


에어로졸 증착법으로 제작된 자외선 광검출기의 다공성 SiC 박막 두께에 따른 성능 변화

황사빈, 안광열, 김지현, 최진우, 김민석, 이건희, 오종민, 구상모 

광운대학교 전자재료공학과

Effect of Porous SiC Film Thickness on the Performance of UV Photodetectors Fabricated by Aerosol Deposition

Sabin Hwang, Kwangyeol An, Jihyun Kim, Jin-Woo Choi, MinSeok Kim,
GeonHee Lee, Jong-Min Oh, and Sang-Mo Koo

Department of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01897, Republic of Korea

(Received August 8, 2025; Revised September 4, 2025; Accepted September 5, 2025)

Abstract: Silicon carbide (SiC), with its wide bandgap and strong resistance to radiation and thermal conditions, is a promising material for ultraviolet (UV) photodetector applications under harsh environments. In this study, porous SiC thin films with thicknesses of 20, 50, and 80 nm were fabricated on 4H-SiC substrates using aerosol deposition (AD), which enables room-temperature film formation. The device with a 50 nm-thick film exhibited the highest photoresponse under UV-C illumination (260 nm), achieving a maximum photo-to-dark current ratio (PDCR) of 205.2, a responsivity of 0.058 A/W, an external quantum efficiency (EQE) of 27.71%, and a specific detectivity (D^*) of 7.9×10^{11} Jones. These results are attributed to an optimized balance between photon absorption and carrier transport in the porous structure. The findings confirm the potential of AD-fabricated porous SiC films for highly sensitive and scalable UV photodetector applications.

Keywords: Silicon carbide, Ultraviolet photodetector, Aerosol deposition, Porous film, Photo-to-dark current ratio

실리콘 카바이드(silicon carbide, SiC)는 넓은 밴드갭을 가지며, 우수한 열전도도, 높은 항복 전기장, 강한 방사선 저항성을 갖춘 반도체로, 특히 항공 우주, 군사 및 기타 극한 환경에서의 자외선(UV) 광검출기 응용에 있어 유망한 소재로 주목받고 있다 [1,2]. 이러한 고유 물성은 SiC 기반 소자가 고온, 고전압 및 강한 방사선 조건에서도 안정적으로 동작할 수 있도록 하며, 이는 기존의 실리콘 기반 소자에서는 기대하기 어려운 특성이다. 또한, 극한 환경에서

✉ Sang-Mo Koo; smkoo@kw.ac.kr

Copyright ©2025 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

도 안정적인 화학적 비활성과 구조적 안정성은 UV 광검출기 소자로서의 적용 가능성을 더욱 높여준다 [3,4]. 한편, 다공성 SiC 박막은 광자와 박막 표면 간 상호작용을 효과적으로 강화하여 광흡수를 향상시킬 수 있다는 점에서 최근 많은 관심을 받고 있다. 다공성 구조는 유효 표면적 증가로 인해 광자의 포획 및 흡수를 촉진하고, 반사 손실을 줄이는 데 기여한다. 이로 인해 광학적 향상이 이루어지며, 전하 발생 증가 및 소자 감도 향상에 긍정적인 영향을 준다. 아울러, 다공성 구조는 연속적인 전하 수송 경로를 형성함으로써, 캐리어 이동도를 향상시키고 전하 재결합에 따른 손실을 감소시키는 데 기여할 수 있다 [5,6].

다양한 박막 증착 기술 중, 에어로졸 증착(aerosol

deposition, AD)은 상온에서 다공성 박막을 형성할 수 있는 실용적이고 비용 효율적인 물리적 증착 공정으로 주목 받고 있다. AD는 서브 마이크론 크기의 분말 입자를 캐리어 가스로 가속시켜 기판에 충돌시키는 방식으로, 별도의 열처리 과정 없이도 고밀도 또는 다공성 세라믹 박막을 형성할 수 있는 진공 기반의 물리적 증착 기술이다. 화학 기상 증착(chemical vapor deposition, CVD)이나 스퍼터링과 같은 기존의 고온 공정과 달리, 기판에 열적 손상을 유발하지 않으면서 균일한 나노 구조 형성이 가능하다는 점에서 차별성을 갖는다. 이러한 저온 공정 특성은 유연 기판 적용은 물론 다양한 응용 분야로의 확장 가능성을 높여 준다. 또한, 공정 장비가 비교적 간단하고 증착 속도가 빨라서 연구 및 산업적 활용 모두에 적합하다 [7,8]. 그러나 다공성 SiC 박막 기반 자외선 광검출기에서 박막 두께가 소자 성능에 미치는 영향에 관한 체계적인 연구는 여전히 부족하다. 박막 두께는 자외선의 흡수 깊이와 전자 수송 특성에 직결되는 중요한 변수로, 너무 얇으면 광흡수가 충분하지 않고, 너무 두꺼우면 캐리어 재결합이 증가하여 소자 성능이 저하될 수 있다 [9,10]. 따라서 최적의 두께는 광자의 충분한 흡수와 최소화된 재결합 손실 간의 균형을 이루어야 하며, 이는 감도 향상을 위한 핵심 설계 요소이다 [11,12]. 본 연구에서는 AD 공정을 이용하여 서로 다른 두께(20, 50, 80 nm)의 다공성 SiC 박막을 형성하고, 자외선 광검출기의 전기적 및 광전자적 특성을 체계적으로 비교 분석하였다. 특히 Photo-to-Dark Current Ratio (PDCR), responsivity 등 주요 성능 지표에 대한 정량적 분석을 통해, 성능 극대화를 위한 최적의 박막 두께를 규명하고, AD 공정 기반 다공성 SiC 구조의 자외선 센서 응용 가능성을 실험적으로 검증하였다.

SiC 기반 UV 광검출기의 성능 분석을 위해, AD 공정을 이용하여 다양한 두께(20, 50, 80 nm)를 갖는 다공성 SiC 박막을 4H-SiC 기판 위에 형성하였다. 제작된 소자는 자외선 조사 하에서 정류특성 및 PDCR, responsivity, External Quantum Efficiency (EQE), Detectivity (D^*)와 같은 전기적, 광전자적 특성을 통해 소자 성능을 평가하였다. 본 연구의 주요 목적은 UV 광검출 성능을 극대화할 수 있는 최적의 박막 두께를 도출하고, AD 공정을 통해 제조된 다공성 SiC 박막의 차세대 광전자 소자 적용 가능성을 검토하는 데 있다. 소자 제작에는 상용 n형 4H-SiC 에피층 웨이퍼를 사용하였으며, 이 기판은 넓은 밴드갭, 우수한 열전도도, 그리고 높은 항복 전기장을 바탕으로 선택되었다. 이러한 물성은 누설 전류를 효과적으로 억제하고 고온 및 고전압 환경에서도 안정적인 동작을 가능하게 하여, 4H-SiC를 극한 환경용 소자에 적합한 기판 재료로 만

든다 [13]. 최종 소자의 구조는 수직형 쇼트키 다이오드 형태로 설계되었으며, 이에 대한 개략도는 그림 1(a)에 제시하였다. 소자 제작 공정은 웨이퍼 뒷면에 오믹 접촉층을 형성하는 단계로 시작되었다. 전자빔 증착(e-beam evaporation) 공정을 통해 두께 60 nm의 Ni/Al(Al 2.6%) 이중 층을 증착한 후, 아르곤 분위기 하에서 980°C, 120초 간의 급속 열처리(rapid thermal processing, RTP)를 수행하였다. 이 열처리는 금속/반도체 계면에서의 합금화를 유도하고, 캐리어 주입 특성을 향상시킨다 [14]. 이후, 기계적 내구성과 우수한 전류 수집 효율을 확보하기 위해 두께 2 μm의 알루미늄층을 추가로 증착하였다. 다음으로, SiC 박막 두께가 자외선 광응답 특성에 미치는 영향을 분석하기 위해, 동일한 공정 조건에서 20, 50, 80 nm의 세 가지 두께로의 SiC 박막을 증착하였으며, 세부 증착 조건은 표 1에 정리하였다. 증착은 질소(N₂)를 캐리어 가스로 사용하였으며, 유량은 5 L/min, 작업 압력은 1.4 torr로 유지하였다. 에어로졸 챔버에는 400 RPM의 진동 속도를 적용하여 안정적인 에어로졸 공급을 유지하였다. 각 시편은 기판 위를 세 번 스캔하도록 설정하였으며, 총 증착 시

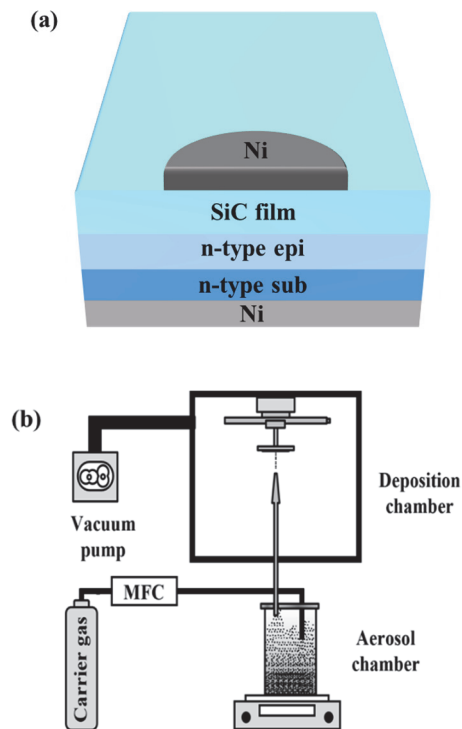


Fig. 1. (a) Schematic cross-sectional structure of the fabricated UV photodetector with a Ni/SiC film/n-type epilayer/n-type sub/Ni configuration and (b) schematic diagram of the aerosol deposition (AD) system used for the formation of porous SiC thin films.

간은 20분으로, 이를 통해 균일한 박막 형성이 가능하였다. AD 시스템의 구조는 그림 1(b)에 나타내었다. 이 과정에서 형성되는 다공성 구조는, 에어로졸화 된 SiC 분말 입자가 고속으로 기판에 충돌하면서 국소적으로 파쇄되고, 그 잔여 입자들이 기판 표면에 응착·재결합하는 과정에서 발생하는데, 이러한 메커니즘은 흔히 망치 효과

(hammering effect)로 불린다. 이때 입자 간에 미세 간극이 형성되며, 이는 결과적으로 다공성 SiC 박막의 특성을 유도하는 주요 메커니즘으로 작용한다 [15]. 증착 후, 다공성 SiC 표면 위에 두께 70 nm의 니켈(Ni) 박막을 전자빔 증착법으로 형성하였으며, 이는 역바이어스 하에서 자외선 광검출을 가능하게 하는 정류 접합(쇼트키 접촉) 역할을 수행한다. 최종 소자는 Ni/SiC/n형 에피층/n형 서브층/Ni/Al 구조로 구성된 수직형 쇼트키 배리어 다이오드 구조를 가지며, 고효율 자외선 응답 특성을 구현할 수 있도록 설계되었다.

제작된 자외선 광검출기의 전기적 특성은 암 조건 하에서의 전류 밀도-전압(J-V) 측정을 통해 평가되었다. 그림 2(a)에 나타난 바와 같이, 다양한 두께(20, 50, 80 nm)의 다공성 SiC 박막을 갖는 모든 소자의 일반적인 턴온 전압(V_{on})은 박막 두께와 관계없이 1.07-1.18 V 수준으로 일정하게 유지되었으며, 모든 소자에서 일관된 접합특성과 안정적인 계면 품질이 확인되었다 [16]. 여기서 V_{on} 은 소자에 순방향 전압이 인가될 때 전류가 본격적으로 흐르기 시작하는 지점을 의미하며, 본 연구에서는 J-V 곡선에서 전류 밀도가 1 mA/cm^2 에 도달하는 전압으로 정의하였다. 이러한 V_{on} 은 금속/반도체 접합의 장벽 높이 및 계면 품질과 밀접한 관련이 있어, 값이 일정하게 유지된다는 것은 박막 두께 변화와 무관하게 안정적인 쇼트키 접합이 형성되었음을 의미한다. 그림 2(b)에는 260 nm 자외선 조사와 암 조건에서 측정된 역바이어스 하 J-V 특성이 제시되었다. 자외선 조사 효과는 역바이어스 조건에서만 비교하였는데, 이는 역바이어스에서는 광여기에 의해 생성된 전류 증가가 뚜렷하게 나타나는 반면, 순방향에서는 흐르는 전류가 매우 커서 자외선 조사로 인한 변화가 상대적으로 미미하기 때문이다. 모든 소자는 일정한 전압 영역에서 낮은 암 전류를 유지하였으며, 특히 50 nm 두께의 박막 소자는 낮은 역방향 누설 전류와 가장 높은 자외선 응답 전류를 통해 우수한 광민감도가 확인되었다. 전하 수송 메커니즘을 더욱 정량적으로 분석하기 위해, 측정된 J-V 특성은 식 (1)로 나타낸 열전자 방출(thermionic emission) 모델을 이용하여 분석하였다. 이때 도출된 이상 계수(ideality factor, n)는 모두 5를 초과하는 값을 나타냈으며, 이는 다공성 금속/반도체 계면에서 증가한 계면 상태 및 전하 재결합 현상에 기인한 비이상적인 수송 거동을 나타낸다 [17]. 특히 다공성 구조의 경우 유효 표면적과 표면 결합 밀도가 증가하기 때문에, 전하 운반 과정에서 이러한 결합 상태에 의한 재결합 현상이 나타난다. 이에 따라 전류 전달은 이상적인 열전자 방출 메커니즘보다는, 재결합 영향을 받는 비이상적인 전하 수송 메커니즘이 더욱 우세하게 작용하는 것으

Table 1. Aerosol deposition conditions.

Parameters	Conditions
Starting powder	SiC
Substrate	SiC
Type of injected gas	N ₂
Injected gas consumption	5 L/min
Working pressure	1.4 torr
Vibration	400 RPM
Scanning number	3 scans
Total deposition time	20 min

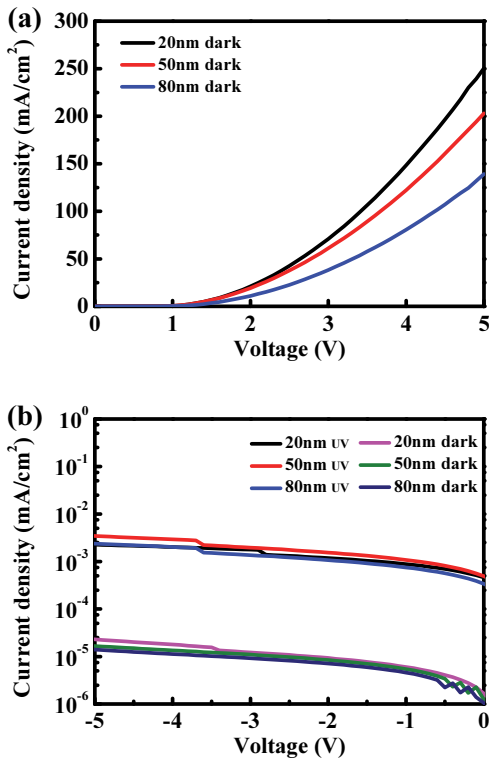


Fig. 2. (a) Current density-voltage (J-V) characteristics measured in the dark and (b) reverse current density-voltage (J-V) characteristics measured under dark and 260 nm UV illumination at reverse bias.

Table 2. The calculated electrical parameters for porous SiC photodetector.

SiC film thickness [nm]	V _{on} [V]	Ideality factor	Φ _{B1} under UV [eV]	Φ _{B2} at dark [eV]	Δ(Φ _{B2} -Φ _{B1}) [eV]
20	1.08	5.02	1.56	2.45	0.89
50	1.07	5.12	1.24	2.48	1.24
80	1.18	5.21	2.16	2.59	0.43

로 판단된다. 아울러, 소자의 광민감도를 정량적으로 평가하기 위해, 식 (2)를 이용하여 암 조건 및 자외선 조사 조건 모두에서의 쇼트키 장벽 높이(Φ_B)를 계산하였다. 측정 결과는 표 2에 요약되어 있다. 암 조건 하에서의 쇼트키 장벽 높이(Φ_{B2})는 박막 두께가 증가함에 따라 상승하는 경향을 보였으며, 이는 두꺼운 박막이 더 낮은 결합 밀도와 우수한 접합 구조를 형성했음을 의미한다. 그러나 자외선 조사 시의 쇼트키 장벽 높이(Φ_{B1})는 모든 시편에서 감소하였는데, 이는 광여기에 따른 캐리어 생성이 증가하고 그로 인해 장벽이 낮아졌기 때문으로 해석된다. 암 조건과 자외선 조사 조건 사이의 장벽 높이 차이(ΔΦ_B)는 50 nm 두께의 다공성 SiC 박막에서 가장 크게 나타났으며, 그 값은 1.24 eV였다. 이 결과는 50 nm 박막이 광흡수와 캐리어 수송 간에 가장 효율적인 균형을 이루었으며, 그에 따라 제작된 소자 중 가장 우수한 자외선 감도를 나타냈음을 보여준다.

$$J = J_0 \exp\left(\frac{qV}{nKT} - 1\right) \quad (1)$$

$$\Phi_B = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{A^*T^2}{J_0}\right) \quad (2)$$

전기적 분석에 이어, 자외선 조사 하에서 PDCR, responsivity, EQE, D* 등의 광전자적 특성 평가를 수행하였다. 다공성 SiC 박막의 두께는 소자의 광전자 성능을 결정짓는 핵심 요인 중 하나로 작용한다. 예를 들어, 20 nm와 같이 박막이 너무 얇은 경우에는 자외선 광자와 활성층의 상호작용이 충분하지 않아 광흡수가 제한되고 이로 인해 광전류 생성이 감소한다. 반대로, 80 nm와 같이 과도하게 두꺼운 박막은 다공성 네트워크 내에서의 캐리어 재결합을 증가시켜, 캐리어 수집 효율을 떨어뜨리는 원인이 된다. 또한, 박막이 두꺼울수록 직렬 저항이 증가하여 EQE가 감소할 수 있다. 따라서, 최적의 두께는 광자의 충분한 흡수와 최소화된 재결합 손실 간의 균형을 이루어야 하며, 이를 통해 향상된 responsivity와 PDCR 특성을 확보할 수 있다. 그림 3에 나타난 바와 같이, 모든 소자는 260 nm 파장에서 최대 PDCR 값을 나타냈다. 특히, 50 nm 두께의 박

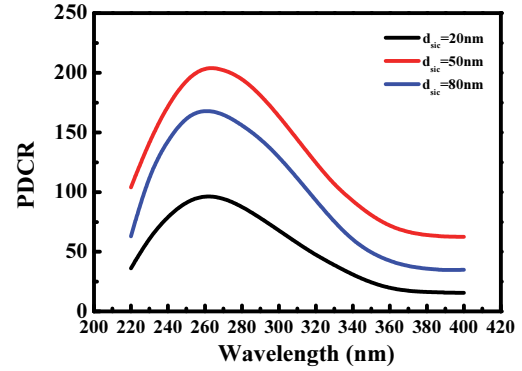


Fig. 3. Measured PDCR as a function of wavelength under -5 V reverse bias for UV photodetectors with different porous SiC film thicknesses.

막을 적용한 소자는 -5 V 역바이어스 조건에서 측정된 광전류와 암전류의 비를 기반으로 식 (3)을 적용한 결과, PDCR 205.2로 가장 큰 값을 기록하였다. 그림 4(a)에서는 동일 파장에서 50 nm 소자가 약 0.058 A/W의 최고 responsivity를 나타냈으며, 이는 식 (4)에 따라 광전류와 입사 광세기의 비를 이용해 계산한 결과로, 광흡수와 전하 수송이 가장 적절히 조율된 결과임을 보여준다. 관련 계산 결과는 표 3에 정리되어 있으며, 50 nm 소자는 20 nm 대비 약 111% 높은 PDCR과 80 nm 대비 약 45% 향상된 responsivity를 나타내어, 가장 우수한 성능을 보였으며, 이는 박막 두께 최적화의 중요성을 뒷받침한다. 식 (5)를 통해 산출된 EQE는 그림 4(b)에 제시되어 있으며, 약 27.71%로 PDCR 및 responsivity 결과와 같은 경향성을 보였다. D* 또한 식 (6)을 통해 계산된 결과로, 그림 5에 나타난 바와 같이 50 nm 박막에서 약 7.9×10¹¹ Jones로 가장 높은 값을 기록하였다. 이는 감도와 신호 대 잡음비 측면에서도 50 nm 박막이 최적의 특성을 확보했음을 정량적으로 입증하는 결과로, 박막 두께에 따른 광흡수 및 전하 수송 메커니즘의 균형이 디바이스 성능에 결정적인 영향을 미친다는 점을 보여준다

$$PDCR = \left(\frac{I_{ph} - I_d}{I_d}\right) \quad (3)$$

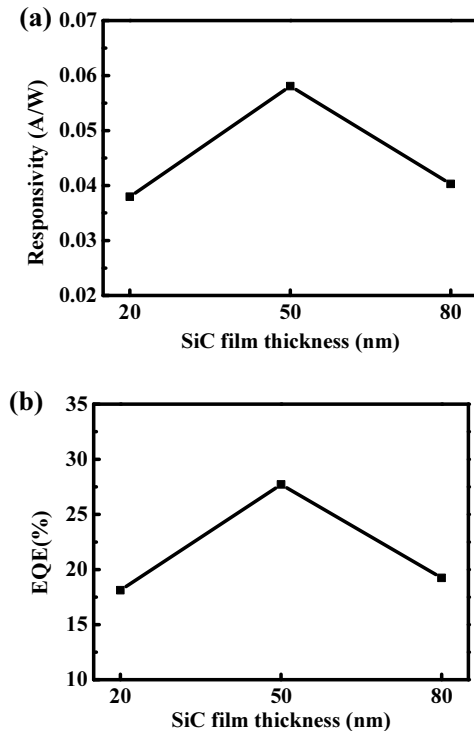
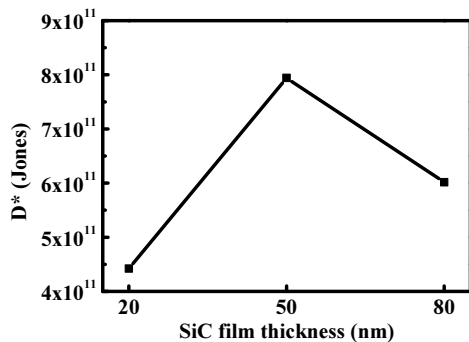
$$R = \left(\frac{I_{ph} - I_d}{P_{wavelength} S}\right) \quad (4)$$

$$EQE = \frac{h\nu R}{q\lambda} \quad (5)$$

$$D^* = R \sqrt{\frac{S}{2qI_{dark}}} \quad (6)$$

Table 3. The calculated optical parameters for porous SiC photodetectors.

SiC film thickness [nm]	PDCR	Responsivity [A/W]	EQE [%]	D* [Jones]
20	97.3	0.037	18.1	4.4×10^{11}
50	205.2	0.058	27.7	7.9×10^{11}
80	169.4	0.040	19.2	6.0×10^{11}

**Fig. 4.** Experimental (a) responsivity and (b) EQE at 260 nm for UV sensors with different SiC film thicknesses.**Fig. 5.** Experimental detectivity at 260 nm for UV sensors with different SiC film thicknesses.

요약하면, 본 연구에서는 AD 공정을 이용하여 4H-SiC 기판 위에 다공성 SiC 박막을 형성하고, 이를 자외선 광검출기 응용 측면에서 체계적으로 평가하였다. 세 가지 박막 두께(20, 50, 80 nm) 중 50 nm 소자가 260 nm 자외선 조사 조건에서 PDCR 205.2, responsivity 0.058 A/W, EQE 27.71%, $D^* 7.9 \times 10^{11}$ Jones로 가장 우수한 특성을 나타냈으며, 이는 감도와 전하 수송 간 최적의 균형이 확보된 결과임을 보여준다. 반면, 20 nm 박막은 광흡수가 부족해 성능 향상이 제한되었고, 80 nm 박막은 과도한 두께로 인한 재결합 손실로 인해 전반적인 특성이 저하되는 경향을 보였다. 모든 시편은 안정적인 정류특성을 유지하였으며, 이는 양호한 쇼트키 접합 형성을 입증한다. 또한, AD 공정은 상온에서 박막 형성이 가능하고 두께 제어가 용이해 향후 다양한 기판 및 대면적 공정에 적합한 제조 기술로 평가된다. 본 연구는 AD 공정을 통한 다공성 SiC 박막이 고감도, 확장 가능한 UV 센서 플랫폼으로 활용될 수 있는 실용성과 기술적 가능성을 제시한 사례로서, 향후 다양한 환경 센서 및 우주, 국방 분야 응용으로 확장될 수 있을 것으로 기대된다.

ORCID

Sang-Mo Koo

<https://orcid.org/0000-0002-9827-9219>

감사의글

This work was supported by the Human Resource Development Program (RS-2025-02214408, Compound Power Semiconductor Specialist Training) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea), the Technology Innovation Development Program (RS-2023-00266246, Development of 8-inch SiC Wafer-based Multi-Sensor SoC Platform) funded by the National Research Foundation (NRF, Korea), and also supported by the Excellent Researcher Support Project of Kwangwoon University in 2025.

REFERENCES

- [1] M. Östling, R. Ghandi, and C. M. Zetterling, *Proc. IEEE Int. Symp. Power Semicond. Devices ICs* (IEEE, San Diego, CA, USA, 2011), pp. 10–15.

- doi: <https://doi.org/10.1109/ISPSD.2011.5890778>
- [2] Y. H. Cho, S. H. Chung, S. R. Park, J. S. Choi, S. Y. Moon, H. J. Lee, G. H. Lee, and S. M. Koo, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, **35**, 977 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1007/s10854-024-12551-2>
- [3] A. Aldalbahi, E. Li, M. Rivera, R. Velazquez, T. Altalhi, X. Peng, and P. X. Feng, *Sci. Rep.*, **6**, 23457 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1038/srep23457>
- [4] M. Buffolo, D. Favero, A. Marcuzzi, C. de Santi, G. Meneghesso, E. Zanoni, and M. Meneghini, *IEEE Trans. Electron Devices*, **71**, 1344 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1109/TED.2023.3346369>
- [5] N. Naderi and M. Moghaddam, *Ceram. Int.*, **46**, 13821 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.02.173>
- [6] P. Deb and J. C. Dhar, *IEEE Trans. Electron Devices*, **66**, 3874 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1109/TED.2019.2926797>
- [7] D. W. Lee and J. M. Oh, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **30**, 235 (2017).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2017.30.4.235>
- [8] M. Y. Cho, I. S. Kim, D. W. Lee, S. M. Koo, and J. M. Oh, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **33**, 208 (2020).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2020.33.3.208>
- [9] Y. Fang, Q. Dong, Y. Shao, Y. Yuan, and J. Huang, *Nat. Photonics*, **9**, 679 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2015.156>
- [10] J. Chen, W. Ouyang, W. Yang, J. H. He, and X. Fang, *Adv. Funct. Mater.*, **30**, 1909909 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.201909909>
- [11] K. Hackiewicz, J. Rutkowski, and P. Martyniuk, *Infrared Phys. Technol.*, **95**, 136 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2018.10.035>
- [12] V. Pejović, J. Lee, E. Georgitzikis, Y. Li, J. H. Kim, I. Lieberman, P. E. Malinowski, P. Heremans, and D. Cheyng, *IEEE Electron Device Lett.*, **42**, 1196 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1109/LED.2021.3093081>
- [13] H. Tsuchida, I. Kamata, T. Miyazawa, M. Ito, X. Zhang, and M. Nagano, *Mater. Sci. Semicond. Process.*, **78**, 2 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2017.11.003>
- [14] L. Rebohle, S. Prucnal, and W. Skorupa, *Semicond. Sci. Technol.*, **31**, 103001 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1088/0268-1242/31/10/103001>
- [15] D. Hanft, J. Exner, M. Schubert, T. Stöcker, P. Fuierer, and R. Moos, *J. Ceram. Sci. Technol.*, **6**, 147 (2015).
doi: <https://doi.org/10.4416/JCST2015-00018>
- [16] J. W. Park, D. Lee, N. K. Cho, J. Lee, and Y. S. Kim, *ACS Appl. Electron. Mater.*, **1**, 530 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsaem.8b00138>
- [17] H. Masui, S. Nakamura, and S. P. DenBaars, *Appl. Phys. Lett.*, **96**, 073509 (2010).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.3318285>