

## 고감도 MOSFET 선량계 방사선학적 특성 연구

한양대학교 원자력공학과

조성구 · 김찬형

MOSFET 선량계는 기존의 선량계들에 비해 여러 가지 장점이 있기 때문에 최근에 방사선 치료 뿐만 아니라 방사선 진단 등 기타 여러 분야에서 선량검증을 위해 시도되고 있다. 하지만 이렇게 사용되기 위해서는 중·저에너지 범위의 광자선에 대한 MOSFET 선량계의 방사선학적 특성파악이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 고감도 MOSFET 선량계의 여러 가지 방사선학적 특성을 자세하게 연구할 수 있는 3차원 몬테칼로 전산모사 모델을 개발하였다. 고감도 MOSFET 선량계의 검출부위는 매우 얇아서 MCNP에서 기본적으로 제공하는 Tally를 사용하면 검출부위에 흡수된 에너지를 정확하게 결정할 수 없으므로 검출부위에 주어진 에너지를 전자들의 트랙들로부터 직접 계산하는 방법을 채택하였다. 개발된 모델은 에너지 의존도, 전자 기여도, 깊이 의존도 등의 MOSFET 선량계의 방사선학적 특성을 연구하기 위해 사용되었다. 에너지 의존도는 15 keV에서 6 MeV 에너지 범위에서 정량화하였는데 약 40 keV에서 최대 6.6으로 나타났다. 본 연구에서는 PTRAC 파일과 Sabrina 코드를 이용하여 MOSFET 선량계 각 부분에서의 전자 기여도를 조사하였다. 깊이 의존도는 신체 내 평균 깊이를 15 cm로 가정할 때 0.662 MeV의 경우는 교정인자 1.16 그리고 1.25 MeV의 경우는 교정인자 1.11을 사용하여 깊이 의존도에 의한 오차를 줄일 수 있다.

**중심단어:** MOSFET 선량계, 에너지 의존도, 전자 기여도, 깊이 의존도

### 서 론

MOSFET 선량계는 1974년에 처음 방사선의 측정에 사용된 것이 보고되었으며 그 이후 꾸준히 우주선 측정과 방사선 치료선량 검증 등에 사용되어왔다. 특히 MOSFET 선량계는 최근 Computed Tomography, 세기조절방사선 치료(IMRT) 등과 같은 진단 및 치료 분야에 선량검증을 위한 선량계로서 다양하게 사용되기 시작했으며, 그 사용 목적에 따라 MOSFET 선량계의 방사선학적 특성이 연구되어졌다. MOSFET 선량계는 기존의 선량계들에 비해 크기가 작고 실시간 판독이 가능하며 사용이 매우 용이하다는 장점이 있어서 최근 Computed Tomography, X-ray fluoroscopy, 마이크로빔 방사선치료, low energy brachytherapy, 엑스선유방조영법 등 방사선 치료 뿐만 아니라 방사선 진단 등 기

타 여러 분야에서 선량검증을 위해 시도되고 있다.<sup>1-4)</sup> 하지만 이렇게 사용되기 위해서는 중·저에너지 범위의 광자선에 대한 MOSFET 선량계의 방사선학적 특성파악이 선행되어야 한다. 진단용 엑스선 등 중·저에너지 범위의 광자에 대하여 MOSFET 선량계가 주로 실리콘으로 만들어졌다는 것을 고려할 때 약간의 에너지 의존도를 보일 것으로 예상되나 순수한 이론에 의한 선량 해석은 쉽지 않다. 또한 MOSFET 선량계의 방사선학적 특성을 실험에 의해 연구하는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 이러한 문제를 해결하고 MOSFET 선량계의 방사선학적 특성을 조사하기 위하여 몬테칼로 전산모사를 사용할 것이 제안되었다. 몬테칼로 전산모사는 단일에너지의 광자를 모사하기 용이하다는 장점이 있으며, 또한 선량계의 구조 및 물질을 쉽게 변화시키며 그 특성을 조사할 수 있다.

본 연구에서는 MOSFET 선량계의 여러 가지 방사선학적 특성을 정밀하게 연구할 수 있는 3차원 몬테칼로 전산모사 모델을 개발하였다. 개발된 모델은 선량계 내에서의 에너지 분포를 계산하기 위하여 커마를 사용하지 않고 전자 트랙들로부터 에너지 분포를 직접 계산하였으며 이를 이용하여 MOSFET 선량계의 에너지 의존도, 전자 기여도, 깊이 의존도 등의 방사선학적 특성을 연구하였다.

본 연구는 한양대학교 방사선안전기술연구센터(ITRS) 연구비 지원에 의해 수행되었음.

이 논문은 2004년 10월 19일 접수하여 2004년 11월 16일 채택되었음.

책임저자 : 김찬형, (133-791) 서울시 성동구 행당동 17

한양대학교 원자력공학과

Tel: 02)2290-0513, Fax: 02)2290-0513

E-mail: chkim@hanyang.ac.kr

## 재료 및 방법

### 1. 고감도 MOSFET 선량계

본 연구에서 모델링한 고감도 MOSFET 선량계는  $1 \text{ mm}^2$  면적과  $0.25 \text{ mm}$  두께의 실리콘 칩으로 구성되어 있다. 이 칩은 블록 에폭시 벌브(epoxy bulb)의  $0.85 \text{ mm}$  층 밑에 위치한다. 실리콘 칩은 각각 실제 면적( $0.2 \times 0.2 \text{ mm}$ )과 실제 검출 두께( $1 \mu\text{m}$ )로 이루어진 두 MOSFET 장치를 포함한다. 만약 상당히 큰 음전압이 폴리실리콘 게이트에 걸린다면 전장은 정공을 실리콘 회로기판으로부터 Si/SiO<sub>2</sub> 경계면으로 끌어당기고 이것은 선원과 드레인 사이에 흐르는 전류를 허용하는 도체 밴드로부터 정공을 끌어당긴다. 전류의 흐름이 시작되기 위해서 필요한 전압은 일반적으로 장치 문턱전압(device threshold voltage)으로 알려져 있다. 방사선이 MOSFET 장치에 조사되면 검출부위(SiO<sub>2</sub>) 등에 전자-정공 쌍이 생성되고 생성된 정공들은 전장에 의해 Si/SiO<sub>2</sub> 경계면을 향하여 이동하고, 최종적으로 정공들 중의 일부는 경계면 주위에서 영구적으로 고정되며 이것은 장치 문턱전압을 감소시킨다. 이러한 장치 문턱전압의 변화는 조사된 선량에 비례하고 이것을 이용하여 조사된 방사선량을 실시간으로 측정할 수 있다. 현재 전 세계에 MOSFET 선량계를 생산, 공급하고 있는 회사는 캐나다의 Thomson and Nielson Electronics, Ltd이며 표준형과 고감도형의 두 가지 종류의 MOSFET 선량계를 보급하고 있다. 고감도 MOSFET 선량계는 표준 MOSFET 선량계보다 3배 더 민감한 장점이 있어서 방사선진단 등 주로 저 선량 분야에서 많이 사용된다. 고감도 MOSFET 선량계는 표준 MOSFET 선량계보다 약 3배 더 민감한 장점이 있어서 방사선진단 등 주로 저 선량 분야에서 많이 사용된다. 표준형과 고감도형 선량계 모두 같은 수명을 갖고 있으며 문턱전압이동이 20 V가 되면 더 이상 사용할 수 없게 된다. 표준 MOSFET 선량계는 고감도 MOSFET 선량계와 비교할 때 민감도가 낮으므로 천천히 소진되며, 이러한 이유로 표준 MOSFET 선량계는 주로 방사선치료 등 고 선량 분야에서 사용된다. 본 연구의 주요 목적은 MOSFET 선량계를 유효선량측정 시스템(EDMS)에 사용하는데 주안점을 두고 수행했으며 주로 진단 엑스선 등 저선량, 저에너지대의 방사선이 주요 관심 대상이다. 본 연구는 고감도 MOSFET 선량계(TN-1002RD, Thomson and Nielson Electronics, Ltd., 캐나다)의 방사선학적 특성만을 조사하였지만 개발된 모사방법 자체는 표준형 MOSFET 선량계의 연구에도 동일하게 적용할 수 있다.

### 2. 몬테칼로 전산모사

본 연구에서는 고감도 MOSFET 선량계의 3차원 몬테칼로 모델을 MCNP4C를 사용하여 개발하였다.<sup>5)</sup> MCNP 코드는 매우 복잡한 형태의 구조와 물질을 쉽게 다룰 수 있어 광자와 전자의 입자수송에 많이 사용되고 있다. MCNP4C 코드에서 사용자는 여러 가지 종류의 면들을 이용하여 셀을 정의할 수 있고 보통 한 모델은 여러 개의 셀로 구성된다. 본 연구에서 셀은 MOSFET 선량계의 각 부분들을 정의하기 위해 사용하였다. 이러한 방법으로 구조를 정의하고 각각의 물질을 정의한 후 광자 및 전자 등의 입자의 수송을 모사하여 선량분포, 에너지 스펙트럼 등과 같은 다양한 방사선학적 특성을 연구하였다. 고감도 MOSFET 선량계의 검출부위는 매우 얇아서 MCNP에서 기본적으로 제공하는 Tally를 사용하면 검출부위에 흡수된 에너지를 정확하게 결정할 수 없다. 예를 들면 F6 Tally는 커마(Kerma) 또는 충돌커마(Collision Kerma)를 계산하고 여기서 하전입자평형(CPE)을 가정하여 흡수선량을 결정하는 데 사용한다. 하지만 MOSFET 선량계의 전산모사에서는 검출부위 내에 하전입자평형이 존재하지 않으므로 이 방법을 이용하여 흡수선량을 계산할 수 없다. 즉, MOSFET 선량계의 검출부위는 매우 얇고 표면에 위치하기 때문에 전면에서 발생하여 검출부위로 들어오는 전자의 수(더 정확하게는 총 운동에너지)와 검출부위 내에서 발생하여 검출부위 외부로 빠져나가는 전자의 수(총 운동에너지)가 정확하게 일치하지 않는다.

이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 검출부위에 주어진 에너지를 전자들의 트랙들로부터 직접 계산하는 방법을 채택하였다. 이를 위하여 Schaart 등이 제안한 방법을 사용하였는데 먼저 전자의 수송을 모사하고 동시에 MCNP의 F4 : E Tally를 사용하여 검출부위 내에서 전자들의 플루언스(flucence)를 계산하고 여기에 SiO<sub>2</sub>에 대한 선량반응함수(dose response function)를 곱하여 검출부위에 대한 흡수선량을 계산하는 방법이다.<sup>6)</sup> 이때 사용되는 선량반응함수는 Schaart 등이 제안한 방법을 사용하여 결정하였다.

MCNP에서 기본적으로 제공하는 에너지 indexing algorithm은 MCNP 에너지 틀과 정확하게 일치하지 않아 전자의 수송계산에 있어서 오차를 발생시키며 특히 전자의 에너지가 아주 낮을 때 문제가 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 DBCN 카드를 이용하여 에너지 indexing algorithm을 ITS-type의 에너지 indexing algorithm으로 바꾸어 사용하였다.<sup>6-8)</sup>

개발된 모델은 리눅스 체제 하에서 512 MB RAM에

dual-P4-1.7GHz-CPU 기기를 사용하여 MCNP4C 코드로 수행하였으며 몬테칼로 전산모사의 확률오차는 5% 보다 낮게 유지하였다.

## 결 과

### 1. 에너지 의존도

일반적으로 검출기의 에너지 의존도는 단위 공기커마당 선량계 지시값의 입사방사선 에너지에 대한 변화로서 주어진 에너지에서 검출기가 공기커마를 어느 정도 과대 또는 과소평가하는가를 보여주는 지표가 된다.<sup>9)</sup> MOSFET 선량계는 공기등가물질(air-equivalent material)로 이루어지지 않으므로 약간의 에너지 의존도를 보이는데, 이 에너지 의존도는 실리콘의 질량에너지흡수계수와 공기의 질량에너지흡수계수와의 차이가 큰 낮은 에너지대에서 크게 일어난다.

Fig. 1은 몬테칼로 전산모사에 의해 계산된 상대적 에너지 의존도를 보여 주며(실선) 이를 이론적인 값, 즉 실리콘과 공기의 질량에너지흡수계수의 비(점선)와 비교한다. 참고로, 이 결과는 검출기 앞에 build-up 물질이 충분히 있는 경우이며 6 MeV에서 같은 값을 보이도록 조정되었다. 일반적으로 MOSFET 선량계의 에너지 의존도 곡선은 질량에너지흡수계수의 비를 따른다. 또한 MOSFET 선량계의 민감도는 광자 에너지가 100 keV보다 작아질 때 상당히 증가한다. 그것은 광자 에너지가 감소할수록 더욱 증가하고 약 40 ke에서 최대값 6.6에 도달한다. 이 저에너지 범위에서의 급격한 선량과대평가는 실리콘의 광전효과 상호작용계수가 낮은 에너지대에서 급격하게 증가하기 때문이다. 하지만 에너지가 더 감소하게 되면 민감도가 급격히 감소하는데 이는 선량계의 자체감쇄 효과에 의한 것이다. 따라서 자체감쇄에 대하여 보정을 하게 되면 민감도 곡선은 바로 질량에너지흡수 곡선비로 돌아가는 것을 볼 수 있다(Fig. 1의 ●마크 참조).

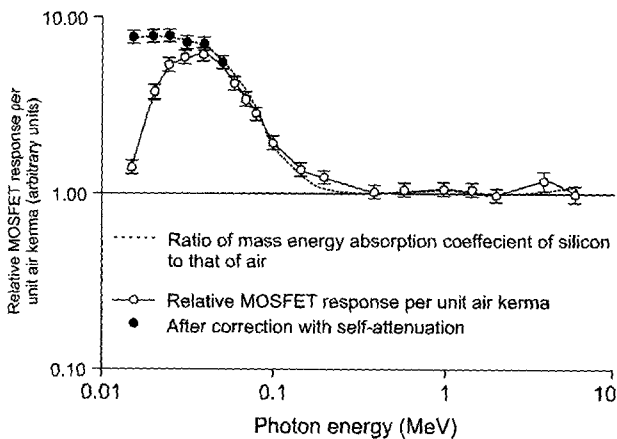


Fig. 1. Energy dependence of the MOSFET dosimeter.

2. 전자 기여도

본 연구에서는 MOSFET 선량계 각 부분에서 얼마만큼의 전자들이 생성되어 검출부위에 그 선량을 기여하는지를 조사하였다. 이러한 정보는 제작사가 선량계의 특성을 향상시키는 데 꼭 필요한 자료이다. 이를 위하여 MCNP 전산모사를 통하여 입자의 트랙 정보를 PTRAC 파일에 저장하고 Sabrina 코드를 이용하여 입자의 경로를 추적하였다. 전자의 경로가 검출부위에서 흡수선량에 기여한 경우만 고려하기 위하여 PTRAC 파일을 발생시킬 때 "TALLY" 옵션을 사용하였다. 또한, Sabrina에서 여러 개의 필터를 사용하여 각각 발생된 전자의 위치를 확인하였다.

### 2. 전자 기여도

Table 1은 광자 빔이 실리콘 방향에 조사될 때 검출부위의 선량에 기여하는 전자의 분포를 보여 준다. 20 keV 광

Table 1. Number of electrons contributing to absorbed dose for different photon energies.

Components	Photon energy (MeV)					
	0.02	0.06	0.18	0.662	2.0	6.0
Silicon base	96 (50%)	103 (76%)	158 (85%)	176 (97%)	135 (75%)	142 (76%)
Epoxy bulb	0 (0%)	0 (0%)	5 (3%)	2 (1%)	6 (3%)	1 (1%)
SiO <sub>2</sub> sensitive volume	54 (28%)	21 (15%)	21 (11%)	1 (1%)	1 (1%)	0 (0%)
Polysilicon (0.5 micron)	25 (13%)	4 (3%)	1 (1%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
PSG (2 micron)	13 (7%)	5 (4%)	1 (1%)	1 (1%)	0 (0%)	0 (0%)
Cable (Kapton, Ni, Au)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	1 (1%)	37 (21%)	44 (24%)
Others (e.g., Aluminum)	3 (2%)	3 (2%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)

자의 경우 대부분의 전자들은 검출부위 내에서 발생한다. 이것은 저에너지 광자의 경우 발생하는 이차 전자의 비정이 매우 짧기 때문이다. 또한, 상당 부분의 전자들이 검출부위 후면에 위치하고 있는 폴리실리콘과 PSG 층(2.5 μm)으로부터 온다는 것을 알 수 있다. 이것은 저에너지 광자에 경우 광전효과가 가장 많이 일어나고 전자는 전 방향을 향하여 거의 균일하게 발생하기 때문이다. 광자 에너지가 180 keV 정도로 증가하면 이 얇은 층으로부터 오는 전자의 양은 급격히 감소한다. 이것은 광자 에너지가 높아짐에 따라 이차 전자의 비정이 증가하고 대부분 앞 방향으로 발생되기 때문이다. 광자 에너지가 더 증가하게 되면 전자의 비정이 급격히 증가하고 따라서 대부분의 전자가 실리콘 베이스에서 생성이 되어 검출부위에 기여한다. 마지막으로 광자의 에너지가 2 MeV보다 커지면 검출부위의 선량에 기여하는 상당 부분(약 20% 이상)의 전자들이 캡톤 케이בל에서 발생하여 검출부위에 도착한다.

### 3. 깊이 의존도

광자가 피부를 통과한 후에 초기 단일 에너지 스펙트럼은 산란효과에 의해 완화된다. 결과적으로 더 많은 광자들이 더 낮은 에너지에서 발생된다. 이러한 에너지 스펙트럼의 변화에 따라 저에너지에서 MOSFET 선량계는 실제 조직선량보다 더 높은 반응을 나타낸다. 깊이 의존도의 문제는 저에너지 범위에서만 현저한 에너지 의존도를 보이고 고에너지 광자에 대해서는 별 문제가 되지 않는다. 본 연구에서 광자 빔은 MOSFET의 표면에 수직으로 입사한다. 이 모델은 전자로부터 직접적으로 MOSFET 반응을 평가하기 위해서 30 cm 두께의 팬텀 내의 다양한 깊이에 위치한다. 조직커마는 선량계 위치에서 track length estimator에 의해 기록된 길이선량의 비를 처음으로 계산하고 그것은 최대조직선량이 발생하는 1 cm의 값으로 정량화한다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 일반적으로 MOSFET 선량계는 조직 팬텀 내에서 선량계의 깊이가 증가할수록 선량값을 과대평가하는 것을 알 수 있다. 예를 들면 MOSFET 선량계는 662 keV 입사 광자에 대해 조직 팬텀 내 30 cm 깊이에서 위치할 때 조직커마를 23% 과대평가했다. 더 높은 에너지의 입사 광자에 대해 깊이 의존도 문제는 덜 중요하다. 본 연구에서는 MOSFET 선량계가 동일한 조건에서 1.25 MeV 광자에 대해 11% 과대평가했으며 이 오차는 80 keV에서 34%로 늘어난다는 것을 알았다. 또한 Fig. 2에 따라 교정인자를 산출할 수 있는데 MOSFET 선량계의 신체 내 평균 깊이를 15 cm로 가정(MIRD 인체 모형 전후 평균 10 cm, 좌우 평균 20

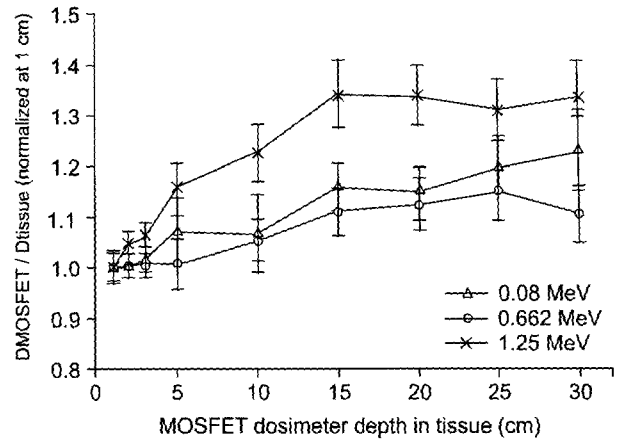


Fig. 2. Depth dose dependence of the MOSFET dosimeter.

cm의 산술평균) 할 때 0.662 MeV의 경우는 교정인자 1.16 그리고 1.25 MeV의 경우는 교정인자 1.11을 사용하여 깊이 의존도에 의한 오차를 줄일 수 있다.

### 결론

본 연구에서는 몬테칼로 전산모사 방법을 사용하여 고감도 MOSFET 선량계의 3차원 몬테칼로 전산모사 모델을 개발하였다. 동 전산모델을 개발하는데 있어서 마이크로 크기의 극히 얇은 검출부위에서도 흡수선량을 정확히 평가하기 위한 방법을 개발하여 사용하였으며, 이 방법은 일차적으로 전자들을 수송시키고 이때 전자들의 트랙들을 F4 Tally를 이용하여 기록한 후, 개발된 선량반응함수를 이용하여 검출부위에서의 선량을 결정하는 방법이다. 개발된 모델은 에너지 의존도, 깊이 의존도 등 MOSFET 선량계의 방사선학적 특성을 연구하기 위하여 사용되었다. 에너지 의존도는 15 keV에서 6 MeV 에너지 범위에서 정량화하였는데 약 40 keV에서 최대 6.6으로 나타났다. 에너지 의존도는 일반적으로 실리콘과 공기의 질량에너지흡수계수 비를 따른다는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서는 PTRAC 파일과 Sabrina 코드를 이용하여 MOSFET 선량계 각 부분에서의 전자 기여도를 조사하였는데, 이렇게 생성된 자료는 MOSFET 선량계의 특성을 향상시키고 구조를 최적화하는데 꼭 필요한 자료로 사용될 것으로 기대된다. 깊이 의존도는 MOSFET 선량계의 신체 내 평균 깊이를 15 cm에서 0.662 MeV의 경우는 교정인자 1.16 그리고 1.25 MeV의 경우는 교정인자 1.11을 사용하여 깊이 의존도에 의한 오차를 줄일 수 있다.

앞으로의 계획은 개발된 전산모델과 국내에서 이용 가능한 여러 가지 방사선장들을 이용하여 MOSFET 선량계의 감도, 선형성, 시간 의존성 등을 더욱 자세하게 조사하고 이러한 방사선학적 특성이 완료가 되면 약 40개의 MOSFET 선량계를 CIRS 인체모형에 삽입하여 인체 각 장기의 선량과 유효선량을 측정하는 연구들을 수행할 예정이다.

### 참 고 문 헌

1. Bower MW, Hintenlang DE: The characterization of a commercial MOSFET dosimeter system for use in diagnostic x-ray. *Health Phys* 75:197-204 (1998)
2. Sessions JB, Roshau JN, Tressler MA, et al: Comparisons of point and average organ dose within an anthropomorphic physical phantom and a computational model of the newborn patient. *Med Phys* 29:1080-1089 (2002)
3. Brauer-Krisch E, Bravin A, Lerch M, et al: MOSFET dosimetry for microbeam radiation therapy at the European Synchrotron Radiation Facility. *Med Phys* 30:583-589 (2003)
4. Dong SL, Chu TC, Lee JS, et al: Estimation of mean-glandular dose from monitoring breast entrance skin air kerma using a high sensitivity metal oxide semiconductor field effect transistor (MOSFET) dosimeter system in mammography. *Appl Radiat Isotopes* 57:791-799 (2002)
5. Breisemeister JF: MCNP A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 4C. Los Alamos National Lab, Los Alamos, NM (2000)
6. Schaart DR, Jansen JTM, Zoetelief J, Leege PFA: A comparison of MCNP4C electron transport with ITS 3.0 and experiment at incident energies between 100 keV and 20 MeV: influence of voxel size, substeps and energy indexing algorithm. *Phys Med Biol* 47:1459-1484 (2002)
7. Berger MJ, Wang R: Multiple scattering angular deflections and energy-loss straggling. *Monte Carlo Transport of Electrons and Photons* edited by TM Jenkins, WR Nelson, A Rindi. Plenum, New York, 1988, pp. 21-56
8. Jeraj R, Keall PJ, Ostwald PM: Comparison between MCNP, EGS4 and experiment for clinical electron beams. *Phys Med Biol* 44:705-717 (1999)
9. Attix FH: Introduction to radiological physics and radiation dosimetry, John Wiley & Sons, Inc., New York, (1986)

## Radiological Characterization of the High-sensitivity MOSFET Dosimeter

Sung Koo Cho, and Chan-Hyeong Kim

Nuclear Engineering Department, Hanyang University

Due to their excellence for the high-energy therapy range of photon beams, researchers show increasing interest in applying MOSFET dosimeters to low- and medium-energy applications. In this energy range, however, MOSFET dosimeter is complicated by the fact that the interaction probability of photons shows significant dependence on the atomic number,  $Z$ , due to photoelectric effect. The objective of this study is to develop a very detailed 3-dimensional Monte Carlo simulation model of a MOSFET dosimeter for radiological characterizations and calibrations. The sensitive volume of the High-Sensitivity MOSFET dosimeter is very thin ( $1\mu\text{m}$ ) and the standard MCNP tallies do not accurately determine absorbed dose to the sensitive volume. Therefore, we need to score the energy deposition directly from electrons. The developed model was then used to study various radiological characteristics of the MOSFET dosimeter. the energy dependence was quantified for the energy range 15 keV to 6 MeV; finding maximum dependence of 6.6 at about 40 keV. A commercial computer code, Sabrina, was used to read the particle track information from an MCNP simulation and count the tracks of simulated electrons. The MOSFET dosimeter estimated the calibration factor by 1.16 when the dosimeter was at 15 cm depth in tissue phantom for 662 keV incident photons. Our results showed that the MOSFET dosimeter estimated by 1.11 for 1.25 MeV photons for the same condition.

**Key Words:** MOSFET dosimeter, Energy dependence, Regional electron contributions, Depth dose dependence