

병원균 및 생물독소 탐지시스템을 위한 원자외선 LED 기술동향

정유진^a, 정영수, 최기봉

국방과학연구소 화생방부

Trends of Deep UV-LED Technology for the Pathogen and Biotoxin Aerosol Detection System

Eugene Chong^a, Young-Su Jeong, and Kibong Choi

CBR Defense Directorate, Agency for Defense Development (ADD), Daejeon 305-102, Korea

(Received February 3, 2015; Revised April 23, 2015; Accepted April 24, 2015)

Abstract: The humans are under attack involving the hazardous environment and pathogen/biotoxin aerosol that is realistic concerned. A portable, fast, reliable, and cheap Pathogen and Biotoxin Aerosol threat Detection(PBAD) trigger is an important technology for detect-to-protect and detect-to-treat system because the man-made biological terror is a fast and lethal infection. The ultraviolet C(UVC) wavelengths light source is key issue for PBAD that is sensitive because of strong fluorescence cross section from fluorescent amino acids in proteins such as tryptophan and tyrosine. The UVC-light emitting diode(LED) is emerging light source technology as alternative to laser or lamps as they offer several advantages. This paper discussed about the design consideration of UVC-LED for the PBAD system. The UVC-LED and PBAD technology, currently available or in development, are also discussed.

Keywords: Deep ultraviolet, Light emitting diode(LED), Pathogen, Biological aerosol, Detection system, Tactical biological (TAC-BIO) sensor, 270 nm

1. 서론

저가격, 저전압과 친환경의 LED (light emitting diode) 광원기술은 2000년대 이후 급속도로 발전하여, 최고의 차세대 광원으로 자리매김하고 있다. 기존에는 주로 가시광선 영역(400~780 nm)의 조명기술을 대체하기 위한 백색광원 개발이 주를 이루었지만, 최근에는 반도체 소자의 밴드갭 특성에 따른 고유한 파장 발생 특성으로 소형의 반도체 칩만으로도 선택적 파장 사용

이 가능한 LED 기술이 크게 발전하였다 [1]. 종전에 광원으로 많이 사용하였던 레이저 및 할로겐 램프 등은 특정 파장을 이용하기 위해 광필터 및 복잡한 시스템이 필요하고 소형화가 불가능하며, 비싸기 때문에 자외선 영역에서 사용이 제한되었으나, 기술발전으로 자외선 LED는 대체광원으로 부각되고 있다 [2,3].

표 1에 LED와 램프 기술의 특징을 비교하였다. UV-LED는 파장에 따라 다양한 어플리케이션에 적용이 가능하며 그 활용 분야는 그림 1과 아래의 설명과 같다 [4,5].

a. Corresponding author; co11onster@gmail.com

Copyright ©2015 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.

10~300 nm : 휴대용 비가시선 통신

230~400 nm : 광학 센서

200~280 nm : 오존 모니터링, ID인식기술, 바코드,

표면 살균, 공기 및 물 살균

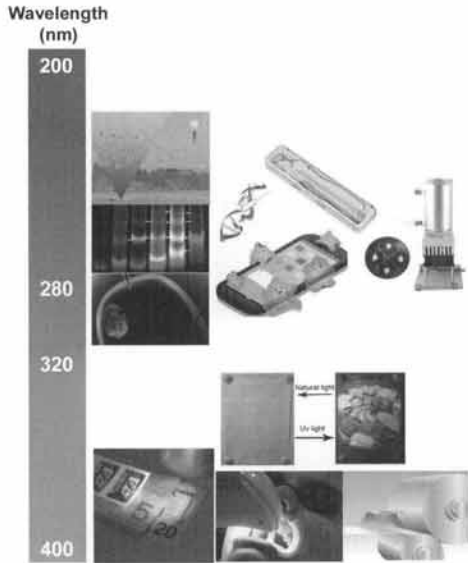


Fig. 1. Wide range of applications depending on wavelengths in UV [5-8].

- 250~405 nm : 법의학 및 체액의 감지 및 분석
- 260~300 nm : DNA/RNA/protein 및 약물 분석
- 300~320 nm : 의학적 광선 치료
- 365~400 nm : 폴리머와 잉크 프린터
- 375~395 nm : 위조지폐 감별
- 390~410 nm : 외상과 미용상의 살균

Table 1. Comparison of UVC LED and UVC lamp [9-11].

UVC	LED	Mercury Lamp
Efficiency	High	Low
Germicidal effects	High	High
On/off cycle	Do not affect the lifetime	Affect the lifetime
Preparation time	Instant	2~15 min
Circuit	Simple	Complicate
Compact	Possible	Impossible
Durability	Good	Bad
Input Power	Small	Large
Life Time	50,000 hrs	10,000 hrs
Environmental	Ozone Free Mercury Free	Ozone generating Mercury waste
Heat	60℃	~350℃
Energy Efficiency	9 times better than lamp	Bad

이 중에서도 중자외선 영역(200~300 nm)의 자외선은 유해 생물 입자와 병원균의 탐지(detection), 식별(identification), 그리고 제독(decontamination) 기술에 적용이 가능하여 국방 기술 분야 및 이와 관련한 민수 분야에서의 기술적 관심이 높아지고 있다. 생물입자에 극미량으로 존재하는 타이로신, 트립토판 같은 아미노산과 NADH (nicotinamide adenine dinucleotide)나 리보플라빈 등의 생체분자 물질은 중자외선 파장의 광에서 흡수가 일어난다. 근자외선 영역 (300~400 nm) 과 가시광선 영역에서 각각의 물질의 고유한 형광 양자효율 (fluorescence quantum efficiency, ϕ_F) 특성에 따라 고유의 형광을 발생하므로 에어로졸, 액상 혹은 파우더 상태에서도 탐지가 가능한 특성을 갖고 있다.

2. 실험 방법

2.1 생물입자 감시시스템

2.1.1 자외선 LED를 이용한 생물입자 감시시스템

Table 2. The characteristics of category : bio-terrorist agents, as species by the center for disease control [13].

Category : bio-terrorist agent	
Agent	Size Characteristics
Bacillus Anthracis	Rod shape: width 1.0~1.2 um, length 3.0~5.0 um
Yersinia pestis (plague)	Oval, 1.0~2.0 um
Clostridium botulinum	Rod shape: width 0.8~1.3 um, length 4.4~8.6 um
Francisella tularensis	Rod shape: width 0.2 um, length 0.7 um

대기 중에는 미세먼지 뿐만 아니라 식물 부스러기, 균, 그리고 인위적으로 발생한 독성 및 오염물질을 이용한 생물테러와 같은 생물학적 입자로 구성된 에어로졸이 부유하여 인간 및 동·식물의 건강에 중요한 역할을 한다 [12,13]. 이런 생물입자는 5%에서 30% 정도가 마이크론 사이즈를 갖고 대기에 존재하고 있으며, 이는 시간과 장소에 따라 달라진다. 그 중 1~10 um 사이즈의 경우 인간의 호흡기를 통해 폐나 다른 신체부위로 침투 및 축적이 되어 극히 위험해진다. 더불어, 인위적인 테러에는 1~7 um 사이즈로 제작된 독성 생물입자가 주로 사용된다.

표 2는 대표적인 독성 생물입자의 사이즈를 정리해 둔 것이다 [13].



Fig. 2. Nominal detection architecture for defense of a military airfield against a biological attack [15].

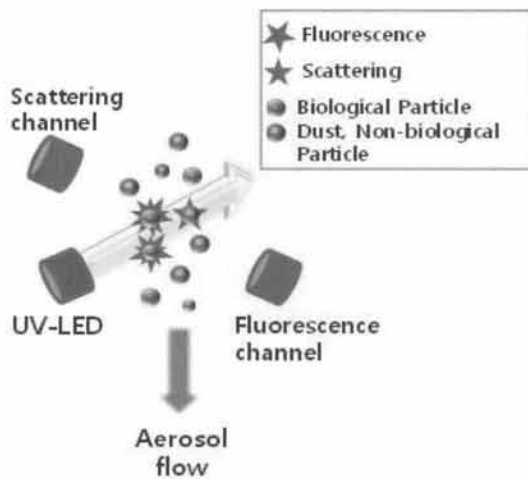


Fig. 3. The schematics of UV-LED based detection system [3].

일반적으로 생물무기는 다양한 감염성 세균, 포자 및 리신과 보툴리눔 독소 등의 단백질 독소들이 알려져 있다. 그 중 생물테러 무기로 잘 알려진 탄저균의 경우 사람 기준으로 흡입 치사량(노출된 사람의 50%를 죽이는데 충분한 치사량, lethal dose, LD₅₀)은 2,500 내지 50,000 포자로 추정되어 소량에 노출되어도 치명적인 결과를 갖고 올 수 있다는 것을 예상할 수 있다 [14]. 더 나아가, 그 특성상 전염성과 잠복기 때문에 조기에 탐지하지 못하면 그 피해는 기하급수적으로 증가한다. 이런 위험들을 감안하여 감염 전에 유해생물입자 및 병원균을 모니터링 할 수 있는 조기경보시스템에 대한 현실적인 대안이 요구되고 있다 [15].

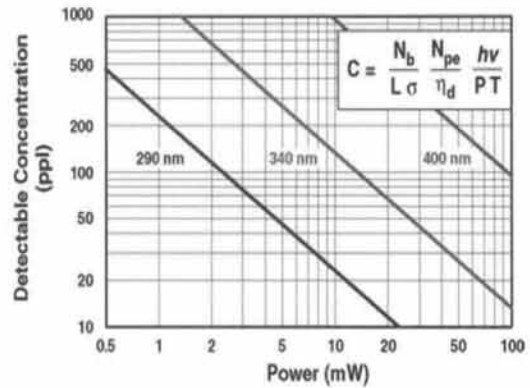


Fig. 4. The three diagonal lines represent the minimum detection level at fluorescence excitation wavelengths of 290 nm, 340 nm, and 400 nm representatively [17].

Table 3. Classification of biological materials with deep UV [18,19].

	Excitation (nm)	Emission (nm)	φF*	Agent
Tyrosine	275	303	14%	Toxin Bacteria Spore
Tryptophan	287	348	13%	
NADH	340	470	1.9%	Bacteria (Spore) (Protein)
Riboflavin	375	535	26%	Bacteria (Spore) (Protein)

*φF : Fluorescence Quantum Efficiency

그림 2는 생물테러가 도시에 발생했을 때 이를 감지할 수 있는 조기경보시스템 배치의 예를 나타낸 것으로 대면적의 불특정한 지역을 감시할 경우 많은 감지기를 배치해야 효과적인 조기 경보가 가능함을 보여주고 있다. 실시간 생물입자 측정 기술로는 대기 중 부유입자를 흡입하여 선별, 농축한 후 이송된 단일입자에 빛을 조사하여 발생한 산란광(scattering light) 세기와 미약한 형광(fluorescent light) 세기를 측정하여 세균입자인지 일반입자 인지를 구분하는 레이저 유도형광 기술이 유일한 방법으로 개발되었으며 최근에는 저소비전력과 소형화가 가능하고, 추가의 광학필터가 없이 원하는 파장만을 사용할 수 있는 자외선 LED를 이용한 자외선 유도형광 기술 개발이 진행 중이다.

Table 4. Chemical composition for the various agents [19].

	Protein (%)	NADH (%)	Riboflavin (%)
Toxin	100 *Trp ~5 *Tyr ~5	-	-
Bacteria	68 *Trp 4 *Tyr 3.5	0.06	0.01
Spore	74 *Trp 4 *Tyr 4	0.0001	0.004

*Trp : tryptophan, Tyr: tyrosine

그림 3은 자외선 유도 형광을 이용한 실시간 생물입자 감시 기술의 원리를 보여준다. 공기 중에 부유하는 입자를 흡입하여 노즐에 통과시키고 입자가 지나가는 노즐 끝에 자외선 광원을 조사한다. 일반 입자는 조사된 빛에 의해 산란을 일으키며 이 산란광의 크기는 구형(circle) 입자 기준으로 입자의 지름에 비례한다 [16]. 이때 생물입자는 형광물질을 갖고 있어 산란뿐만 아니라, 광원을 흡수한 후 형광을 방출한다.

따라서 형광과 산란을 각각의 광검출기로 측정하면, 입자가 지나갈 때 생물입자 여부를 확인할 수 있으며, 표 3에 따른 생물입자의 특성에 따라 독소입자와 세균 및 포자의 생물입자를 구분할 수 있다 [18]. 생물입자 감시시스템의 특성 중 가장 중요한 것은 최소 탐지감도로 이는 충분한 광원이 뒷받침되어야 한다. 그림 4에 따르면 최소탐지 농도, C(minimum detectable concentration)는 여기광력, P(excitation light power)의 비례적인 영향을 받는 것을 알 수 있는데, 이는 생물입자의 형광지수에 의해 400 nm 파장보다 340 nm에서, 그리고 340 nm 보다 290 nm 자외선 파장의 여기광원에서 더 높은 효율로 감지되는 것을 확인할 수 있다 [19].

표 3을 참고하면, 280 nm 기준의 자외선영역에서 형광을 발생하는 Tyrosine과 Tryptophan의 형광양자효율이 NADH 보다 약 8배 정도 감도가 높은 것을 확인할 수 있다. 더 나아가 표 4에 정리한 것처럼 위험요소가 되는 독소나 세균의 경우 여기광원 350 nm에서 형광을 내는 NADH 와 리보플라빈 보다 단백질 특히, 트립토판과 타이로신의 비율이 세균의 경우 약 100배, 포자의 경우 2,000배 이상 높으며, 독소의 경우는 100% 단백질 성분으로만 구성되어 있다.

이와 같은 특성들을 볼 때 280 nm 영역의 자외선 광원이 유해 생물입자를 탐지하는데 효과적임을 알 수 있다.

2.2 자외선 광원을 이용한 생물입자 감시시스템 기술 동향

미국 DARPA (the Defense Advanced Research Projects Agency)의 경우 2000년 초반부터 280 nm 이하 파장대에 UV-LED 광원을 개발하는 프로그램을 진행하면서, 소형·경량·저가의 자외선 파장대의 광원을 개발하여 다양한 목적으로 활용하려 하고 있으며, 그 중 대표적인 분야가 생물입자 감시시스템이다. 이를 적용한 대표적인 생물입자 감시시스템으로는 저비용·소형·경량·저전력 소모의 UV-Laser-Induced Fluorescence(LIF) 트리거로서 2004년에 시작되어 개발이 완료된 TAC-BIO (Tactical Biological Sensor)이다.

TAC-BIO I은 340 nm LED를 광원으로 사용하였고, 275 nm LED를 광원으로 적용한 TAC-BIO II(그림 5)를 현재 개발 중으로 이는 TAC-BIO I보다 80% 가격이 저렴하며, 3배 이상 무게가 가벼운 것으로 알려져 있다 [4,20].



Fig. 5. The 2nd generation TAC-BIO [21].

우리나라의 경우 국방과학연구소(국과연)는 한국적 환경에 맞게 405 nm 레이저 다이오드를 광원으로 적용한 생물독소감시기를 개발 완료하여 주요 시설에 배치하였다. 생물독소 감시기는 독특한 구조의 광집광 설계와 빔던터 기술들을 적용하여, 오경보율이 매우 작으며 초당 측정 가능 입자수도 13만 개로 세계 최고 수준이다 [22]. 나아가, 국과연은 생물독소감시기에 경량화, 소형화 및 저가격의 개량형 모델 개발을 위해 UVC-LED를 광원으로 적용한 프로젝트를 진행 중이다.

2.3 UVC-LED 기술개발 및 시장 현황

LEDinside지의 '2015 LED 시장 예측' 보고서에 따르면 2014년 자외선 광원시장에서 자외선 LED가 차지하는 비중은 15%에 달하며, 그 중 UVC 영역은 2% 정도 차지할 것으로 예측하고 있으며, UVC 영역의 기술 성숙도가 높아질수록 그 시장은 기하급수적으로 증가할 것으로 예측하고 있다. UVC-LED를 구현하기 위해서는 결함이 적고 안정성이 높은 결정(crystal)을 갖는 알루미늄 갈륨 나이트라이드(aluminum gallium nitride, AlGaN) 기반의 기판과 높은 전도도를 확보할 수 있는 전극형성 기술이 필요하며, AlGaN의 경우 높은 성장온도로 인해 초고온용 MOCVD (metal organic chemical vapor deposition)이 필요한데, 관련 장비와 기술의 미비 및 소재 성장기술의 고난이도로 인해 연구개발이 더디게 이루어지고 있다. 더욱이 280 nm 이하 LED는 10% 이하의 낮은 양자효율로 인해 이를 개선하는데 높은 기술력이 요구된다.

우, 고분자를 경화시키는 특성을 갖는 UVC에 의해 황변 현상 및 굴절률 차이로 인한 발광현상 저하를 극복하기 위하여 새로운 기술 적용이 요구된다 [21]. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 유리계열인 퓨즈드 실리카 [그림 6(a)] 기반의 렌즈를 가장 많이 적용하고 있으며, 특정 목적의 광학설계적용을 위해 몰딩방식 렌즈 적용 시 자외선 영역에서도 투과율이 높은 형광 플라스틱 (fluoro-polymer/-plastic) 사용 [그림 6(b)] [23,24] 또한 고려되고 있으나, 고가의 가격과 높은 수준의 가공 기술 문제로 상업적인 적용은 어려운 상태이다.

이와 같은 기술적 이슈에도 불구하고, 활발한 기술 개발이 이루어지고 있어 최근에 SETi는 75 mW @ 300 mA급의 UVC-LED를 발표하였고 [27], 2020년에는 10만 시간 이상의 수명을 갖는 675 mW급에 가격은 현재보다 약 70배 이상 저렴한 UVC-LED 가 개발 될 것으로 예측하고 있다 [28].

3. 결과 및 고찰

3.1 미국의 UVC-LED 기술개발 현황

가장 활발한 연구 성과를 보여주고 있는 미국의 경우 DARPA (defense advance research projects agency) 주관에 SUVOS (semiconductor ultraviolet optical sources) 및 CMUVT (compact mid-ultraviolet technology) 프로젝트를 통해 국가주도 하에 UV-LED 소자 개발을 진행하고 있다.

3.1.1 SUVOS 프로젝트

병원균과 독성 생물에어로졸 입자의 공격을 감시하는 자외선 레이저 형광 기반 센서(UV-LIF)의 핵심 기술인 고출력, 짧은 파장대의 자외선 광원 개발을 위해 semiconductor ultraviolet optical sources (SUVOS, 2000년) 프로젝트를 시행하였다. SUVOS 프로그램의 주요 목적은 III-V 반도체 소재인 GaN (gallium nitride), AlN (aluminum nitride), 그리고 InN (indium nitride)를 적용한 280 nm~340 nm 영역의 LED를 개발하는 것이다.

1차 목표는 파장 370 nm과 410 nm에서 각각 NAD 와 플라빈을 감지하는 것이고, 최종 목표로는 280 nm와 340 nm의 LED를 개발하여 NADH와 트립토판을 감지하는 것이다 [29].

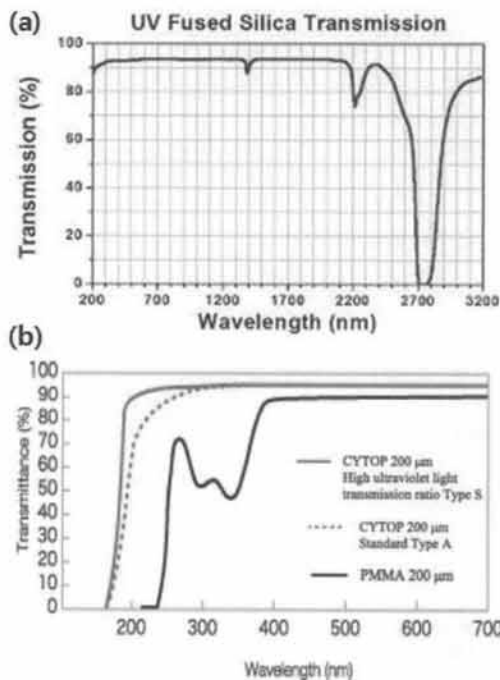


Fig. 6. Transmission(%) of (a) UV fused silica and (b) a type of fluoropolymer (CYTOP) [25,26].

UVC-LED 상용화의 문제점 중 하나는 기존의 패키징에 일반적으로 사용되던 열경화성 수지를 적용할 경

3.1.4 Crystal IS

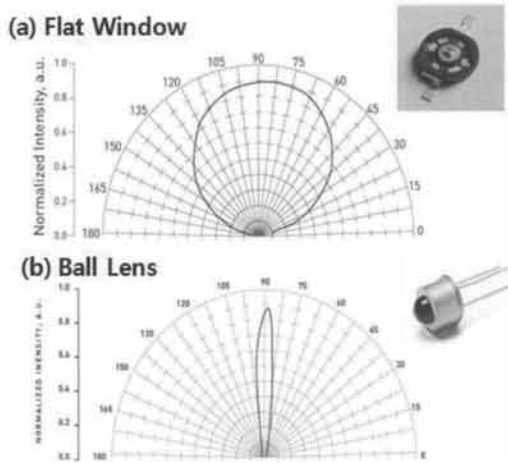


Fig. 10. Typical radiation pattern of (a) SMD type with flat lens and (b) OPAN type with ball lens [10].

Crystal IS는 Heat sink를 강화한 SMD (surface mount device) 타입의 5~10 mW급의 제품과 볼렌즈를 적용하여 추가적인 렌즈 없이도 viewing angle 15°로 집광을 할 수 있는 OPAN(275L) 모델로 3 mW @ 100 mA 특성을 갖는 제품을 시판하고 있다.[10]

3.2 국내 UVC-LED 기술개발 현황

국내의 경우 엘지 이노텍(LG Innotek)과 서울 옵토디바이스(Seoul Optodevice)를 중심으로 연구개발이 진행중이며, 세계 최고 수준의 양산기술을 기반으로 상용제품을 시판하고 있다.

3.2.1 엘지 이노텍(LG Innotek)

엘지 이노텍의 경우 세계 최초로 일반 가전제품에 275 nm UVC-LED 세균과 바이러스를 제거하는 기능을 적용하여 양산 및 판매하고 있으며 [32], 단일칩 기준으로는 10 mW @ 100 mA(LEUVA 77G00HF00)급이 보고되고 있다 [33,34]. 또한, 국가과제 '환경 정화용 10 mW급 275 nm UVC-LED 기술개발 (2013-2016)'을 통하여 20 mA에서 10 mW급, 1,000시간 이상 사용이 가능한 외부양자효율 11% 이상의 세계 최고 수준의 UVC-LED 개발 프로젝트를 진행하고 있다 [35].

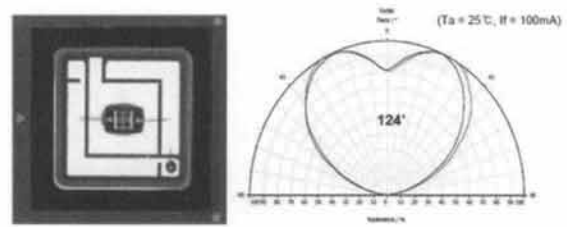


Fig. 11. (a) Top view and (b) typical radiation pattern of UVC-LED(LEUVA 77G00HF00) with flat lens [33].

3.2.2 서울 옵토디바이스 (Seoul Optodevice)

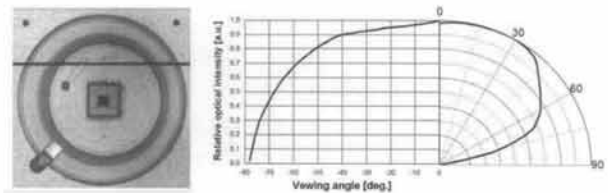


Fig. 12. (a) Top view and (b) typical radiation pattern of UVC-LED(CUD81F1A) with flat lens [36].

2006년 UVC-LED 개발을 발표한 서울 바이오시스는 다양한 가전제품에 살균 기능을 목적으로 UVC-LED를 적용하기 위해 성능 개선 연구를 계속적으로 진행하고 있다. 현재는 알루미늄 패키징 2 mW @ 20 mA(CUD81F1A)급 SMD 타입을 시판 중이다 [36,37].

4. 결론

최근 자외선 영역 LED의 기술적 이슈들이 해결되고, 사용 시간의 증가와 동시에 신뢰성, 친환경성, 소비전력 저감효과, 소형, 고품질의 특성, 저렴한 가격 그리고 파장에 대한 선택적 디자인이 가능한 특성들이 더해져 자외선 영역 시장에서 산업계와 응용제품에 빠르게 적용되어 주요 광원으로 대체하고 있다.

상용화된 고효율의 UVC-LED 개발은 '생물입자 탐지기'에 핵심 기술로서, 위와 같은 특징 외에도 높은 집광효율이 요구된다. 다시 말해, 민수에서는 주로 면광원이나 대면적에서 효율적으로 작동하는 광원을 고려하여 발산각이 100° 이상으로 넓고, 발광 패턴의 면적을 넓히는 방향으로 진행되고 있다. 그러나 저가의

소형 생물입자 탐지기를 위해서는 광학계 설계 및 집광에 유리한 마이크로 레벨의 발광 영역에서 고출력을 내며, 빔 포커스되는 영역에서 균일한 조도 분포를 갖는 UVC-LED 칩 디자인 및 윈도우 기술이 요구된다.

지금까지 개발된 기술보다 향후 개발될 기술이 더 기대되는 UVC-LED 분야에서, 현재의 기존 광원 시장을 대체하는 수준에서 더 나아가, 새로운 시장을 개척할 수 있는 수준의 고품질의 UVC-LED가 지속적으로 개발되어 시장에 선보이길 기대해 본다.

REFERENCES

- [1] A. Fujioka, K. Asada, H. Yamada, T. Ohtsuka, T. Ogawa, T. Kosugi, D. Kishikawa, and T. Mukai, *Semicond. Sci. Technol.*, **29**, 084005 (2014).
- [2] A. Poldmae, J. Cabalo, M. De Lucia, F. Narayanan, L. Strauch III, and D. Sickenberger, *Proc. of SPIE*, **6398**, 63980E (2006).
- [3] J. Zhang, X. Hu, A. Lunev, J. Deng, Y. Bilenko, T. M. Katona, M. S. Shur, R. Gaska, and M. A. Khan, *Jpn. J. of Appl. Phys.*, **44**, 7250 (2005).
- [4] J. Cabalo, M. DeLucia, A. Goad, J. Lacia, F. Narayanan, and D. Sickenberger, *Proc. of SPIE*, **7116**, 71160D (2008).
- [5] Lumex, Inc. (www.lumex.com)
- [6] H. S. Jeong, M. Park, J. W. Yi, T. Joo, and B. H. Kim, *Mol. Biosyst.*, **6**, 951 (2010).
- [7] SETi (www.s-et.com)
- [8] Nikkiso. Co. (www.nikkiso.com)
- [9] M. Umar, F. Roddick, and L. Fan, *J. Hazard. Mater.*, **266**, 1018 (2014).
- [10] Crystal IS (www.cisuvc.com)
- [11] HexaTech, Inc. (www.hexatechinc.com)
- [12] Z. Xu, Y. Wu, F. Shen, Q. Chen, M. Tan, and M. Yao, *Aerosol Science and Technology*, **45**, 1337 (2011).
- [13] M. Morrell and J. P. Jiang, *Pathogen and Particle Detector System and Method, US 7*, **38**, 099 B2 (2010).
- [14] T. V. Ingles, D. A. Henderson, J. G. Bartlett, M. S. Ascher, E. Eitzen, A. M. Friedlander, J. Hauer, J. McDade, M. T. Osterholm, T. O'Toole, G. Parker, T. M. Perl, P. K. Russell, and K. Tonat, *JAMA*, **281**, 1735 (1999).
- [15] C. A. Primmerman, *Detection of Biological Agents*, Lincoln Laboratory Journal (2000).
- [16] en.wikipedia.org/wiki/Mie_Scattering
- [17] T. H. Jeys, L. Desmarais, E. J. Lynch, and J. R. Ochoa, *Proc. of SPIE*, **5071**, 234 (2003).
- [18] R. Bhartia, W. F. Hug, E. C. Salas, R. D. Reid, K. K. Sijapati, A. Tsapin, W. Abbey, K. H. Nealson, A. L. Lane, and P. G. Conard, *Appl. Spectrosc.*, **62**, 1070 (2008).
- [19] S. C. Hill, Y. L. Pan, C. Williamson, J. L. Santarpia, and H. H. Hill, *Optics Express*, **21**, 22285 (2013).
- [20] Edgewood Chemical Biological Center (www.ecbc.army.mil)
- [21] Edgewood Chemical Biological Center (www.ecbc.army.mil/news/2015/tacbio-gen-2)
- [22] K. Choi, Y. Ha, H. K. Lee, and J. Lee, *Instru. Sci. and Tech.*, **42**, 200 (2014).
- [23] Y. J. Chae, M. J. Lee, J. Hwang, S. Kim, T. Y. Lim, J. H. Kim, and D. J. Kim, *Journal of Photonic Science and Technology*, **2**, 53 (2012).
- [24] H. Teng, *Appl. Sci.*, **2**, 496 (2012).
- [25] Ashahi Glass Chemical (www.agc.com)
- [26] Thorlabs, Inc. (www.thorlabs.com)
- [27] M. Shatalov, W. Sun, R. Jain, A. Lunev, X. Hu, A. Dobrinsky, Y. Bilenko, J. Yang, G. A. Garrett, L. E. Rodak, M. Wraback, M. Shur, and R. Gaska, *Semicond. Sci. Technol.*, **29**, 084007 (2014).
- [28] M.A.S. Ibrahima, J. M. Adama, O. Autina, and B. Jefferson, *Environmental Technology*, **35**, 400 (2014).
- [29] J. Carrano, *Spie's Magazine*, June (2003).
- [30] M. Wraback, *U. S. Army Research Lab.* (www.darpa.mil)
- [31] J. Albrecht, *DARPA-BAA-10-45*, 22 (2010).
- [32] LG Electronics (www.lge.co.kr/lgekr/product)
- [33] Laser Component (www.lasercomponent.ru)
- [34] estate.mk.co.kr
- [35] National Science & Technology Information Service (www.nts.go.kr)
- [36] Seoul Viosys (www.seoulviosys.com)
- [37] www.etoday.co.kr