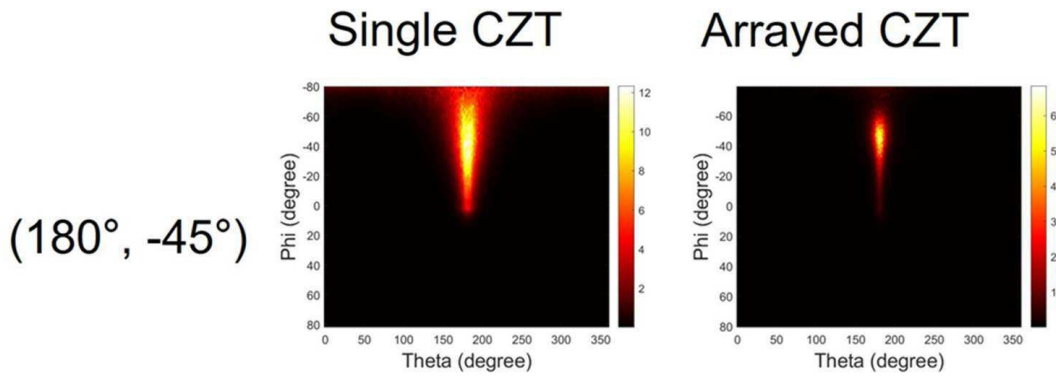
도면13



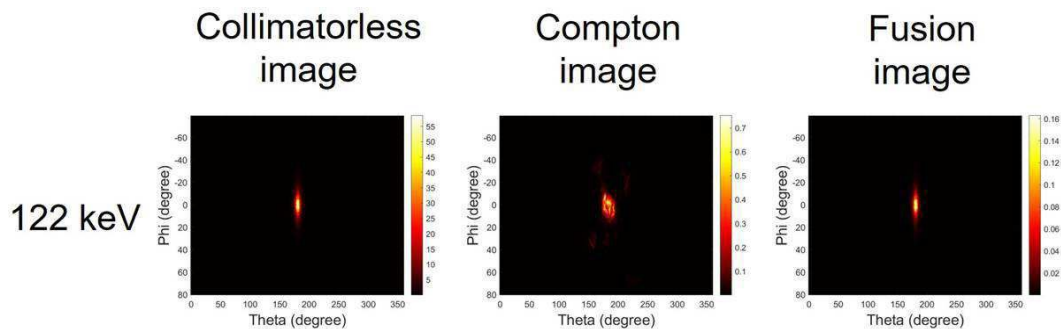
도면14



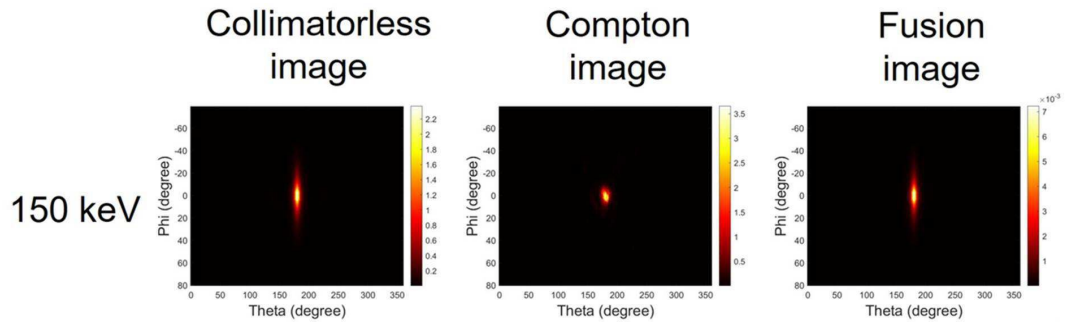
도면15



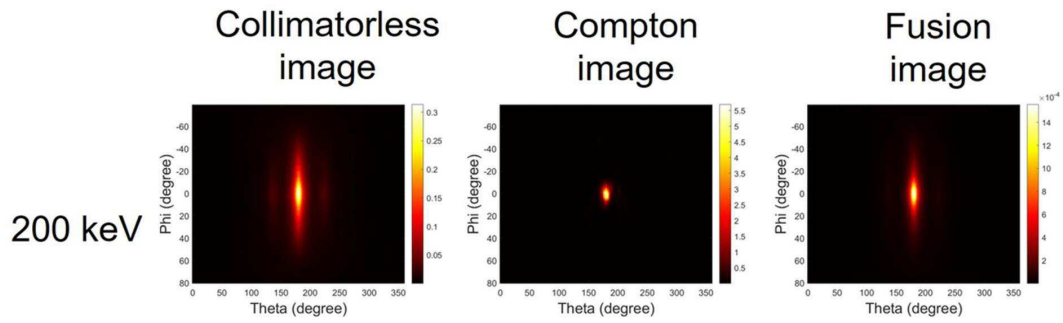
도면16



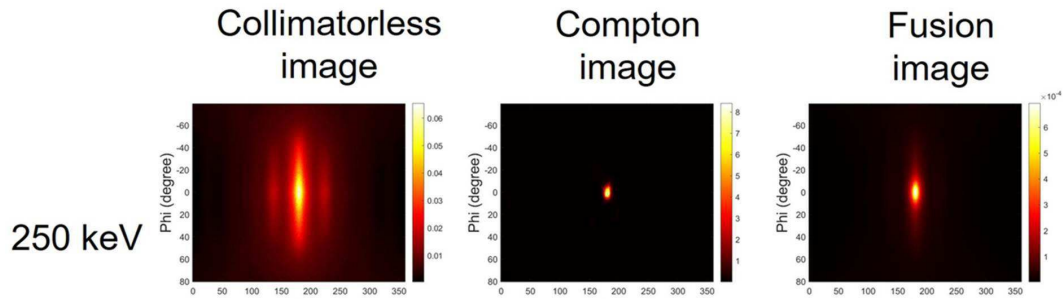
도면17



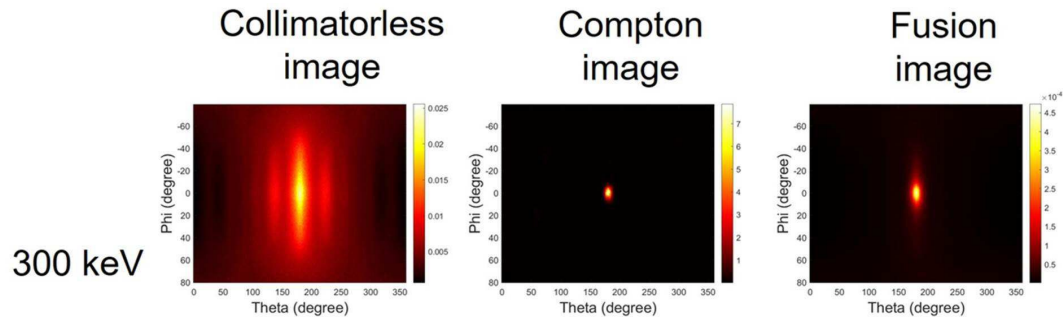
도면18



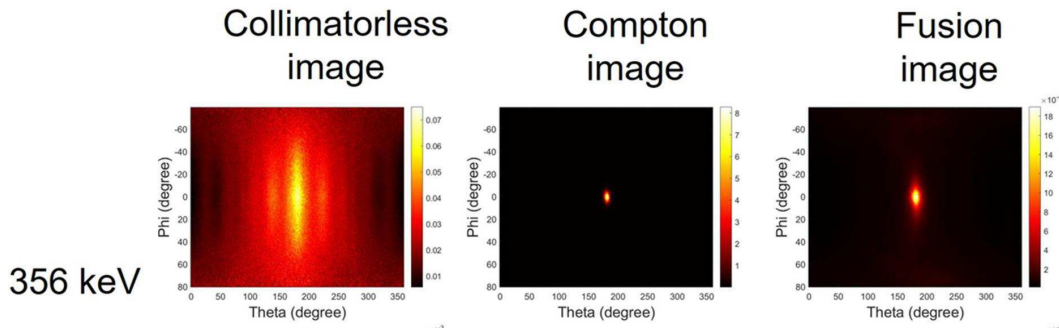
도면19



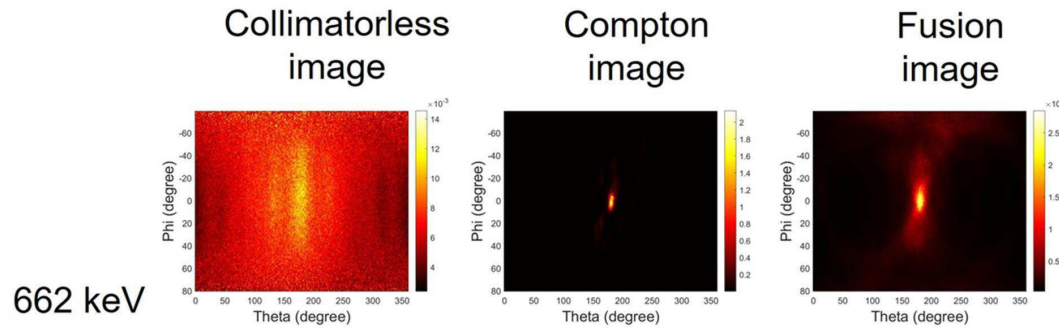
도면20



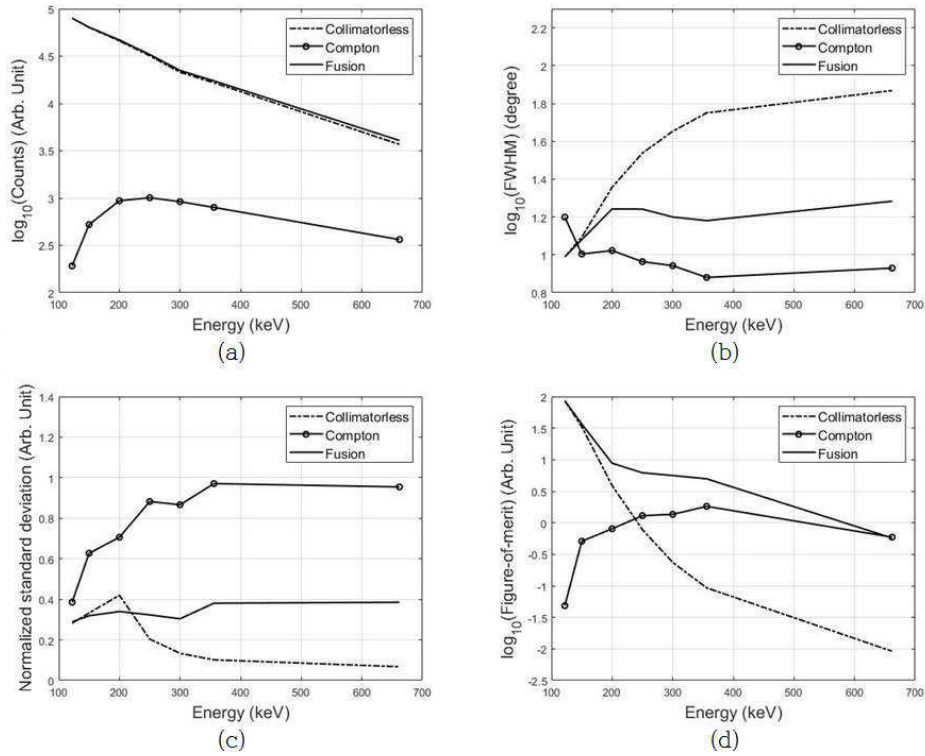
도면21



도면22



도면23



도면24

