

# 식스 시그마 기법을 활용한 입체 영상 센서용 광학 필터의 개발

## Development of Optical Filters for 3D Image Sensor Application by Employing the Six Sigma Methodology

이명복<sup>1</sup>, 편양범<sup>2\*</sup>

Myung-Bok Lee<sup>1</sup>, Yang-Bum Pyun<sup>2\*</sup>

### 요약

식스 시그마 기법은 생산현장의 품질관리, 경영관리뿐만 아니라 연구개발에도 유용하게 사용할 수 있다. 본 논문에서는 식스 시그마 방법론을 활용하여 3차원 입체 영상을 얻을 수 있는 CMOS 영상 센서의 구현에 필수적인 광학 필터의 설계 및 개발에 대하여 연구한 결과를 기술한다. 식스 시그마 방법론으로서는 일반적으로 사용되는 DMAIC 프로세스를 적용하였다. CMOS 영상 센서용 광학 필터는 근적외선 투과 필터와 근적외선 차단 필터가 있는데, 필요로 하는 수광 파장대에 따라 다양한 필터 조합의 설계가 가능하며, 근적외선 필터의 광학설계를 위하여 Macleod program을 사용하였다. 또한 SiO<sub>2</sub>와 TiO<sub>2</sub> 다층 박막의 적층을 위하여 RF 마그네트론 스퍼터링 등 CMOS 반도체 표준공정에 적합한 제작 공정을 이용하여 근적외선 차단 필터를 구현하였다.

핵심어 : 식스 시그마, 정보 융합, 3차원 입체 영상, CMOS 영상 센서, 광학 필터, 근적외선 필터

### Abstract

Six Sigma methodologies can be used not only for quality control and solving the management problem of production lines, but also for research and development of novel products. In this paper, we describe the design and fabrication of optical filters, which are essential for the realization of three-dimensional(3D) CMOS image sensor using Six Sigma methodology. The DMAIC process was applied as a Six Sigma roadmap. Optical filters for the 3D CMOS image sensor consist of an infrared(IR) cut filter and an IR pass filter, and various filter combinations can be optically designed according to the required light-receiving wavelength band. Macleod program was used for optical design of the IR filters. In addition, an IR cut filter was fabricated using a standard CMOS-compatible processes such as RF magnetron sputtering by multilayer stacking of thin films composed of SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> inorganic materials.

Keyword : Six sigma, Information convergence, 3D image, CMOS image sensor, Optical filters, IR filters

1 Division of Mechanical and Metallic Mold Engineering, Gwangju University, Gwangju, Korea [Professor]  
e-mail: mblee3@gwangju.ac.kr

2 Department of Real Estate and Finance, Gwangju University, Gwangju, Korea [Professor]  
e-mail: ybpyun@gwangju.ac.kr (Corresponding author)

\* 이 연구는 2019년도 광주대학교 대학 연구비의 지원을 받아 수행되었습니다.

Received(August 19, 2019), Review Result(1st: September 01, 2019), Accepted(September 09, 2019), Published(September 30, 2019)

## 1. 서론

식스 시그마 기법이란, 기업 등의 조직으로 하여금 자원의 낭비를 최소화하는 동시에 고객 만족을 최대화하는 방법으로 조직활동을 설계하고 운영하여 결과적으로 조직의 수익성을 향상시키는 비즈니스 프로세스라고 정의할 수 있다[1][2]. 또한 식스 시그마는 기획, 개발, 제조, 판매, 품질관리 등 경영 활동 전반의 효율성 개선을 위한 다양한 도구와 기법을 도입함으로써 기업의 핵심 역량을 지속적으로 향상시킬 수 있는 프로그램이다[3]. 미국의 Motorola 사에서 1987년에 식스 시그마 운동이 시작된 이래, 수 많은 글로벌 기업에서 이 프로그램을 활용하여 제품과 서비스의 품질 개선, 생산성 향상 및 비용 절감 등 다양한 측면에서 놀라운 성과를 올릴 수 있었다[4]. 시그마란 품질특성의 산포의 크기를 의미하며, 식스 시그마란 통계적으로 100 만번의 기회 당 3.4 개에 해당하는 결함이 발생하는 프로세스로 매우 높은 품질 수준을 의미한다. 제품이나 서비스의 품질과 관련해서 발생하는 코스트로 기회비용을 포괄한 개념인 품질 비용(quality cost)은 예방비용이 1이라면, 평가비용은 10, 실패비용은 100에 이른다고 한다[5]. 따라서 품질을 설계 품질, 제조 품질, 사용 품질로 구분할 때, 설계 품질의 관리가 무엇보다 중요하며 이러한 관점에서 제품의 개발 단계로부터 식스 시그마를 적용하는 것이 필요하다고 할 수 있다. 개발 단계에서 식스 시그마를 적용한다는 것은, 소비자의 요구사항을 정확히 파악하고 이를 제품의 품질특성, 즉 주요 성능과 사양으로 변환시키며, 나아가 실제 제조가 가능한 제품의 설계로 전개하는 것을 의미한다. 이는 처음부터 올바른 목표를 정하고 이를 올바른 방법으로 수행하는 품질 철학과 상통한다.

한편, 4차 산업혁명으로 일컬어지는 지능정보 융합 시대에 있어서 사물인터넷을 통한 초연결 사회의 구현을 위하여 각종 스마트 센서의 수요는 향후 급증할 것으로 예상된다. 본 논문에서는 3차원 입체 영상 센서의 개발을 위한 식스 시그마 방법론 적용 사례에 대하여 보고하고자 한다. 식스 시그마 프로세스는 표준적으로 사용되고 있는 문제해결 절차인 정의(define), 측정(measure), 분석(analyze), 개선(improve), 관리(control)의 다섯 단계, 즉 DMAIC 로드맵을 적용하였으며[6], 각 단계별로 달성하고자 하는 목표와 적용한 도구 및 성과에 대하여 상세히 설명하였다. 본 기법을 활용함으로써 컬러 영상과 거리 정보를 동시에 얻을 수 있는 3D 영상 센서를 구현하기 위해서 근적외선 필터와 컬러 필터가 단일 칩 위에 집적된 CMOS 영상 센서의 제작 프로세스를 확보하였다. 얻어진 근적외선 차단 필터와 투과 필터의 광학 특성을 평가함으로써 특정 파장 대의 빛에 대하여 충분한 차단 및 투과 특성을 설계대로 나타냄을 확인할 수 있었다.

## 2. 연구 및 실험방법

### 2.1 식스 시그마 설계 방법론

식스 시그마 프로세스는 여러 가지가 있는데, 본 논문에서는 일반적으로 사용되는 DMAIC 프로세스를 적용하였다. DMAIC 프로세스는 여러 기업에서 제품의 품질 개선을 위하여 성공적으로 적용된 바 있으며 연구개발 분야에서도 활용 가능한 프로세스이다[7][8]. 각 단계별로 달성하고자 하는 목표와 사용한 도구 및 방법들을 [표 1]에 나타내었다.

[표 1] 본 프로젝트에서 적용된 프로세스 순서 및 적용 도구  
 [Table 1] Sequence of Process and Tools Employed in This Project

Stage	Goal	Tools
Define	▪ Identify CTQ and plan the Six Sigma projects	▪ VOC ▪ CTQ
Measure	▪ Check the measurement method and identify the current quality level	▪ MSA
Analyze	▪ Identify the causal relationship between CTQ and factors affecting them	▪ Fishbone diagram ▪ C&E matrix
Improve	▪ Find ways and conditions to increase CTQ satisfaction	▪ DOE ▪ FMEA
Control	▪ Manage to maintain the improved quality state	▪ Check list ▪ Control chart

### 2.2 실험 방법

3D 영상 센서는 130 nm CMOS 반도체 공정을 이용하여 제작되었으며, 적녹청(RGB) 컬러 픽셀과 거리(Z) 픽셀이 동일 평면 위에 배치되어 있다. 또한 픽셀 당 2.5 개의 트랜지스터를 갖는 2.25  $\mu\text{m}$  피치의 RGBG 컬러 1920(H)  $\times$  1080(V) 2M 픽셀 어레이를 수정하여 설계하였으며 총 1.55M 픽셀을 갖는다[9]. 각 거리 픽셀은 2개의 전송 게이트와 2개의 출력 포트가 있는 pinned 포토다이오드로 구성되어 있다. Column signal line은 컬러 및 거리 픽셀에 대해 별도로 구성되어 있으며 신호 처리는 칩의 외부에서 이루어진다.

본 센서의 적외선 차단 필터의 원하는 광학 스펙트럼을 얻기 위해 Macleod 프로그램을 사용하여 유전체 산화물 다층 박막의 전체 층 수와 SiO<sub>2</sub> 및 TiO<sub>2</sub> 층 수 및 두께를 설계하였다. SiO<sub>2</sub>와 TiO<sub>2</sub> 박막은 순도 99.99 %인 직경 50 mm의 산화물 타겟을 사용하여 RF 마그네트론 스퍼터링법에

의해 10 mTorr의 분위기 압력 하에서 증착되었으며 이 때 기판 온도는 100℃로 하였다. 제작된 다층 박막의 표면 및 단면 형상은 주사전자현미경(Hitachi, S-4700)으로 관찰하였고, 파장에 따른 광투과율 스펙트럼은 자외광/가시광 분광광도계(Shimadzu, UV1800)로 측정하였다.

적외선 투과 필터용 포토리지스트는 적색 안료, 녹색 안료 및 청색 안료를 소정 비율로 혼합하여 합성하였다. 칩 상의 적외선 투과 필터와 컬러 필터는 i-선의 자외광을 사용하는 포토리소그래피 공정에 의해 제작되었다. 먼저, 상기 3D 영상 센서 기판 상에 흑색 안료를 포함하는 포토리지스트로 이루어진 근적외선 투과 재료를 스핀 코팅하고 포토 공정으로 거리 센서 영역을 패터닝하였다. 다음에, 녹색 포토레지스트 재료를 기판 상에 스핀 코팅하고 녹색 픽셀 영역을 패터닝하였다. 청색과 적색 픽셀도 녹색 픽셀과 동일한 방법으로 순차적으로 패터닝하였다.

### 3. 결과 및 고찰

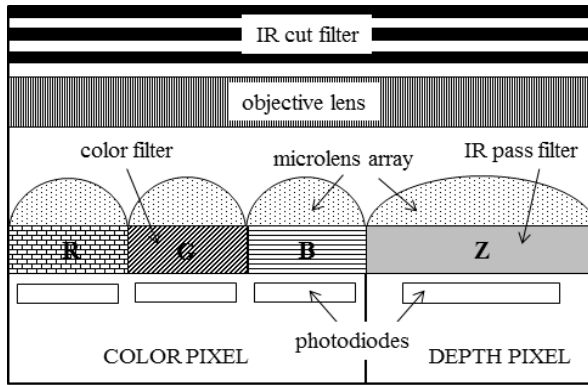
#### 3.1 Define 단계

DMAIC의 첫 단계로 문제가 무엇인지 정의하고 핵심품질특성(Critical to quality, CTQ)을 파악하여 문제를 해결하기 위한 프로젝트를 선정하는 단계이다. 이를 위해서는 [표 1]에 나타난 바와 같이 먼저 고객을 정의하고 고객의 요구(Voice of customers, VOC)를 명확히 파악해야 한다.

CMOS 영상 센서는 광학적인 영상을 구성하는 정보를 감지하고 전달하여 이를 전기적 신호로 변환하는 반도체 소자이다[10]. 종래의 CMOS 영상 센서는 2차원 컬러 영상 정보를 제공하고, 거리 센서는 물체까지의 거리, 즉 3차원 입체 정보를 제공한다. 거리 센서는 파장 850 nm 부근의 적외선 LED를 광원으로 사용하기 때문에 단색의 영상 정보만을 제공할 수 있다. 광원에서 출사된 적외선 광은 물체에서 반사되어 센서 내의 수광부인 포토다이오드에 입사되며 빛이 반사되어 되돌아오는 시간을 2분할 포토다이오드 간의 위상차에 의해 측정함으로써 물체까지의 거리를 측정할 수 있다. 한편, 3D 컬러 영상 센서는 단일 칩 내에서 컬러 영상 정보와 거리 정보를 동시에 얻을 수 있다[11-14]. 이러한 3D 영상 센서는 게임기, 웹 카메라, 가상현실 및 증강 현실 기기의 제스처 인식과 같은 다양한 분야에 사용될 수 있다. 3D 영상 센서를 구현하려면 각 신호의 크로스 토크를 방지하기 위해 컬러 센서 픽셀에는 가시광만이, 그리고 거리 센서 픽셀에는 적외광만이 입사해야 한다. 본 프로젝트에서는 대물렌즈 위에 적외선 차단 필터가 배치되고, 센서 칩 위에 컬러 필터와 적외선 투과 필터가 배치되는 새로운 영상 센서 구조를 제안한다.

[그림 1]은 본 프로젝트의 3D 영상 센서의 개념도이다. [그림 2]는 본 영상 센서에 사용되는 대물렌즈 상의 적외선 차단 필터와 센서 칩 상의 적외선 투과 필터 및 컬러 필터의 목표하는 광 투

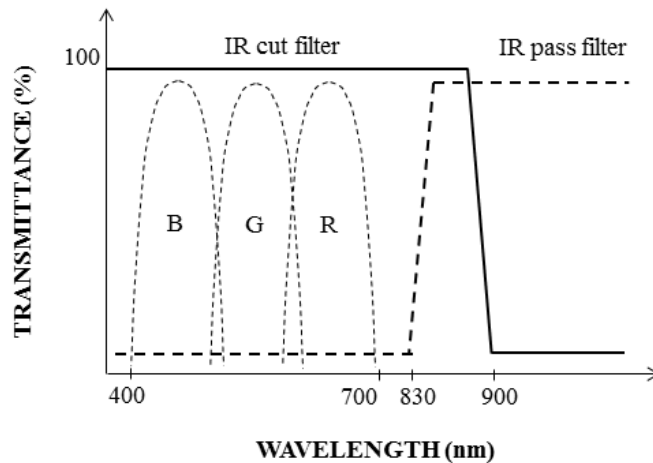
과울 스펙트럼을 나타낸다. 컬러 픽셀의 RGB 컬러 필터는 각각의 가시광에 대하여 선택적으로 투명하다. 거리 픽셀의 근적외선 투과 필터는 파장 830 nm 이상의 근적외광에 대하여 선택적으로 투명하며, 또한 적외선 차단 필터는 가시광선 및 850 nm 부근의 적외광에 대하여 선택적으로 투명하도록 설계 및 제작되어야 한다. 한편, 기존의 CMOS 영상 센서에서는 적외선 투과 필터는 불필요하며, 적외선 차단 필터는 700 nm 이상의 적외광을 차단하도록 설계된다.



[그림 1] 본 과제의 3D 영상 센서의 개념도

[Fig. 1] Conceptual Diagram of the 3D Image Sensor Proposed in This Project

이상에서, 본 3D 영상 센서의 품질에 영향을 미치는 CTQ는 기존과 다른 개념을 갖는 적외선 차단 필터와 적외선 투과 필터의 파장에 따른 광 투과 특성이라고 할 수 있다. 따라서, 본 식스 시그마 과제의 목표는 목표로 하는 광학 스펙트럼을 갖는 적외선 필터를 균일하고 안정성 있게 구현할 수 있는 광학 설계 방법, 재료 선정 및 제조 공정 등을 개발하는 것이다.



[그림 2] 적외선 필터 및 컬러 필터의 목표 스펙트럼을 나타내는 모식도

[Fig. 2] Schematic Diagram of Targeted Optical Transmittance Spectra of the IR and Color Filters

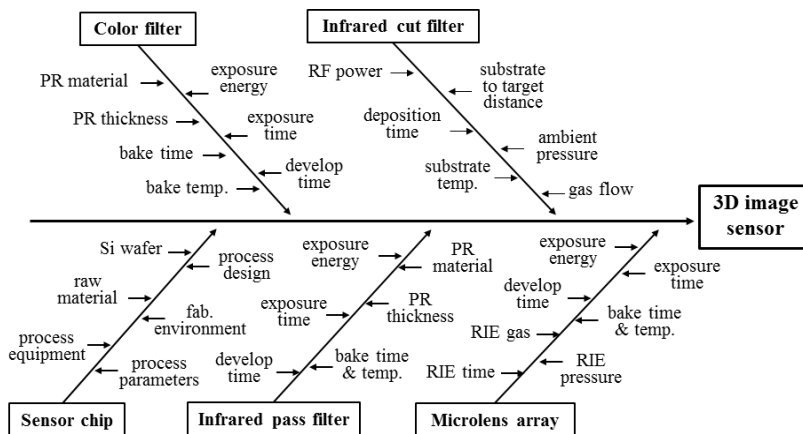
### 3.2 Measure 단계

식스 시그마의 가장 큰 특징 중 하나는 사실, 즉 데이터에 근거하여 모든 것을 판단한다는 것이다. 본 단계에서는 측정을 통하여 현재의 수준을 정확히 파악하고, 현 수준과 고객이 요구하는 품질 수준의 갭을 분석하여 개선 목표를 수립한다. 현상의 분석을 위하여 사용하는 데이터의 정확성을 확보하기 위해 측정 시스템 분석 (Measurement system analysis, MSA)을 수행한다. MSA란 측정 도구, 측정 방법, 측정 환경, 작업자 등 측정의 전체 과정을 평가하여 데이터의 재현성과 반복성을 얻고자 하는 것이다.

본 과제에서는 컬러 영상과 입체 정보를 단일 칩을 사용하여 동시에 얻을 수 있는 새로운 3D 영상 센서를 구현하기 위하여 새로운 광학필터 구조를 제안하고 개발한다. 문헌 조사를 통하여 3D 영상 센서의 기술 동향을 파악하였으며[11-14], 광학적 특성 분석 기기들의 MSA를 통하여 측정 데이터에 충분히 신뢰를 가질 수 있음을 확인하였다.

### 3.3 Analyze 단계

본 단계에서는 CTQ의 충족 정도(Y)에 영향을 주는 잠재적인 원인 변수들을 찾고, 그 중에서 영향도가 큰 핵심 인자인 ‘Vital Few X’를 선별한다. 이를 위하여 프로세스 맵핑에 따른 특성요인도 (Cause & effect diagram) 작성을 통하여 제품 성능에 영향을 미치는 잠재 인자들을 도출한다. 또한, 원인-결과 매트릭스(Cause & effect matrix) 분석을 통하여 가설을 설정하고 검정하여 여러 잠재 인자들 중에서 핵심 인자들을 도출한다. 본 과제의 3D 영상 센서는 크게 센서 칩, 컬러 필터, 적외선 차단 필터, 적외선 투과 필터, 마이크로렌즈 어레이 등의 부분품으로 구성된다.



[그림 3] 3D 영상 센서의 제작방법에 대한 특성요인도

[Fig. 3] Cause and Effect Diagram for the Fabrication of 3D Image Sensor

[그림 3]에 3D 영상 센서 제작을 위한 주요 부품별로 품질과 성능에 영향을 미칠 수 있는 잠재 인자들을 특성요인도, 즉 fishbone 도표에 의하여 도시하였다. 또한, 구성 요소 중에서 가장 중요한 요소 중 하나인 적외선 차단 필터에 대하여 잠재 인자들과 품질 특성 간의 상호 관련성을 보여 주는 원인-결과 매트릭스를 작성하였다. 적외선 차단 필터로는, 일반적으로 굴절률이 다른 두 종의 유전체 산화물, 본 과제에서는 SiO<sub>2</sub>와 TiO<sub>2</sub> 박막이 교호로 적층되어 구성된 다층 박막이 사용된다 [15-20]. 이 때 각 산화물 층의 재질, 두께 및 전체 layer 수를 선택함으로써 파장에 따른 광 투과율의 변화를 제어할 수 있다. [그림 4]는 적외선 차단 필터의 광학적 특성을 결정하는 요인-결과 매트릭스도를 나타낸다. 가장 중요한 구성 요소인 적외선 차단 필터 공정에서 그림으로부터 본 3D 영상 센서의 품질 성능에 가장 큰 영향을 미치는 핵심 인자(vital few X's)는 그 중요도 순으로 스퍼터링 시의 분위기 압력, 반응가스의 유량, RF 인가 전력 등인 것을 알 수 있다.

No.		1	2	3	4	5	
Rating of Importance		7	8	8	9	10	
Process Step	Process Output	Optical transmittance	Thickness uniformity	Thickness precision	Particulate matter	Optical spectrum	Total Score
	Process Input						
Infrared Cut Filter	RF power	3	3	3	9	3	180
	Deposition time	3	3	3	3	3	126
	Substrate temperature	3	3	1	9	1	144
	Substrate to target distance	3	3	3	3	1	106
	Working pressure	9	9	9	3	9	324
	Gas flow rate	9	3	3	3	9	228
	Purity of sputter target	3	1	1	1	3	76

[그림 4] 적외선 차단 필터에 대한 요인-결과 매트릭스도

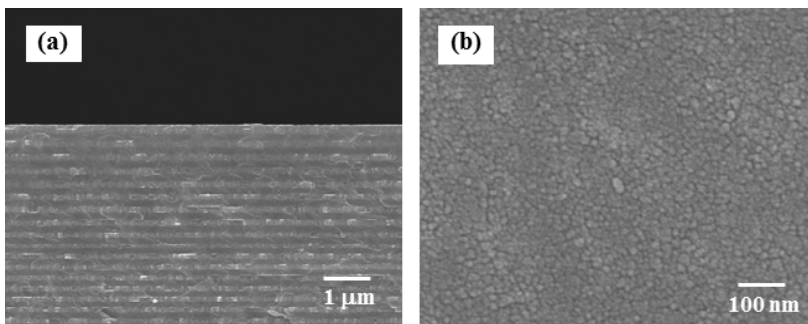
[Fig. 4] Cause and Effect Matrix Diagram for the Infrared Cut Filter

### 3.4 Improve 단계

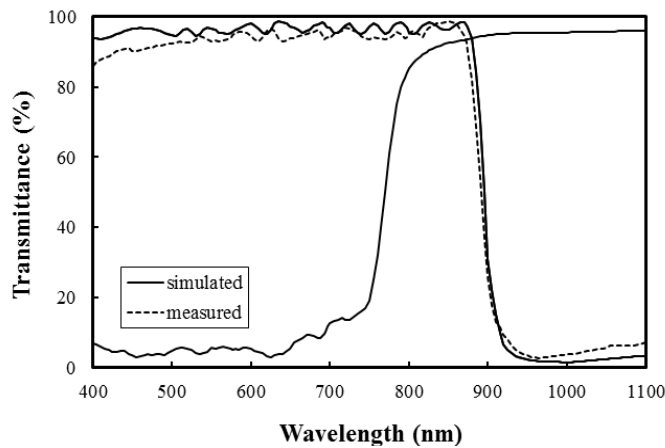
본 단계에서는 문제의 근본 원인을 제거하기 위하여, 앞 단계에서 얻은 핵심 인자에 대하여 최적 조건을 찾아내어 프로세스의 개선을 실행한다. 본 과제에서는 실험계획법(Design of experiment, DOE)을 통하여 제조 공정의 최적 조건을 도출하였다. 분위기 압력, 반응가스의 유량, RF 인가 전력의 3인자와 2수준을 사용한 완전요인설계를 시행하였고 반응인자(Y)로는 SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> 다층 박막의 단면 형상과 광학 스펙트럼을 선정하여 실험하였다. 이 때 기판은 glass를 사용하였고 스퍼터 타겟의 순도는 99.99% 이상, 기판과 타겟 사이의 거리는 80 mm, 기판 온도는 100℃로 고정하였다. 주 인자와 교호인자들에 대한 95% 신뢰도 수준에서 유의미한 순서에 따른 파레토 차트를 분석한 결

과, 예상한 바와 같이 분위기 압력과 반응가스의 유량이 다층 박막의 단면 형상과 광학 특성에 가장 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

DOE를 통하여 구한 최적 조건인 분위기 압력 5 mTorr, 반응가스의 유량 Ar 20 sccm 및 O<sub>2</sub> 5 sccm, RF 인가 전력 300 W의 실험 조건에서 얻어진 SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> 다층 박막의 단면 및 표면 SEM 사진을 [그림 5]에 나타내었다. 단면 SEM 이미지는 넓은 영역에 걸친 다층 박막이 균일하게 형성되었음을 보여주고 있다. 또한 표면 이미지는 박막의 표면이 평탄하고 균일하며 10-20 nm의 작은 결정립으로 구성되어 있음을 보여준다. 큰 결정립을 갖는 박막은 내부응력이 큰 상태로 균열 및 박리 현상을 일으키기 쉽기 때문에, 본 다층 박막은 내구성 및 신뢰성 측면에서 적외선 차단 필터 응용에 유리할 것으로 생각된다. 한편, 또한 SiO<sub>2</sub> 및 TiO<sub>2</sub> 단층막 및 SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> 다층박막의 결정 구조를 X선 회절법으로 분석한 결과, 회절 곡선상의 중요한 피크는 관찰되지 않았고 단일 및 다층 박막이 비정질 구조를 가지는 것으로 나타났다.



[그림 5] SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> 다층 박막 적외선 차단 필터의 주사전자현미경 사진, (a) 단면 형상 (b) 표면 형상  
 [Fig. 5] SEM Images Showing (a) Cross-sectional Shape and (b) Surface Morphology of the Infrared Cut Filter with SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> Multilayered Film



[그림 6] 최적화된 조건에서 제작된 SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> 다층 박막 적외선 차단 필터 및 투과 필터의 광투과 스펙트럼  
 [Fig. 6] Optical Transmittance Spectra of an Infrared Cut Filter and an Infrared Pass Filter Fabricated at Optimized Process Condition

[그림 6]은 최적조건에서 제작된 적외선 차단 필터 및 투과 필터의 광학 스펙트럼의 설계 및 측정 결과를 나타낸다. 측정된 스펙트럼은 설계된 것과 잘 일치하며, 이는 박막의 두께와 화학적 조성이 광학 설계대로 잘 증착되었음을 의미한다. 적외선 차단 필터의 측정된 스펙트럼 특성을 400-870 nm의 파장을 갖는 광에 대한 투과율이 90% 이상이었고, 900 nm 이상의 파장에 대해 약 10% 미만의 투과율로 목표로 하는 스펙을 만족하였다. 적외선 투과 필터 또한 파장  $850\pm 30$  nm 부근의 적외광에 대하여 90% 이상의 투과율을 나타내어 만족할 만한 수준이었다.

### 3.5 Control 단계

본 단계에서는 개선사항을 표준화한 후 개선안의 실행책임자를 결정하고 주기적인 모니터링을 통해 개선된 상태가 제대로 유지되고 있는지를 확인해야 한다. 이를 위해, 최적 공정조건에 따라 상기의 광학 스펙트럼 등과 같은 주요 특성에 대하여 관리도(Control chart)를 작성하여 품질을 관리한다. 관리도란 데이터의 변화 추이를 나타내는 그래프로서, 공정 품질의 상태를 통계적으로 파악할 수 있는 관리 한계선이 설정된다. 특성값 데이터를 관리도상에 나타낸 점들이 관리 한계선 내에 있으면 관리상태로 간주하고, 이 점들이 관리 한계선을 벗어나면 이상이 발생한 것으로 보아 그 원인을 찾고 해결해야 한다. 또한 본 단계에서는 공정의 핵심 인자 등 주요 관리 항목들을 체크 시트로 작성하여 중점 관리하도록 한다.

## 4. 결론

컬러 영상과 거리 정보를 동시에 얻을 수 있는 3D 영상 센서를 구현하기 위해서, 식스 시그마 프로세스를 적용하여, 근적외선 필터와 컬러 필터가 단일 칩 위에 집적된 CMOS 영상 센서 제작 프로세스를 확보하였다. 식스 시그마 프로세스는 일반적으로 사용되고 있는 DMAIC 프로세스를 적용하였으며, 프로젝트의 각 단계별로 달성하고자 하는 목표에 따라 적합한 방법과 도구를 적용하였다. 본 기법을 활용함으로써 평탄한 표면과 균일한 단면 형상을 갖는 SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> 산화물 다층박막으로 이루어진 적외선 투과 필터 제작 기술을 확보하였다. 본 기법을 활용함으로써 얻어진 적외선 차단 필터 및 적외선 투과 필터의 광학 특성을 평가함으로써, 설계한 대로의 광학 스펙트럼을 갖는 우수한 광학적 투과 특성을 나타냄을 확인할 수 있었다.

## References

- [1] M. Harry and R. Schroeder, Six Sigma: the Breakthrough Management Strategy Revolutionizing the World's Top Corporations, Currency, New York, (1999).
- [2] T. Bertels, Rath & Strong's Six Sigma Leadership Handbook, John Wiley and Sons, New Jersey, (2003), pp. 57-83.

- [3] T. Pzydek, "Six sigma Is Primarily a Management Program", *Quality Digest*. (1999 Sep.), p.26.
- [4] J. Antony and R. Banuelas, "Key ingredients for the effective implementation of Six Sigma program", *Measuring Business Excellence*, (2002), Vol. 6, No. 4, pp.20-27, [<https://doi.org/10.1108/13683040210451679>].
- [5] C. R. Superville and S. Gupta, "Issues in modeling, monitoring and managing quality costs", *The TQM Magazine*, (2001), Vol. 13, No. 6, pp.419-424, [<https://doi.org/10.1108/EUM000000006178>].
- [6] J. d. Mast and J. Lokkerbol, "An analysis of the Six Sigma DMAIC method from the perspective of problem solving", *International Journal of Production Economics*, (2012), Vol. 139, No. 2, pp.604-614, [<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.05.035>].
- [7] P. Kaushik and D. Khanduja, "Application of Six Sigma DMAIC methodology in thermal power plants: A case study", *Total Quality Management & Business Excellence*, (2009), Vol. 20, No. 2, pp.197-207, [<https://doi.org/10.1080/14783360802622995>].
- [8] T. Hasenkamp and A. Olme, "Introducing design for Six Sigma at SKF", *Int. J. Six Sigma and Competitive Advantage*, (2008), Vol. 4, No. 2, pp.172-189, [<https://doi.org/10.1504/IJSSCA.2008.020281>].
- [9] W. Kim, W. Yibing, I. Ovsianikov, S. H. Lee, Y. Park, Y. Chung and E. Fossum, "A 1.5M pixel RGBZ CMOS image sensor for simultaneous color and range image capture", *IEEE Int. Solid-St. Circ. Conf.*, (2012), pp.392-394, [<https://doi.org/10.1109/ISSCC.2012.6177061>].
- [10] S. Mendis, S. Kemeny, R. Gee, B. Pain, C. Staller, Q. Kim and E. Fossum, "CMOS active pixel image sensors for highly integrated imaging systems", *IEEE J. Solid-St. Circ.*, (1997), Vol. 32, pp.187-192, [<https://doi.org/10.1109/4.551910>].
- [11] T. Oggier, "Image sensor technologies for 3D time-of-flight range imaging", *Proc. 2011 Int. Image Sensor Workshop*, (2009) June 26-28; Bergen, Norway.
- [12] D. Stoppa, N. Massari, L. Pancheri, M. Malfatti, M. Perenzoni and L. Gonzo, "A range image sensor based on 10- $\mu$ m lock-in pixels in 0.18- $\mu$ m CMOS imaging technology", *IEEE J. Solid-St. Circ.*, (2011), Vol. 46, pp.248-258, [<https://doi.org/10.1109/JSSC.2010.2085870>].
- [13] S. J. Kim, J. Kim, S. W. Han, B. M. Kang, K. C. Lee and C. Y. Kim, "A 640 $\times$ 480 image sensor with unified pixel architecture for 2D/3D imaging in 0.11 $\mu$ m CMOS", *IEEE Symp. VLSI Circuits*, (2011), pp.92-93.
- [14] M. B. Lee, "Fabrication of Infrared Filters for Three-Dimensional CMOS Image Sensor Applications", *Trans. Electr. Electron. Mater.*, (2017), Vol. 18, No. 6, pp.341-344, [<https://doi.org/10.4313/TEEM.2017.18.6.341>].
- [15] X. Wang, H. Masumoto, Y. Someno and T. Hirai, "Helicon plasma deposition of a TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> multilayer optical filter with graded refractive index profiles", *Appl. Phys. Lett.*, (1998), Vol. 72, pp.3264-3266, [<https://doi.org/10.1063/1.121618>].
- [16] A. Dakka, J. Lafait, M. Abd-Lefdil and C. Sella, "Optical study of titanium dioxide thin films prepared by R.F. sputtering", *M. J. Condensed Matter*, (1999), Vol. 2, No. 1, pp.153-156.
- [17] S. Bauer, L. Klippe, U. Rothhaar and M. Kuhr, "Optical multilayers for ultra-narrow bandpass filters fabricated by PICVD", *Thin Solid Films*, (2003), Vol. 442, No. 1, pp.189-193, [[https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(03\)00981-7](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(03)00981-7)].
- [18] H. Asghar, M. Shoab, F. Placido and S. Naseem, "Wide bandpass optical filters with TiO<sub>2</sub> and Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>", *Cent. Eur. J. Phys.*, (2008), Vol. 6, No. 4, pp.853-863, [<https://doi.org/10.2478/s11534-008-0104-3>].
- [19] D. S. Hinczewski, M. Hinczewski, F. Z. Tepahan and G. G. Tepahan, "Optical filters from SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> multi-layers using sol-gel spin coating method", *Solar Energy Mater. and Solar Cells*, (2005), Vol. 87, No. 1, pp.181-196, [<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2004.07.022>].
- [20] M. Mazur, D. Wojcieszak, J. Domaradzki, D. Kaczmarek, S. Song and F. Placido, "TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> multilayer as an antireflective and protective coating deposited by microwave assisted magnetron sputtering", *Opto-Electron. Rev.*, (2013), Vol. 21, No. 2, pp.233-238, [<https://doi.org/10.2478/s11772-013-0085-7>].