

Fabrication and Evaluation of Mercury(II) Iodide Unit Cell Dosimeter to Confirm the Feasibility of Digital Quality Assurance in Intracavitary Radiotherapy

Jae-Hoon Jung¹, Sung-Kwang Park^{2,*}

¹Department of Research Institute for Convergence of Biomedical science and technology, Yangsan Hospital, Pusan National University

²Department of Radiation Oncology, Busan Paik Hospital, Inje University

Received: May 03 2022. Revised: June 24, 2022. Accepted: June 30, 2022.

ABSTRACT

In intracavitary radiotherapy, it is essential to verify the correct location of radiation source among quality control items because an incorrect location will irradiate an unnecessary dose to normal tissues. As a basic study of digital line dosimeters, this study fabricated a unit cell dosimeter based on polycrystalline mercury (II) iodide (HgI₂) and compared its performance with a diode. The study result showed that for reproducibility, the relative standard deviation (RSD) was 1.21%, satisfying the RSD evaluation criterion of within 1.5%. Considering linearity, the coefficient of determination R² showed an excellent result of 0.9997. Regarding the evaluation of distance dependence, it showed a similar trend in general with a difference of 0.035 cm for intensity 50% when compared with the inverse square value. This study suggests the applicability of a digital dosimeter for brachytherapy quality control by evaluating the performance of the HgI₂ dosimeter. This study on dosimeter for candidate photoconductor materials can be used as basic data in all areas using radiation.

Keywords: Semiconductor, HgI₂, Dosimeter, Intracavitary radiotherapy

I. INTRODUCTION

강내 치료는 밀봉된 동위원소를 이용하여 종양 내부나 종양 주변에 직접 넣어 방사선을 조사하는 방법으로 주로 자궁경부암, 전립선암 등의 치료에 많이 활용하고 있다^[1]. 이때 계획되어진 동위원소의 잘못된 체류위치는 정상조직에 불필요한 선량을 조사하게 되므로, 근접치료의 정도관리에서 방사선원 위치의 정확도를 검증하는 것은 필수적이다^[2,3].

현재 방사선원의 위치를 검증하는 방법은 눈금자나 방사선 사진, 비디오 모니터 등을 조합하여 검증하고 있다. 하지만 이러한 방법은 육안으로 검증할 수밖에 없어 정확도가 떨어지며, 정량적인 값

을 제시할 수 없기에 그 오차 또한 확인 할 수 없는 단점이 있다^[4,6]. 그러므로 임상에서는 디지털 기반의 line 선량계의 필요성이 부각되고 있다.

대표적인 반도체 선량계인 실리콘 다이오드 (silicon diode)는 예측되는 전하와 선량의 선형적인 특성을 가지고 있기 때문에 방사선 치료의 정도관리를 위한 선량계로 활용되고 있다. 하지만 방사선 손상에 의해 선량계의 감도가 낮아지는 단점을 가지고 있다. 이러한 이유로 최근 들어 CdZnTe, HgI₂, TlBr, PBO 등 광도전체를 이용한 반도체 선량계에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다^[7-10]. 이 중 Mercury (II) Iodide(HgI₂)는 높은 원자번호(Zeff: (80+53×2)/2=93), 고밀도(6.4 g/cm³), 효율적인 밴드 갭(2.13 eV), 높은 비저항의 특성을 가지고 있기 때

* Corresponding Author: Sung-Kwang Park E-mail: physicist@paik.ac.kr
Address: 75, Bokji-ro, Busanjin-gu, Busan, 47392 Korea

Tel: +82-51-890-8749

문에 광도전체의 물질연구에 많이 사용되고 있다^[11].

이때 증착 방법 중 하나인 particle in binder (PIB) 방법을 통한 polycrystalline HgI₂ 선량계는 제조 방식이 간단하고 대면적 검출기를 위한 증착이 가능하며 단가가 비교적 저렴하다는 장점을 가진다^[9].

이에 본 연구에서는 기존 아날로그방식의 정도관리 기술을 개선시키기 위한 기초 연구로써, polycrystalline HgI₂ 선량계의 계측 성능을 실리콘다이오드와 비교함으로써 강내 치료용 디지털 정도관리 선량계의 적용 가능성을 제시하였다.

II. MATERIAL AND METHODS

1. Fabrication of unit cell HgI₂ dosimeter

본 연구에서는 PIB 증착 방식을 이용하여 polycrystalline HgI₂ 기반의 unit cell 선량계를 제작하였고, Ir-192 source에 대한 반응 특성을 평가하였다. HgI₂ 기반의 선량계의 성능 평가를 위해 unit cell 선량계를 제작하였다. Fig. 1은 unit cell 선량계의 제작 모식도를 보여준다.

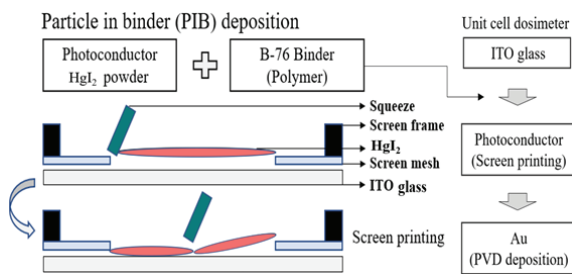


Fig. 1. Fabrication schematic diagram of HgI₂ unit cell.

하부전극은 30분간 초음파 세척을 통해 이물질을 제거한 indium tin oxide (ITO) glass를 활용하였다. 광도전체 물질 원료는 pure 99.999%의 HgI₂ (Kojundo Chemical Laboratory Inc., Sakado, Saitama pref, Japan)와 polymer binder (polyvinyl butyral)를 사용하여 3:1 비율로 혼합하여 three roll mil 공정을 통해 물질을 제작하였다. HgI₂ unit cell은 1 x 1 cm 크기, 150 μm의 두께로 제작되었으며, screen printing 방법으로 증착하여 HgI₂를 도포하였다. 이

후 70도에서 8시간 동안 오븐 공정을 수행하였다. 상부전극은 physical vapour deposition 방식으로 gold (purity 99.999%, Sigma Aldrich Inc., St. Louis, Missouri, USA)를 사용하여 HgI₂ 물질 상부에 0.8 cm x 0.8 cm 크기로 증착하여 제작하였다. 이후 silver (Ag) paste를 사용하여 wiring 공정을 수행하였다

2. Experimental setup

본 연구에서는 HgI₂ 선량계의 계측 성능을 평가하기 위해 HDR brachytherapy equipment (Nucletron microSelectron, Sweden)를 사용하였고, RTP system (PLATO 14.26, Sweden)을 통해 Ir-192 source의 조사 조건을 제어하였다. Fig. 2는 제작된 선량계의 성능 평가를 위해 사용된 실험 설정의 개략도를 보여준다.

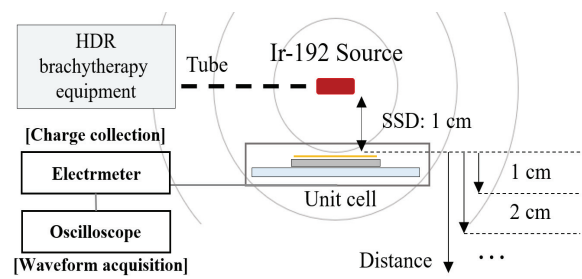


Fig. 2. Measurement setup diagram of HgI₂ and diode dosimeter.

제작된 선량계에 200 V 전압을 일렉트로미터 (Keithley, 6517A, U.S.A.)를 사용하여 인가하였으며, 방사선 신호의 파형은 오실로스코프 (LeCroy 62Xi, U.S.A.)를 이용하여 획득하였다. 획득한 파형에 대한 전하량 산출은 ACQ S/W (Biopac, Acqknowledge 4.2, Canada)를 활용하여 계산하였다. Table 1은 실험에 대한 조사조건을 나타낸다.

Table. 1 Measurement condition

RI source	Ir-192
Radiation energy	Approximately 30 keV
Dose rate	0.294 Gy/s
Radiation dose	0.1, 0.3, 0.5, 0.8, 1, 3, 5, 8, 10 Gy
SSD	1 ~ 12 cm (interval : 0.25 cm)

3. Evaluation

본 연구는 제작된 HgI₂ unit cell 선량계의 성능을 확인하고 평가하기 위해 재현성(Reproducibility), 선형성(Linearity), 거리의존성(Distance dependence)를 측정하여 기존의 diode (S2744, Hamamatsu Inc., Japan)와 비교를 통해 평가하였다.

재현성의 평가는 Ir-192 선원으로 1 Gy 선량을 10회 조사하였으며, 처음 획득한 신호를 기준으로 normalize 하였다. 재현성의 평가기준은 IAEA Technical Report Series No. 398 (TRS 398)에서 권고하고 있는 기준인 95% 신뢰구간에서 표준편차 1.5% 이내를 만족하는지에 대해 평가하였다^[12-14]. 이에 본 연구에서는 다음과 같은 Eq. (1)을 사용하여 상대표준편차 (Relative Standard Deviation; RSD)를 산출하였다.

$$RSD(\%) = \left[\left\{ \frac{\sum (X_i - X_{ave})^2 / n}{X_{ave}} \right\}^{0.5} \right] \times 100 \quad (1)$$

여기서 X_i는 측정값, X_{ave}는 산술 평균값, n은 측정 횟수를 나타낸다.

선형성의 평가는 Ir-192 선원의 선량을 0.1, 0.3, 0.5, 0.8, 1, 3, 5, 8, 10 Gy로 증가시키면서 조사하였으며, 1 Gy를 기준으로 normalize 하였다. 이후 선형회귀분석 결과에 대한 결정계수 (R²)를 비교하였다. Linearity의 평가기준은 결정계수(R²)의 값이 0.9990 이상인지에 대해 평가하였다. 선형함수에 대한 Eq. (2)는 다음과 같다.

$$Q = aD + b \quad (2)$$

Eq. (2)에서 (D)는 단위선량, (Q)는 생성되는 전하량의 크기를 나타낸다. 이에 선형함수의 기울기(a)를 산출하여 선량계의 민감도를 비교평가 하였다.

거리의존성 평가는 선원과 표면간의 거리 (source to surface distance; SSD)를 0.25 cm 간격으로 1 ~ 12 cm까지 증가시켜 Ir-192 선원의 선량 1 Gy를 조사하였다. 이때 SSD 1 cm의 신호를 기준으로 normalize 하였다. 방사선원의 세기는 거리의 제곱에 반비례하는 거리역자승법의 경향을 가지고 있다. 이에 거리 의존성 평가는 거듭제곱함수의 R²

값을 비교하여 경향성을 확인하고 high dose volume 평가에서 ICRU에서 권고하고 있는 D50을 비교하였다^[15].

III. RESULT

1. 재현성(Reproducibility)

본 연구는 HgI₂ 선량계의 구동 안정성을 확인하기 위해 재현성을 평가하였다. Fig. 3은 HgI₂와 실리콘 다이오드(이하 diode)의 재현성 비교 결과를 보여준다. 재현성 평가 결과 RSD는 HgI₂에서 1.21%, diode에서 0.32%의 결과를 보여준다. 이는 RSD 기준값 1.5% 이내를 모두 만족하는 결과이며, HgI₂는 diode에 비해 0.89% 높은 RSD의 결과가 나타났다.

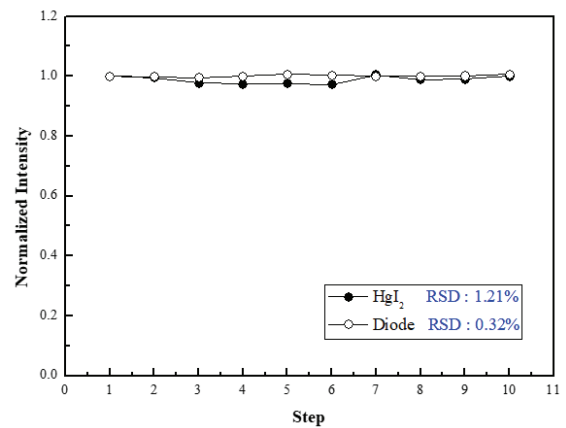


Fig. 3. Reproducibility of HgI₂ dosimeter and the diode at irradiation Ir-192 source.

2. 선형성(Linearity)

본 연구는 HgI₂ 선량계의 조사선량에 대한 정확성을 평가하기 위해 선형성을 평가하였다. Fig. 4는 HgI₂와 diode의 Linearity 비교 평가 결과를 나타낸다.

그 결과, HgI₂와 diode 모두 0.999 이상의 R² 값으로 우수한 성능을 확인하였다. Sensitivity는 선형함수 기울기 a 값을 통해 비교를 하였으며, HgI₂는 0.009, diode는 0.01로써 유사한 sensitivity를 확인하였다.

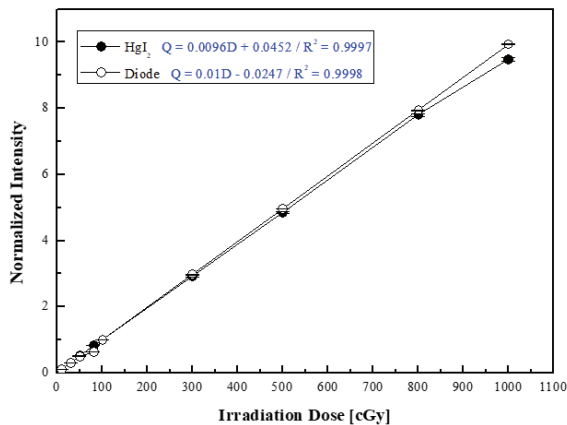


Fig. 4. Linearity of HgI₂ dosimeter and the diode at irradiation Ir-192 source.

3. 거리의존성(Distance dependence)

본 연구는 SSD에 따른 반응특성을 측정함으로써 거리의존성을 평가하였다. Fig. 5는 HgI₂와 diode의 거리의존성 비교 결과를 나타낸다.

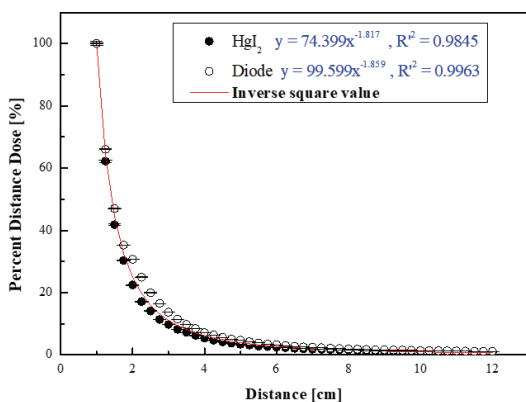


Fig. 5. Distance dependence of HgI₂ dosimeter and the diode at irradiation Ir-192 source.

거리의존성 결과, 약 5% 이내의 선량 세기에 대해 1 ~ 5 cm 거리에 대한 거듭제곱함수를 산출하였다. 그 결과 R²은 HgI₂에서 0.9845, diode에서 0.9963를 보였다. 이는 source 거리가 증가함에 따라 inverse square value에 비례하는 경향과 유사한 결과를 보였다.

이때 50% intensity에 대한 distance는 HgI₂에서 약 1.375 cm, diode에서 약 1.485 cm로 산출되었다. 이는 inverse square value 50% intensity의 distance

(1.41 cm)와 비교하였을 때, HgI₂에서 약 0.035 cm, diode에서 약 0.075 cm의 차이를 보였다.

IV. DISCUSSION

본 연구는 HgI₂ 광도전체를 이용한 unit cell 선량계의 재현성, 선형성, 거리의존성 특성을 평가하여 강내치료의 source position accuracy 정도관리의 도구로서 활용 가능성에 대해 확인하였다.

재현성의 평가 결과는 평가기준 1.5% 이내를 만족하였다. 하지만 10회 조사된 빔에 대해 신호가 불규칙적인 추세를 보였으며, 전반적으로 diode에 비해 낮은 특성을 보였다.

선형성의 평가 결과는 diode, HgI₂ 선량계 모두 R²값이 각각 0.9998, 0.9997로 우수한 선형계수를 보였다. 단위 선량 당 측정되는 전하량의 선형 기울기로 sensitivity를 비교하였을 때 diode와 HgI₂는 매우 비슷한 특성을 보였으며, 이는 diode를 대체할 수 있는 가능성을 의미한다. 이에 추후 HgI₂ line array 선량계를 제작한다면 측정되는 선량의 세기차이 및 분포를 확인할 수 있으며, 보다 정밀한 분석을 위한 정량적인 값을 제시할 수 있다.

거리의존성 평가 결과는 선원과 거리가 멀어짐에 따라 inverse square value와 유사한 경향으로 세기가 줄어드는 것을 확인하였으며, intensity 50% 거리는 HgI₂에서 약 0.035 cm, diode에서 약 0.075 cm의 차이를 보였다. 또한 세기 20% 거리 이후 세기 변화가 급격히 낮아지는 경향을 보이며, 이는 추후 디지털 정도관리 선량계가 적용된다면, 선원의 측정거리는 최대 2 cm를 넘지 않아야 할 것으로 사료된다.

본 연구에서 제시한 polycrystalline HgI₂ 선량계는 diode와 비교하였을 때, Ir-192 선원에 대해 우수한 측정 성능을 보였다. 또한 PIB 증착 방식으로 제작된 polycrystalline HgI₂ 선량계는 제조 방식이 간단하고 대면적 검출기를 위한 증착이 가능하며 단가가 비교적 저렴하다는 장점을 가진다. 추후 HgI₂ Line array를 제작해서 평가한다면 선량에 대한 분포 또한 확인 및 그 값을 정량적으로 제시할 수 있을 것이다.

다만, 이를 상용화하기 위해서는 다양한 빔의 종류와 에너지대역에서의 연구가 추가로 필요하며, 고체 선량계의 에너지 의존성과 선량률 의존성, 그리고 pixel resolution 등에 대한 연구도 필요할 것으로 보인다.

V. CONCLUSION

본 연구는 근접방사선치료의 정도관리에 활용 가능한 디지털 line 선량계 개발을 위한 기초연구로써, HgI₂를 이용하여 unit cell 선량계를 제작하여 그 성능을 제시하여, 근접방사선치료의 디지털 정도관리 선량계의 적용 가능성을 확인하였다. 본 연구에서 제시하고 있는 HgI₂ 선량계는 안정적 구동을 가능하게 하지만, 각도에 대한 민감도 및 선량에 대한 분포에 따른 민감도에 대한 평가 연구가 진행되어야 할 것으로 보인다. 본 연구에 대한 결과는 광도전체 물질의 선량계로써의 특성분석에 대한 연구로, 방사선 및 검출기에 대한 모든 분야의 기초 자료로 활용될 수 있다.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (MSIP). (NRF - 2021R1F1A1063500).

Reference

- [1] S. Nag, "High Dose Rate Brachytherapy: Its Clinical Applications and Treatment Guidelines", *Technology in cancer research & treatment*, Vol. 3, No. 3, pp. 449-455, 2004. <http://dx.doi.org/10.1177/153303460400300305>
- [2] K. J. Lee, S. H. An, R. N. Lee, "Monte Carlo Evaluation for the Effect of Positional Inaccuracy of Source on Patient's Dose in High-Dose-Rate Brachytherapy", *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 55, No. 6, pp. 2361-2365, 2009. <http://dx.doi.org/10.3938/jkps.55.2361>
- [3] K. Yogo, A. Matsushita, Y. Tatsuno, T. Shimo, S. Hirota, M. Nozawa, S. Ozawa, H. Ishiyama, H. Yasuda, Y. Nagata, K. Hayakawa, "Imaging Cherenkov emission for quality assurance of high-dose-rate brachytherapy", *Scientific reports*, Vol. 10, No. 1, pp. 1-10, 2020. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-020-60519-z>
- [4] R. Nath, L. L. Anderson, J. A. Meli, A. J. Olch, J. A. Stitt, J. F. Williamson, "Code of practice for brachytherapy physics: report of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 56. American Association of Physicists in Medicine", *Medical Physics*, Vol. 24, No. 10, pp. 1557-1598, 1997. <https://doi.org/10.1118/1.597966>
- [5] J. Venselaar, J. Perez-Calatayud, *A practical guide to quality control of brachytherapy equipment, ESTRO booklet No. 8*, Brussels: European Society for Therapeutic Radiology and Oncology, 2004.
- [6] M. D. C. Evans, S. Devic, E. B. Podgorsak, "High dose-rate brachytherapy source position quality assurance using radiochromic film", *Medical Dosimetry*, Vol. 32, No. 1, pp. 13-15, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.meddos.2006.10.001>
- [7] Z. Li, "Radiation damage effects in Si materials and detectors and rad-hard Si detectors for SLHC", *Journal of Instrumentation*, Vol. 4, No. 3, pp. 3011, 2009. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/4/03/P03011>
- [8] G. Hajdok, J. J. Battista, I. A. Cunningham, "Fundamental X-ray interaction limits in diagnostic imaging detectors: Spatial resolution", *Medical Physics*, Vol. 35, No. 7, pp. 3180-3193, 2008. <http://dx.doi.org/10.1118/1.2924219>
- [9] K. T. Kim, Y. J. Heo, M. J. Han, K. M. Oh, Y. K. Kim, S. W. Kim, S. K. Park, "Development and evaluation of multi-energy PbO dosimeter for quality assurance of image-guide radiation therapy devices", *Journal of Instrumentation*, Vol 12, No. 4, pp. 3024, 2017. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/12/04/C04024>
- [10] U. N. Roy, G. S. Camarda, Y. Cui, R. Gul, G. Yang, J. Zazvorka, V. Dedic, J. Franc, R. B. James, "Evaluation of CdZnTeSe as a high-quality gamma-ray spectroscopic material with better compositional homogeneity and reduced defects", *Scientific reports*, Vol. 9, No. 1, pp. 1-7, 2019. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-019-43778-3>
- [11] Y. C. Chang, R. B. James, "Electronic and optical properties of HgI₂", *PHYSICAL REVIEW B*, Vol. 46, No. 23, pp. 15040-15045, 1992.

<https://dx.doi.org/10.1103/physrevb.46.15040>

- [12] L. A. R. da Rosa, D. F. Regulla, U. A. Fill, "Reproducibility study of TLD-100 micro-cubes at radiotherapy dose level", *Applied radiation and isotopes*, Vol. 50, No. 3, pp. 573-557, 1999. [https://doi.org/10.1016/s0969-8043\(98\)00068-2](https://doi.org/10.1016/s0969-8043(98)00068-2)
- [13] F. M. Khan, J. P. Gibbons, *Quality Assurance, Chapter 17 of, Khan's the physics of radiation therapy*, 5th Ed., Lippincott Williams & Wilkins, pp. 371-404, 2014
- [14] International Commission on Radiation Units and measurements, *Determination of absorbed dose in a patient irradiated by beams of X- or gamma-rays in radiotherapy procedures - approved 1976*, report 24, Washington, 1977.
- [15] International Commission on Radiation Units and measurements, *Prescribing, Recording, and Reporting Brachytherapy for Cancer of the Cervix*, Report 89, England, 2013.

방사선 근접치료의 디지털 정도관리 가능성 확인을 위한 HgI₂ Unit Cell 선량계의 제작 및 평가

정재훈¹, 박성광^{2,*}

¹양산부산대학교병원 의생명융합연구원

²인제대학교 부산백병원 방사선종양학과

요 약

방사선 근접치료에서 잘못된 선원의 위치는 정상조직에 불필요한 선량을 조사하게 되므로, 정도관리 항목에서 방사선원의 위치를 검증하는 것은 필수적이다. 이에 본 연구에서는 디지털 line 선량계의 기초 연구로써 polycrystalline mercury (II) iodide (HgI₂)기반의 unit cell 선량계를 제작하고 실리콘다이오드와 재현성, 선형성, 거리의존성에 대한 성능을 비교하였다. 그 결과 재현성은 relative standard deviation (RSD)이 1.21%로 RSD 평가 기준 1.5% 이내를 만족하였다. 선형성 평가는 선형계수 R²가 0.9997로 우수한 결과를 보였다. 거리 의존성은 inverse square value와 비교하였을 때, intensity 50%는 0.035 cm의 차이를 보이며 전체적으로 유사한 경향을 보였다. 본 연구는 HgI₂ 선량계의 성능 평가함으로써 근접치료 정도관리를 위한 디지털 선량계의 적용 가능성을 제시하고 있으며, 본 연구에 대한 결과는 광도전체 물질의 선량계로서의 특성분석에 대한 연구로, 방사선 및 검출기에 대한 모든 분야의 기초 자료로 활용될 수 있다.

중심단어: 반도체검출기, HgI₂, 선량계, 방사선 근접치료

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	정재훈	양산부산대학교병원 의생명융합연구원	연구원
(교신저자)	박성광	인제대학교 부산백병원 방사선종양학과	부교수