

논문 2005-42TE-3-8

UV 검출기 제작을 위한 8x8 ReadOut IC에 관한 연구

(Investigation on the 8x8 ReadOut IC for Ultra Violet Detector)

김 주 연*, 김 태 근**

(Joo-Yeon Kim and Tae-Geun Kim)

요 약

산업용, 의학용 및 군사용, 환경감시용 등 다양한 분야에서 UV 카메라가 이용되고 있다. 높은 분해능과 고효율을 가진 GaN 계열의 III-V족 질화물 반도체를 이용하여 제작한 UV 센서인 포토다이오드로부터 최적의 자외선 응답을 읽어낼 수 있는 ROIC(ReadOut IC)를 개발 했다. FPA(Focal Plane Array)용 UV 8x8 ReadOut IC(ROIC)를 설계할 위하여 포토다이오드 타입 센서 소자를 커패시터로 모델링하였다. ROIC는 검출되는 신호를 받아 이를 증폭하고 잡음제거 필터링을 거쳐 픽셀 단위로 순차적으로 출력하는 기능을 수행하도록 하였다. ROIC는 0.5 μ m 2Poly 3Metal N-well CMOS process를 이용하여 제작되었으며, 이방성 전도성 페이스트 (Anisotropic Conductive Paste:ACP)를 사용하는 gold stud bumping 공정으로 ROIC와 포토다이오드 어레이를 하이브리드 패키지 (package)한 후 PC에서 자외선 영상으로 확인함으로써 ROIC의 동작을 검증하였다.

Abstract

A UV camera is being used in various application regions such as industry, medical science, military, and environment monitoring. A ROIC(ReadOut IC) is developed and can read the responses from UV photodiode sensors which are made with III-V nitride semiconductors of GaN series having high resolution and high efficiency. To design FPA(Focal Plane Array) UV 8x8 ROIC, the photodiode type sensor devices are modeled as the capacitor type ones. The ROIC reads out signals from the detector and outputs sequentially pixel signals after amplifying and noise filtering of them. The ROIC is fabricated using the 0.5 μ m 2Poly 3Metal N-well CMOS process. And then, it and photodiode array are hybrid bonded by gold stud bumping process using ACP(Anisotropic Conductive Paste). After the packaging, UV images appearing on PC verified the operations of the ROIC.

Keywords : UV 검출기, ROIC, III-V족 질화물 photodiode, Gold stud bumping

I. 서 론

자외선은 태양으로부터 오존층 (ozone layer)에 흡수되기 때문에 자외선 검출기를 이용하여 오존을 모니터링하여 환경을 감시할 수 있다. 뿐만 아니라 자외선은 다른 파장의 빛보다 해저나 대기권 밖에서의 흡수가 적기 때문에 해저, 위성 통신 분야에서도 사용할 수 있다.

또한 기존의 적외선 검출기는 열을 감지하기 때문에 비행기와 미사일의 연소가스를 구분하기 어려우나 자외선 검출기는 정확히 두 차이를 구분할 수 있기 때문에 군사기술의 첨단화를 이룩할 수 있다. 또한 산업용으로는 furnace 에서의 spike detection이나 가스터빈에서의 burner monitoring 등의 분야에 사용되고 있다.

자외선 센서물질로 주목받고 있는 GaN 계열의 III-V족 질화물 반도체 (nitride semiconductor)는 3.4 eV의 넓은 직접천이형 에너지 밴드갭 (direct energy bandgap)을 가지는 물질로서 밴드갭 조정(bandgap engineering)이 용이하고 고온, 고압 등과 같은 열악한 환경하에서도 구동 내구력을 갖기 때문에 광소자 및 전

* 정희원, 울산과학기술대학교 전기전자통신학부
(School of Electrical Electronics Eng., Ulsan College)

** 정희원, 고려대학교 전자공학과
(Department of Electronics Eng., Korea University)
접수일자: 2005년2월7일, 수정완료일: 2005년9월8일

자소자용 응용분야를 위한 반도체 재료로써 각광 받고 있다^[1-2]. 특히, 이 물질을 이용한 자외선 (ultraviolet: UV) 검출기 (detector)는 적외선(infrared) 및 가시광 (visible) 영역에서 응답성 (responsibility)을 가지지 않고, 자외선 영역에서의 응답성이 매우 크며 넓은 파장에 걸쳐서 일정하기 때문에 기존의 실리콘 (Si)으로 제작되고 있는 자외선 검출기와는 다른 차별성을 갖는다.

본 연구의 목적은 GaN 계열의 III-V족 질화물 반도체를 이용하여 제작한 UV 포토다이오드 센서로 부터 최적의 자외선 응답을 읽어낼 수 있는 ROIC^[3-4]를 제작 하는 것이다. 이를 위하여 광 감지 기술에 필수적인 잡음 개선의 방법으로 포토다이오드의 전기적인 특성을 반영하였고, 포토다이오드 어레이를 고려한 ROIC의 면적 제한, 전력소모 감소 방안, 효율성 등에 대한 복합적인 연구를 통해 최적의 자외선 검출기를 개발하였다. 이를 자외선 센서인 포토다이오드 어레이와 하이브리드 (hybrid) 패키지 (package)한 후 자외선을 영상으로 확인함으로써 ROIC의 성능을 검증하였다.

II. 본 론

ROIC를 설계하기 위해서는 포토다이오드 센서의 특성 파악과 함께 등가회로 모델링이 필요하다.

1. 포토다이오드

본 실험에서는 사용된 자외선 센서인 수광 소자는 고품위 AlGaIn 에피층을 MOCVD(metalorganic chemical vapor deposition)로 성장하여 제작되었다. AlGaIn과 GaN의 격자부정합 (lattice mismatch)을 줄이기 위하여 700 °C의 온도에서 약 300 nm의 AlGaIn의 중간층을 삽입함으로써 Al의 함유량이 약 44 %일 때 crack-free AlGaIn층을 얻을 수 있었고, 수광 영역을 최대화하고 이동도를 증가시키기 위하여 도핑농도를 낮추었으며, 자외선 수광소자의 동작전압이 역전압 -5 V에서 최대 공핍영역 (depletion region)이 형성될 수 있도록 성장하였다. 쇼트키 다이오드 형태로 제작된 자외선 센서는 320부터 480 nm 범위의 광을 조사하였을 때, GaN의 차단 파장 (cutoff wavelength)인 350 nm 부근에서 광응답이 급격히 감소하는 이상적인 자외선 센서의 특성을 보였고, 이때의 광응답도는 0.1 A/W를 가지며, 자외선 가시광선 제거비는 10⁵ 이었다. 암전류(dark current)는 9 pA 이하였고, 반응시간도 (response time)도 20 ns 이하였다.

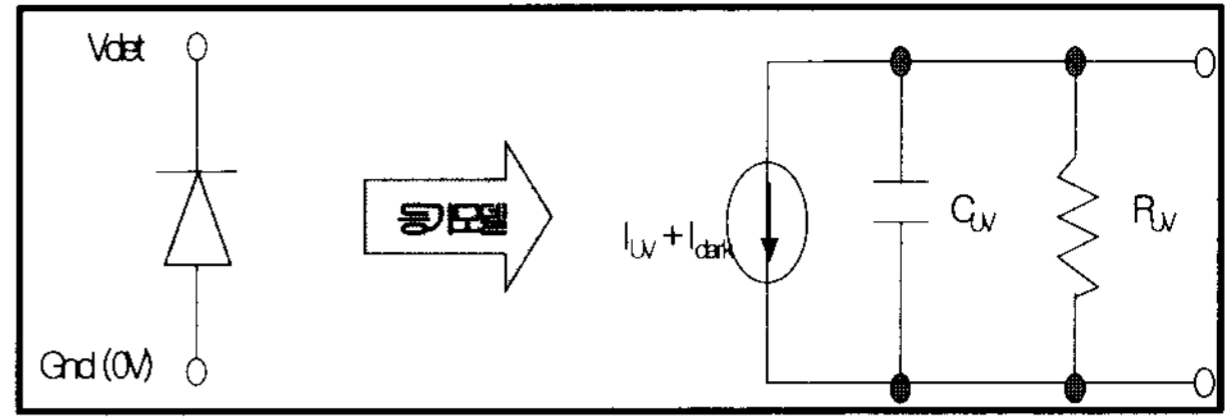


그림 1. 자외선 검출기의 전기적 등가 모델
Fig. 1. Equivalent electrical model of UV detector.

2. 포토다이오드 등가회로 모델

ROIC개발을 위하여 수광소자가 갖는 전기적 등가 모델과 검출되는 신호의 특성을 분석하여 이를 정확하게 모델링 하는 것이 중요하다^[5]. 다이오드 타입의 UV 센서이지만 높은 절연저항을 갖는 강유전체이므로 그림 1 처럼 모델링 하였다^[6]. 여기서 전류원 I_{UV}는 입사되는 자외선의 강도에 따라 발생하는 전류를 나타내며, I_{dark}는 UV가 입사되지 않을 때 센서에 흐르는 전류이다. C_{UV}와 R_{UV}는 각각 초전체가 갖는 정전용량 및 저항 성분의 등가 값이다.

III. 실험

1. ROIC 회로 설계

8x8 FPA용 ROIC는 검출기에서 발생하는 신호를 처리하는 8x8 ReadOut Unit Cell (ROUC) array와 ROUC에서 처리된 신호를 픽셀(pixel) 단위로 순차적으로 선택하여 외부로 출력하는 셀 선택 스위치 및 디지털 제

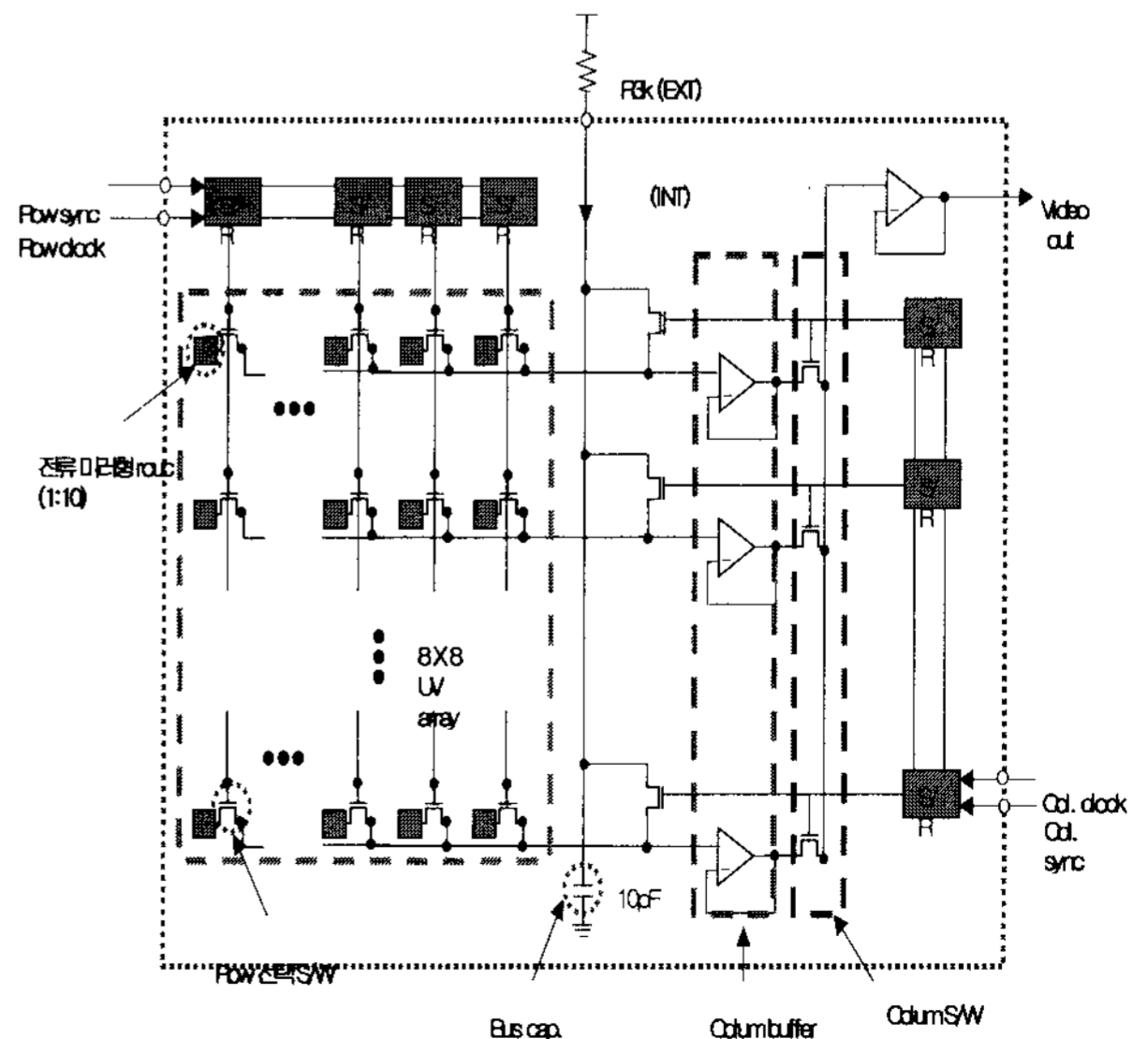


그림 2. 8x8 UV 검출기용 ROIC 전체 구조
Fig. 2. A architecture of ROIC for 8x8 UV detector.

어부 그리고 Column 버퍼 및 출력 버퍼 등으로 구성되어 있다^[7]. 그림 2에 전체 구조를 나타내었다.

1) Readout Unit Cell (ROUC)

ROIC 설계에 있어서 핵심이 되는 부분은 자외선을 검출하는 포토다이오드에서 출력되는 신호를 처리하는 ReadOut Unit Cell(ROUC) 회로이다. ROUC 회로는 포토다이오드 출력신호 범위에 대하여 균일한 응답(response) 특성을 가져야 하며, 가능한 한 큰 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio: SNR)를 갖도록 설계되어야 한다^[8]. 설계된 ROUC는 전치증폭기(pre-amplifier) 및 고역통과 필터(high pass filter: HPF), 저역통과 필터(low pass filter: LPF), 클램프(clamp) 회로, 버퍼(buffer), 그리고 row 선택 스위치 등으로 구성된다.

전치 증폭기는 포토다이오드에서 발생하는 신호를 적절한 크기로 증폭하는 기능을 수행하며, 포토다이오드가 갖는 전기적인 특성을 고려하여 설계되어야 한다. 본 개발에서는 전치증폭기는 CMOS 인버터(inverter) 증폭기 구조로 5배 정도의 이득을 갖도록 설계하였고, 전력 소모를 줄이기 위하여 5 V의 전원전압으로 동작 되도록 하였다.

한편, 포토다이오드의 고유 캐패시턴스 (resident capacitance)는 전치증폭기에 사용된 피드백(feedback) 저항과 함께 고역통과 필터 역할을 하여 10 Hz 미만의 저주파 잡음을 제거하는 기능을 수행하도록 하였다.

2) 디지털 제어부

디지털 제어부는 ROIC의 동작을 위해 필요한 각종 제어신호를 발생하는 블록이다. 디지털 제어부는 ROUC 어레이에서 처리된 신호를 픽셀 단위로 순차적으로 출력시키기 위한 행/열(row/column) 선택 신호를 생성하며, ROUC 어레이를 열(row) 단위로 클램프시키기 위한 제어신호와 출력 버퍼에서 사용되는 제어신호를 생성하도록 하였다. 디지털 제어부는 행과 열을 처리하기 위해 두 개로 구성하였다.

3) Column 버퍼 및 출력 버퍼

ROUC 어레이로부터 행(column) 단위로 출력되는 신호는 행 선택 스위치를 통해 단일 출력으로 변환되어 출력버퍼로 전달되므로 그 출력노드는 ROUC 어레이의 행 수에 비례하는 부하용량을 갖는다. 따라서, 이들 노드를 구동하기 위한 버퍼가 필요하며, 이를 위해 행 선택 스위치 앞단에 버퍼를 삽입하였다. 전류 구동능력과

주파수 특성을 고려하여 column 버퍼는 operational transconductance amplifier (OTA)로 설계하였다.

출력파형의 안정성을 도모하기 위해 출력단에 커패시터와 저항을 추가하였다. 출력 버퍼는 column 버퍼에서 ROIC 동작 타이밍에 맞게 출력된 신호가 칩 내에서 원활히 구동할 수 있도록 전류를 흘려주는 증폭기 및 푸쉬-풀(push-pull) 버퍼와 8개의 column 신호를 모두 readout한 뒤 다음 column 동기 신호가 입력되기 전까지 공백 시간동안 기준 신호를 출력하도록 제어하는 제어 블록, 기준 신호를 만들어주는 블록 등으로 구성된다. 출력버퍼는 column 선택 스위치 뒷단에 위치하여 ROIC 외부로 신호를 출력하는 기능을 수행하며, column 버퍼와 유사한 구조로 설계되었다.

4) ROIC 회로검증

설계된 ROIC의 전체적인 동작은 full-chip 레벨 시뮬레이션을 통해 검증하였다. ROIC는 외부로부터 column 클럭신호, 라인동기 신호 및 row 클럭신호, 그리고 프레임동기 신호를 받아 readout 동작이 제어된다.

그림 3은 full-chip 시뮬레이션 결과로 입력에 따른 출력 특성을 보여준다. 본 개발에서는 full-chip 시뮬레이션을 위해 일반적인 회로해석 툴인 Hspice를 사용하였다. 전체 칩의 기능을 검증하기 위해서는 8x8 어레이를 구성하는 64개의 ROUC 각각에 서로 다른 입력신호를 인가하여 출력을 관찰함으로써 전체 칩의 동작을 검증하였다.

그림 3에서처럼 입력 신호를 순차적으로 작게 주었을 때, 출력 역시 순차적으로 작게 나타나고 있으며 검

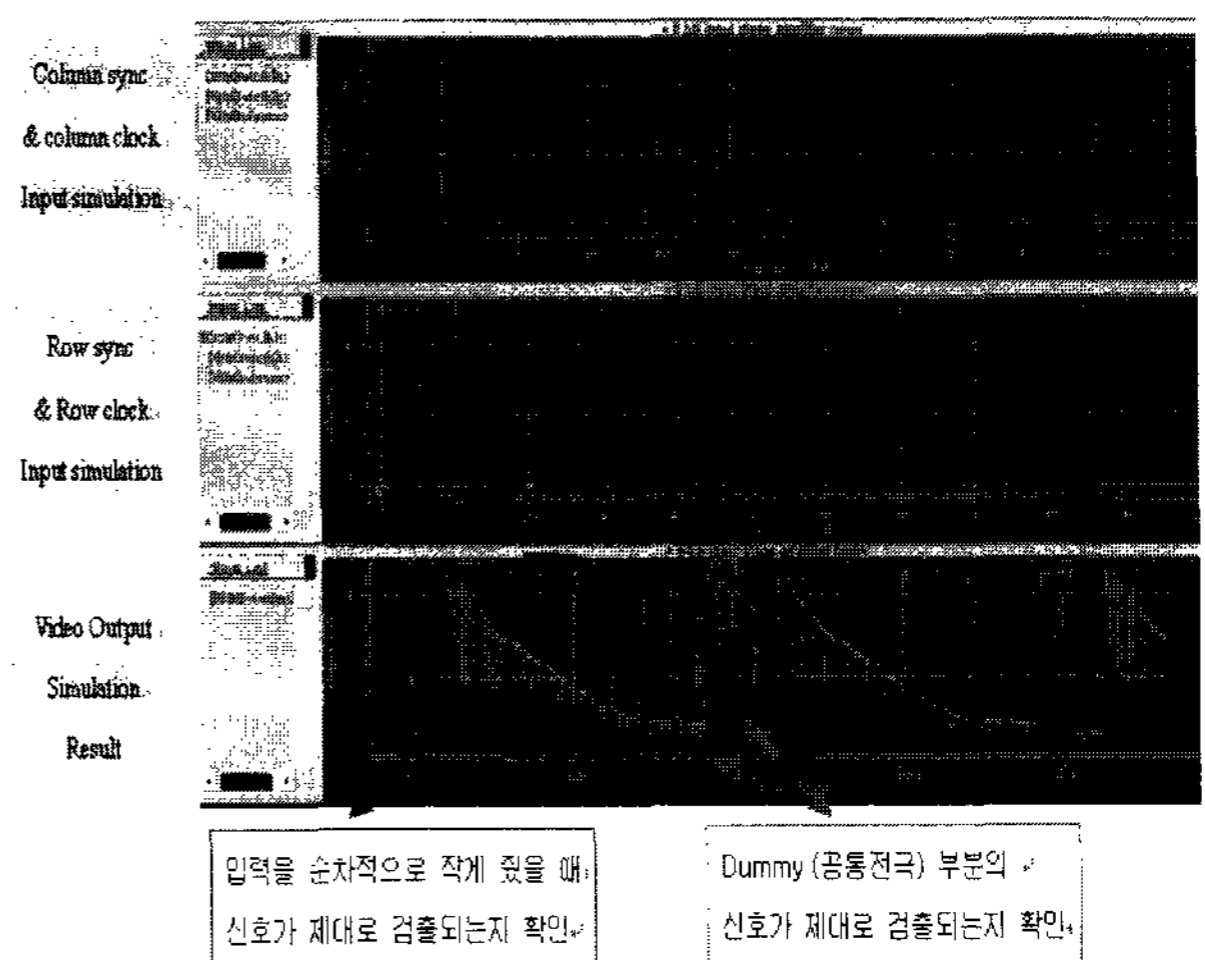


그림 3. 8x8 UV 검출용 ROIC의 full-chip 시뮬레이션
Fig. 3. Full-chip simulation of ROIC for 8x8 UV detector.

출기 제작에 앞서서 ROIC의 full-chip 동작을 확인하기 위하여 row와 column에 각각 한 라인씩 삽입된 더미 셀(dummy cell) 부분의 특성도 simulation을 통하여 검증하였다.

2. 8x8 ROIC 레이아웃 및 제작

그림 4는 8x8 FPA ROIC의 레이아웃을 보여준다. 8x8 포토다이오드의 개별 센서의 크기가 130 μm x 130 μm이었으므로 센서와 1:1로 플립칩 본딩되어지는 ROIC의 크기는 130 μm x 130 μm로 제한되어졌다. ROIC 내의 기본적인 기능들을 테스트하기 위하여 ROIC의 각 노드에 패드를 일정한 간격을 두고 좌우 8개씩 배치하였다. 칩 아래 부분에 ROIC 어레이를 배치하고, 그 위에 column 버퍼 및 column 선택 스위치를 위치시켰다. 디지털 제어부를 구성하는 row decoder와 column decoder는 각각 칩의 오른쪽과 맨 위쪽에 배치하였다. 설계된 8x8 ROIC의 전체 레이아웃 면적은 2163.2 x 2289.9 μm² = 4.954 mm²이었다.

설계된 ROIC의 제작은 AMI 0.5 μm 2P3M (2poly, 3metal) N-Well CMOS 공정을 이용하였다.

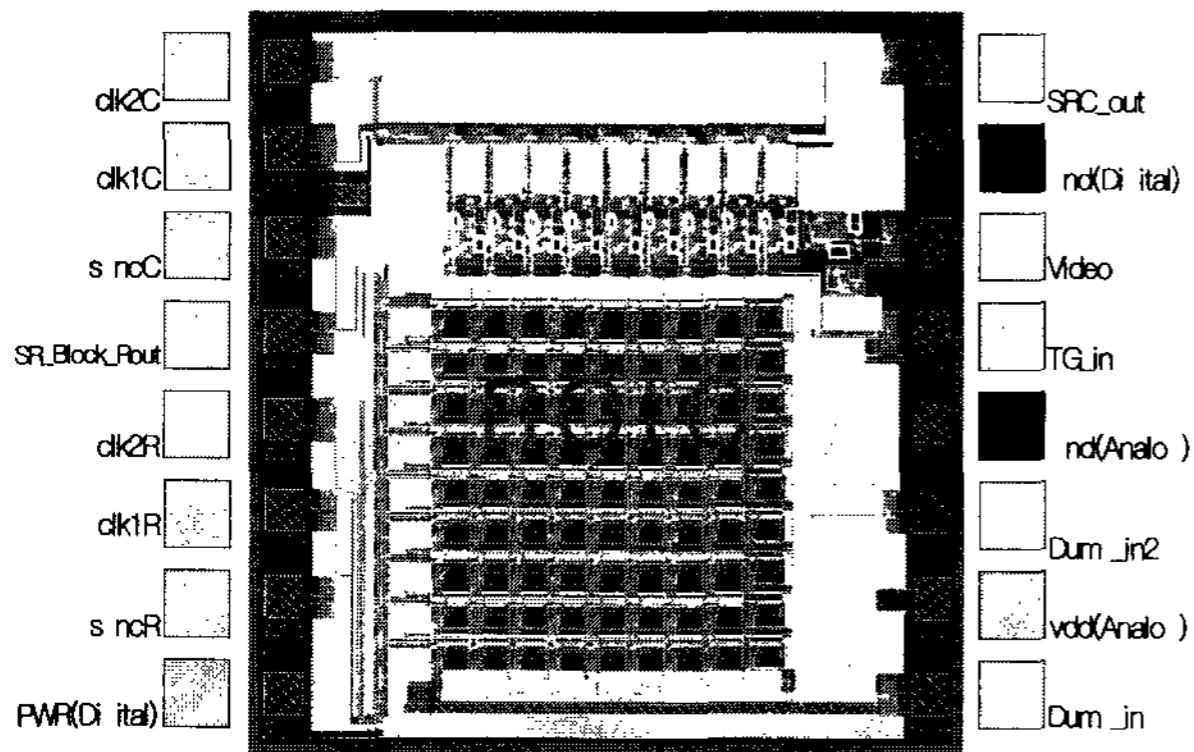


그림 4. UV 검출기 용 8x8 FPA ROIC의 레이아웃
Fig. 4. Layout of 8x8 FPA ROIC for UV detector.

3. 하이브리드 패키지

Gold Stud Bump와 ACP를 이용한 Stack Diode형으로 ROIC Packaging 공정을 수행하였다. Gold 범프 공정을 선택하여 와이어 본딩 공정을 이용한 gold stud bumping 공정을 적용 하였다.

Gold stud bumping은 기존 ball wire bonding법을 응용한 공정으로 본 개발에서는 20 μm 직경의 gold wire를 사용하여 약 70 μmm 직경의 범프를 형성하였다. 본 공정에서는 어레이 소자에 간격이 좁기 때문에 일반적인 범프가 아닌 윗부분을 약간 없애주어 플립칩 본딩

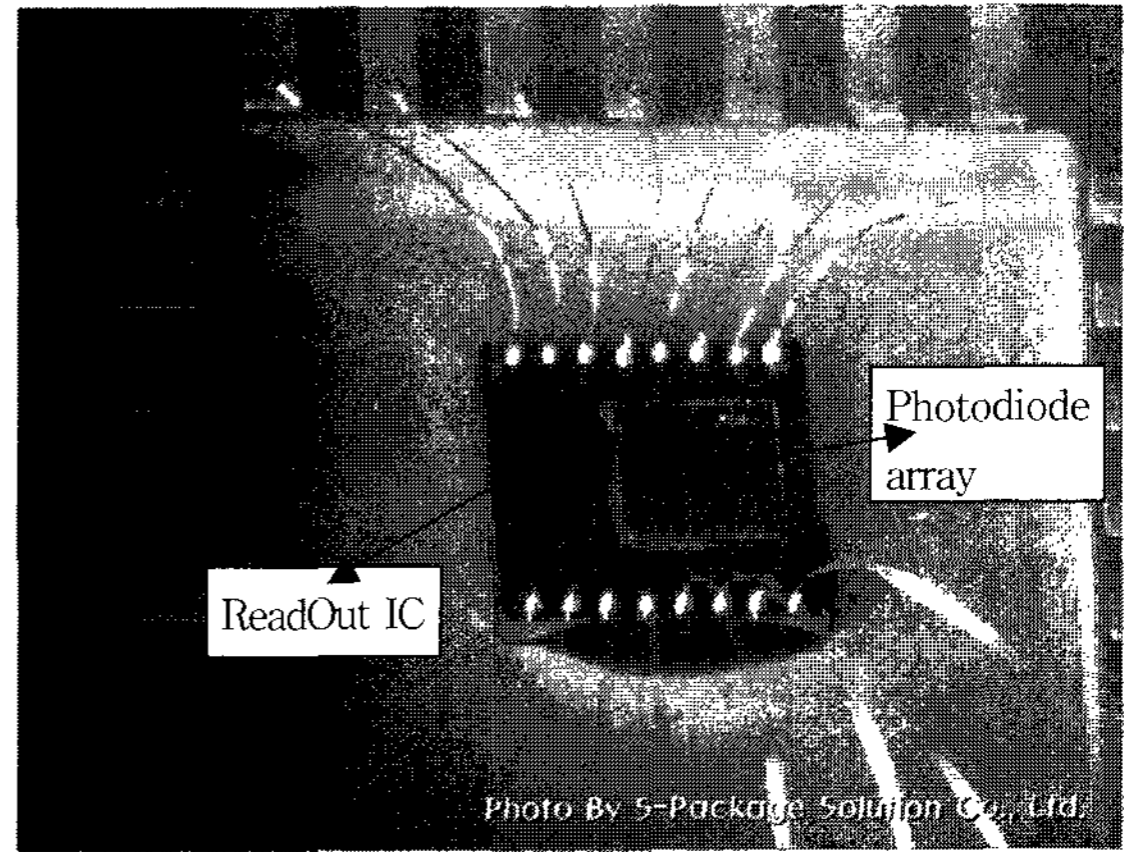


그림 5. 포토다이오드와 하이브리드 패키징된 ROIC의 wire bonding 후 구조

Fig. 5. The structure of ROIC hybrid packaged with photodiode after wire bonding.

시 좌우로 퍼지는 양을 감소시키도록 하였다.

자외선 신호를 검출하기위한 ROIC와 외부와의 전기적 신호연결은 질화물 포토다이오드 어레이와 ACP 플립칩 본딩된 적층형 ROIC를 ball wire bonding 공법^[10]을 사용하여 패키징하였다. 사용된 패키지는 24pin의 세라믹 패키지를 사용하였고 pin 배열은 외부 회로 설계팀의 요청에 맞춰 배열하였다. 그림 5는 최종 wire bonding 된 소자의 전체모습을 보여준다.

4. 자외선 영상 측정

OIC의 완전한 동작 검증은 앞 그림5의 소자를 사용하여 자외선 영상 시스템을 구성한 후 PC 영상으로 확인하였다. 영상 시스템은 ROIC 제어신호 발생하고 ROIC로부터 나온 신호를 AD컨버터로 변환하여 증폭하고 잡음제거 후 RS232 통신을 통하여 PC로 보내도록 하였다. PC에서는 영상 프로그램을 통하여 UV 검출 화면을 그림 6에 나타냈다.

그림 6(a)은 자외선이 입력되지 않았을 때의 모습이다. Dummy 부분을 제외하고 8x8 어레이 형태의 검출기가 모두 검게 나타나 자외선이 검출되지 않는 모습을 보이고 있다. 그림 6(b)은는 검출기 어레이 전면에서 자외선이 조사된 경우이다. 8x8 어레이 모두가 조사된 자외선에 의해 밝게 나타나고 그 밝기의 차이는 검출기의 효율에 따른 차이로 보여진다. 그림 6(c)은 UV를 8x8 자외선 어레이 검출기의 한 부분으로 집중시킨(focus) 결과 화면이다. 8x8 어레이에서 집중된 부분의 픽셀만이 밝게 나타나고 있다.

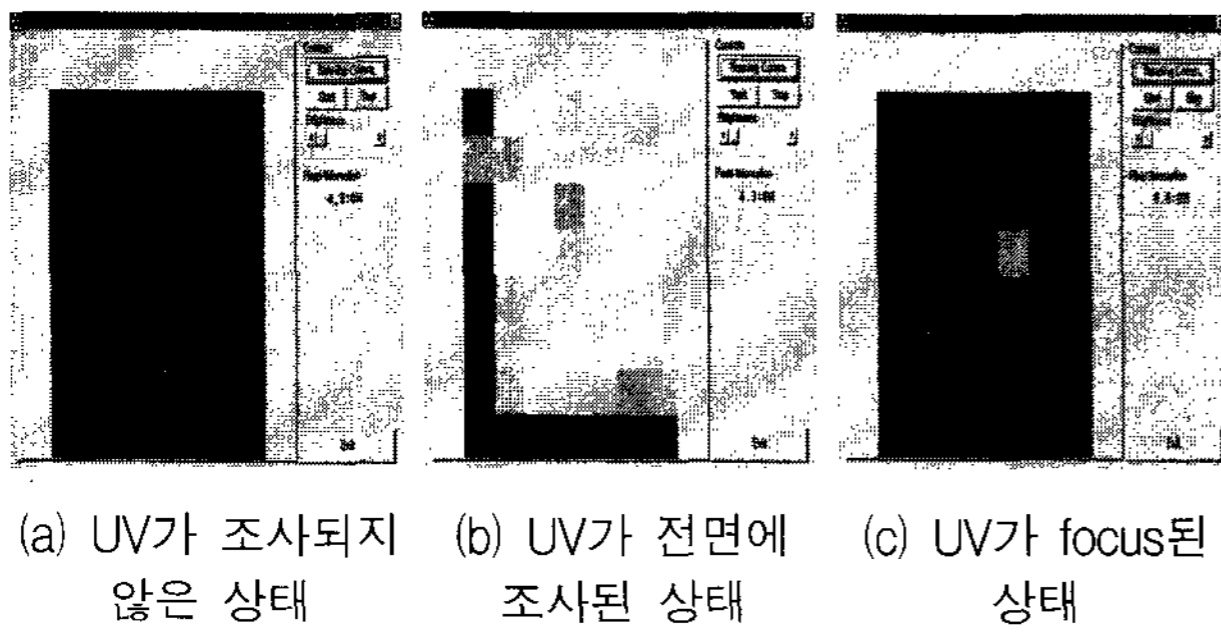


그림 6. PC에 모니터된 UV 검출 신호
Fig. 6. UV detecting signal is monitored on PC.

IV. 결 론

UV 검출기로서 질화물 포토다이오드를 사용한 FPA(Focal Plane Array)용 UV 카메라를 개발하기 위하여 질화물 포토다이오드용 8x8 ROIC를 설계하였다. 포토다이오드 타입 검출기를 등가 모델링하였고, 검출되는 신호를 받아 이를 증폭하고 잡음제거 필터링을 거쳐 픽셀 단위로 순차적으로 출력하는 기능을 수행하도록 설계하였다.

ROIC는 0.5 μ m 2Poly 3Metal N-Well CMOS process를 이용하여 제작되었으며, 이방성 전도성 페이스트(Anisotropic Conductive Paste: ACP)를 사용하는 gold stud bumping 공정으로 ROIC와 포토다이오드 어레이를 하이브리드 본딩 하였다. 자외선 영상 시스템을 구성하여 자외선 검출기로부터 자외선 영상을 검출(read out)하여 PC로 확인할 수 있었다.

본 실험에서 자외선 동영상 구현까지는 아직 실현되지 못하였지만 개발된 8x8 UV FPA용 ROIC가 검출기의 신호를 증폭하고 잡음을 제거한 후 순차적으로 자외선 신호를 전달하고 있음을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] S. Nakamura, T. Mukai and M. Senoh, "Candela-class high-brightness InGaN/AlGaIn double-heterostructure blue-light-emitting diodes", Appl. Phys. Lett., vol. 64, pp. 1687-1689 (1994).
- [2] S. Nakamura, M. Senoh, N. Iwasa and S. Nagahama, "High-power InGaN single-quantum-well-structure blue and violet light-emitting diodes", Appl. Phys. Lett., vol. 67, pp. 1868-1870 (1995).
- [3] J. D. Brown et al., "Visible-Blind UV Digital Camera Based on a 32x32 Array of GaN/AlGaIn p-i-n Photodiodes", MIJ-NSR, vol. 4, article 9 (2002).
- [4] 우회구, 신경욱, 송성해, "비냉각 영상장치용 64x64 IRFPA CMOS ReadOut IC", 전자공학회논문지, 제36권 C편, 제5호, 27-37쪽, 1999년 5월
- [5] Paul W. Kruse and David D. Skatrud, "Uncooled infrared imaging arrays and systems", Academic Press, 1997.
- [6] J. D. Brown et al., "Visible-Blind UV Digital Camera Based on a 32x32 Array of GaN/AlGaIn p-i-n Photodiodes", MIJ-NSR, vol. 4, article 9, 2002.
- [7] E. R. Fossum and B. Pain, "Infrared Readout Electronics for Space Science Sensors : State of the art and Future Directions", SPIE vol. 2020 Infrared Technology XIX. pp. 262-285, 1993.
- [8] J. F. Belcher and R. A. Owen, "Uncooled Infrared Detector Processing", TI Technical Journal, pp. 27-35, 1994.
- [9] D. D. Chang, P. A. Crawford, J. A. Fulton, R. McBride, M. B. Schmidt, R. E. Simtski, C. P. Wong, "An Overview and Evaluation of Anisotropically Conductive Adhesive Films for Fine Pitch Electronic Assembly", IEEE Transact. Components Hybrids, Manufact. Technol. Vol. 16(8), pp. 828-835, 1993.

저 자 소 개



김 주 연(정회원)
 1990년 광운대학교 전자재료과
 학사 졸업.
 1993년 광운대학교 전자재료과
 석사 졸업.
 2001년 광운대학교 전자재료과
 박사 졸업.

현재 울산과학대학 전기전자통신학부 조교수
 <주관심분야 : 반도체>



김 태 근(정회원, 교신저자)
 1990년 고려대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 1993년 고려대학교 전자공학과
 석사 졸업.
 1997년 고려대학교 전자공학과
 박사 졸업.

현재 고려대학교 전자공학과 부교수
 <주관심분야 : 반도체 >