



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정 장치의 설계 및 구현

Design and Implementation of Electric Field
Measuring Device using MOS Capacitor

2015 년 2 월

서울대학교 대학원

전기·컴퓨터공학부

이 용 훈

MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정 장치의 설계 및 구현

Design and Implementation of Electric Field Measuring
Device using MOS Capacitor

지도교수 민 상 렬

이 논문을 공학석사학위논문으로 제출함

2015년 2월

서울대학교 대학원

전기·컴퓨터공학부

이 용 훈

이용훈의 석사학위논문을 인준함

2015년 2월

위 원 장 : _____ (인)

부위원장 : _____ (인)

위 원 : _____ (인)

위 원 : _____ (인)

요약

전기장은 전기력이 영향을 미치는 공간을 의미하며 전하의 존재 또는 운동에 의해 발생한다. 현대의 전자 기술 발달은 많은 전자 기기를 이용하도록 하였으며 이에 따라 다양한 형태로 공간상에 형성된 전기장이 활용되고 있다. 하지만 이러한 전기장의 활용에는 암 유발과 같은 부정적 영향이 상존하고 있으며, 따라서 다양한 전기장을 종합적으로 측정할 수 있는 전기장 측정 장치가 필요하나 현재의 전기장 측정 장치로는 이를 정확하게 측정해내기 어렵다.

MOS 커패시터는 전기장을 이용하여 전하를 저장하는 장치이며 또한 외부 전기장에 노출될 때 저장된 전하가 유출될 수 있는 특성을 가지고 있으므로, MOS 커패시터의 전하 유출 또는 유입량을 이용하여 전기장을 측정할 수 있다.

이를 입증하기 위해 본 연구에서는 MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정 장치 및 구현 방법을 제안하였으며 이러한 측정 장치의 제어 방법 역시 제안하였다. 제안된 전기장 측정 방법을 이용한 전기장 측정 여부를 판단하기 위해 전하결합소자를 이용한 시제품을 제작하여 전기장 측정 여부에 대한 실험을 실시하였다.

실험 결과 시제품을 이용한 시험 결과 전자가 저장된 MOS 커패시터 주위에 작용하는 전기장의 크기에 비례하여 전자의 유출이 일어남을 확인할 수 있었다. 향후 본 장치의 물리적 해석 및 실질적인 전기장 측정 장치의 측정부 제작을 통해 전기장 측정 장치에 대한 정량적 실험을 수행할 계획이다.

주요어 : 전기장, 측정 장치, MOS 커패시터, 반도체, 전하결합소자

학 번 : 2013-22509

목차

요약	i
목차	ii
그림 목차	vi
표 목차	vii
제 1 장 서론	1
1.1 연구 동기	1
1.2 연구 내용	3
1.2 논문의 구성	5
제 2 장 배경 지식 및 관련 연구	6
2.1 전기장과 전위	6
2.2 전기장의 형성 원리	7
2.3 전기장 측정 장치의 원리 및 구조	9
2.4 반도체 기반 전기장 측정 장치 관련 연구	13
2.5 MOS 커패시터의 원리 및 기능	17
제 3 장 전기장 측정 장치의 설계	21
3.1 구성 요소 및 기능	22

3.2 측정부 설계	23
3.3 측정부의 실제 구조	32
3.4 전기장 측정 장치의 제어 단계	38
제 4 장 전기장 측정 장치의 시제품 구현 및 실험	47
4.1 시제품 구현	49
4.2 실험 방법 및 결과	55
제 5 장 결론 및 향후 연구 과제	59
참고문헌	61
Abstract	65
감사의 글	67

그림 목차

그림 2.1 정전하에 의한 전기장의 형성	7
그림 2.2 다이폴 안테나에 의해 형성되는 시변 전자계	9
그림 2.3 나노미터 스케일 기계식 전위계	14
그림 2.4 실리콘 기반 나노 안테나 배열	14
그림 2.5 MOS 커패시터의 구조와 작동 원리	16
그림 3.1 기본 구성	22
그림 3.2 1차원상의 전기장 측정 원리	23
그림 3.3 1차원상의 전기장 측정 방법의 변형	25
그림 3.4 2차원상의 전기장 측정 원리	27
그림 3.5 2차원상의 전기장 측정 결과	31
그림 3.6 2차원상의 전기장 시각화 방법	32
그림 3.7 단일 MOS 커패시터를 이용한 구조	34
그림 3.8 복수의 MOS 커패시터를 이용한 구조	35
그림 3.9 2차원 전기장 측정 장치 구조	36
그림 3.10 입력 회로 제어 방법	40
그림 3.11 MOS 커패시터 간 전하의 이동 방법.	42
그림 3.12 출력 회로 제어 방법	42
그림 3.13 전기장 측정 장치의 작동 순서도	45
그림 4.1 전기장 측정 장치 시제품	48
그림 4.2 S10420-1006-01 전하결합소자	50
그림 4.3 측정부 개발 보드의 구성	52

그림 4.4 제어부의 구성	53
그림 4.5 사용자 명령에 따른 측정부의 동작	54
그림 4.6 측정부 내 전기장 형성 방법	55
그림 4.7 전하 공급 시간에 따른 공급 전하량	56
그림 4.8 고정 전압 인가 시 전자 유출량	58
그림 4.9 교류 전압 인가 시 전자 유출량	58

표 목차

표 4.1 S10420-1006-01의 물리적 특성.51
---------------------------------------	-----

제 1 장 서론

1.1 연구 동기

전자기 상호작용은 강한 상호작용, 약한 상호작용 및 중력과 더불어 자연계에 존재하는 네 가지 기본 상호작용 중 하나이다. 입자물리학에서 전자기 상호작용은 대전된 입자 사이의 상호작용을 의미하며, 광자(Photon)에 의해 전달된다[5]. 한편 고전물리학에서 전자기 상호작용은 전자기력의 형태로 물질 사이에 존재하며 이 때, 전기력과 자기력이 전달되는 공간을 각각 전기장 및 자기장이라고 한다[8].

전기장은 정지된 전하에 의해 형성되는 정전기장(Static Electric Field)과, 전하의 이동에 의해 형성되는 시변 전자기계(Time-Varying Electromagnetic Field)로 나눌 수 있다. 예를 들어, 임의의 정지된 전하는 같은 종류의 전하를 끌어당기거나 다른 종류의 전하를 밀쳐내는 등 정전기력을 발생시키는데, 이 정전기력이 영향을 미치는 공간을 정전기장이라 부른다. 한편, 전선에 흐르는 전류와 같이 움직이는 전하는 자기장을 유도하며, 이 때 자기장의 크기 또는 방향이 함께 변화하게 되면 이 자기장에 의해 다시 전기장이 유도된다. 이렇듯 전기장과 자기장의 상호작용에 의해 존재하는 전기장을 시변 전자기계라 부른다.

특정한 위치에 모인 전하에 의해 발생하는 정전기장은 누적된 전하량에 의해 결정되므로 전하량이 바뀌지 않는 한 그 크기와 방향이 바뀌지 않는다. 이러한 특성으로 인해 일반적으로 정전기장의 크기는 대전된 다른 전하에 미치는 힘을 기계적으로 측정하는 방법[9]을 사용하거나 또는 두 개의 전극 사이의 전위차를 이용하는 방식[10]을

이용하여 측정된다. 한편, 전기장과 자기장의 상호작용에 의해 발생하는 시변 전자계는 시간 의존성을 가지므로 정전기장의 측정에서 사용한 방법을 적용할 수 없으며, 대신 안테나를 이용하여 전자기 유도에 의해 안테나에 흐르는 유도 전류의 크기를 통해 전기장의 크기를 도출한다[8].

한편, 현대 과학 기술의 발달로 다양한 형태의 전자 장비들이 우리 주변에서 사용되고 있으며, 이러한 전자 장비들은 무선 통신, 동작 인식, 영상 획득 및 뇌전도(Electroencephalogram)와 같은 다양한 기능의 구현을 위해 전기장을 이용한다. 한편, 이러한 전자 장비들의 전자기 누설(Electromagnetic Leakage)로 인한 인체와 기계의 피해, 무선 통신 기술 발달로 인한 다양한 주파수의 사용이 인체에 미치는 부정적인 영향 등 의도하지 않은 전기장의 영향으로 인한 피해 역시 커지고 있는 실정이다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 다양한 형태의 전기장을 종합적으로 측정할 수 있는 방법 및 도구가 반드시 필요하다.

하지만 정전기장과 시변전자계는 서로 다른 측정 원리를 가지므로 그 측정 결과는 상당히 제약적일 수 있다. 예를 들면, 교류 전기 및 직류 전기를 동시에 사용하는 시스템에서는 시변전자계에 의한 전기장과 정전기장의 합이 특정 시점에 굉장히 큰 영향을 미칠 수 있지만[21] 이와 같은 복합적 전기장의 크기는 일반적인 전기장 측정 장치를 이용하여 측정해내기 어렵다. 또한, 시변전자계 측정에 이용되는 측정장치인 안테나는 일반적으로 그 형상에 의해 측정 대상 주파수의 대역이 고정되므로[19] 다양한 주파수가 사용이 되는 현대의 무선 통신 환경에서는 측정 장치로서 활용도가 낮아질 수 밖에 없다.

또한, 기존의 전기장 측정 장치는 아주 약한 전기장의 측정에 어려움이 있다. 예를 들면, 뇌파 측정의 경우에는 두개골이 전기장 차폐

효과를 갖기 때문에 외부에 방출되는 전기장의 세기는 매우 미약하다. 따라서 이와 같은 전기장을 측정하는 장치는 내부에 증폭기(amplifier)를 포함하여야 하는데, 증폭률이 클수록 증폭기에서 발생하는 잡음(noise) 역시 강해지므로 증폭률은 항상 제한되며, 여기에 신호와 잡음을 구분하는 회로가 추가적으로 필요하게 된다.

더 나아가, 기존의 전기장 측정 장치는 일반적으로 전기장의 방향을 측정하지 못하며, 심지어 측정되는 전기장의 크기 역시 측정 장치의 위상에 따라 측정 결과가 달라지는 특성을 가진다. 예를 들면, 시변 전자계를 측정하기 위한 측정 장치에 장착된 안테나와 시변 전자계의 원인이 되는 전자기파의 위상이 일치하지 않는 경우 안테나를 따라 흐르는 유도 전류의 크기가 감소하며[19], 따라서 측정된 전기장의 크기는 실제보다 작게 나타난다. 때문에, 단일 센서를 이용하여 전기장을 측정하는 경우, 전기장의 세기와 방향을 정확히 측정하기 위해서는 센서의 위상을 정교하게 바꿔가며 수 차례 측정한 후 각각의 결과를 종합하여 분석하여야 하는 불편함이 있다.

이러한 문제들을 극복하기 위해 정전기장과 시변 전자계의 구분 없이 전기장의 영향을 종합적으로 측정할 수 있는 측정기술이 필요한 한편, 단일 측정 장치를 통해 전기장의 세기와 방향을 3차원상에서 표현할 수 있는 방법이 반드시 필요하다.

1.2 연구 내용

본 연구의 목표는 시공간상에서 전기장의 세기와 방향을 동시에 측정할 수 있는 측정 장치를 설계하고 구현하는 것이다. 이러한 목표를 달성하기 위해 공간상의 특정한 지점에 위치한 전하의 전기력에 의한 운동을 관측하는 방법으로 전기장을 측정하는 장치를 고안하고

이와 같은 설계를 실제로 구현하는 방법 및 장치를 제어하여 전기장을 측정하는 방법이 필요하다. 이를 위해, 본 연구에서는 MOS 커패시터(Metal-Oxide-Semiconductor Capacitor)를 공간상에 배열함으로써 전하를 특정한 지점에 위치시키고 전기장에 노출시킨 후 전하의 위치를 측정하는 방법을 제안한다.

MOS 커패시터는 게이트 전극에 인가되는 게이트 전압을 이용하여 전하를 저장하는데[20], 이 때, 인가된 게이트 전압의 크기 및 저장된 전하량에 의해 전하를 저장하는 전기력의 크기가 달라지므로 측정하고자 하는 대상 전기장의 세기가 약한 경우에도 이를 측정할 수 있도록 제어될 수 있다. 같은 서브스트레이트를 공유하는 MOS 커패시터의 배열은 각각의 MOS 커패시터에 인가되는 게이트 전압을 이용하여 서브스트레이트 내의 전자를 자유롭게 이동시킬 수 있는 한편, 전기장에 노출됨에 따라 이동한 전자를 쉽게 속박할 수 있다. 또한, 복수의 MOS 커패시터들은 다시 복수의 측정 단위로 구성이 가능하므로 공간상의 다양한 위치에서 전기장을 측정하는 데에 사용될 수 있다. 이와 같이, MOS 커패시터의 배열과 이를 제어하기 위한 제어 회로 등을 이용하여 구성된 단일 전기장 측정 장치는 본 연구에서 목표로 하는 공간상의 다양한 위치에서 전기장의 세기와 방향을 동시에 측정하는 기능을 수행할 수 있다.

한편 본 연구에서는 MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정 장치를 전하결합소자(Charge-Coupled Device; CCD)를 이용하여 구현하였다. 전하결합소자는 MOS 커패시터의 배열을 이용하여 구성[7]되므로 본 연구에서 제안하는 전기장 측정 장치와 유사한 형태를 가지나 이미지 센서로서의 역할을 위해 전하의 이동 방향 제한, 서브스트레이트의 열전자 형성 등의 중요한 특징들이 본 연구에서 제안하는 장치와 차이가 있다. 본 연구에서는 이와 같은 제한사항을 감안하여 연

구를 진행하였으며 이 같은 제한된 형태의 연구 결과를 향후 더 발전된 형태의 전기장 측정 장치의 개발을 위해 사용할 수 있을 것이라 판단된다.

1.3 논문의 구성

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 전기장 측정 원리와 전기장 측정 장치에 대한 이전의 관련 연구를 소개하며, 또한 MOS(Metal-Oxide-Semiconductor) 커패시터와 MOS 커패시터를 이용한 다른 형태의 측정 장치인 전하 결합 소자(Charge Coupled Devices; CCD)에 대해 설명한다. 제3장에서는 MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정 방법에 대해 설명한다. 우선 MOS 커패시터를 이용하여 전기장을 측정할 수 있는 물리적 원리에 대해 소개하며, 이러한 물리적 원리를 이용하기 위한 측정 장치의 구성과 동작 방법에 대해 설명한다. 제4장에서는 MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정 장치를 전하결합소자를 이용하여 구현하고, 이를 이용하여 전기장을 측정하는 실험 및 그 결과에 대해 서술한다. 마지막으로 제5장에서는 결론 및 추후 연구과제에 대해 설명한다.

제 2 장 배경 지식 및 관련 연구

2.1 전기장과 전위

전기장(Electric Field)은 자연계에 존재하는 4대 기본 상호작용 중 하나인 전자기 상호작용에 의한 전기력이 영향을 미치는 공간을 의미한다[5]. 전기력은 전하를 띤 물질에 작용하는 힘으로서, 같은 극성을 가진 전하끼리는 밀어내는 힘이, 다른 극성을 가진 전하끼리는 끌어당기는 힘이 작용한다. 전하를 띤 물질, 전자나 쿼크, 또는 양성자와 같은 아주 작은 입자로부터, 마찰 등으로 인해 대전된 물체에 이르기까지 전하의 존재는 전기력을 발생시킨다. 또한 시간에 따라 크기와 방향이 변하는 전류는 전자기파를 발생시키며, 전자기파는 서로 수직 성분의 전기장과 자기장으로 구성되는 바, 움직이는 전하 역시 전기장을 발생시킨다. 전자와 같이 공간상의 특정한 지점에 속박된 전하에 의해 발생하는 전기장을 정전기장(Static Electric Field)라 부르며, 후자와 같이 전자기파에 의한 전기장을 시변 전자기계(Time-varying Electromagnetic Field)라 부른다[8].

전기력이 미치는 공간으로서 전기장은 단위 전하에 미치는 전기력의 크기로 정의된다. 즉,

$$\mathbf{E} = \lim_{q \rightarrow 0} \frac{\mathbf{F}}{q} \quad (\text{V/m})$$

와 같이 정의된다[8].

또한, 중력장 내의 위치에너지와 같이 전기장 내에서도 위치 에너지가 정의될 수 있다. 단위 전하에 미치는 전기적 위치 에너지를 전위(Electric Potential)이라 부르며

$$V = \int \mathbf{E} \, ds \quad (V, W/q)$$

와 같이 정의된다[8].

2.2 전기장의 형성 원리

전기장은 공간상에 전하의 존재에 의해 형성되거나, 공간상에 존재하는 전하의 운동에 의해 유도될 수 있다. 전자를 정전기장(Static Electric Field)라 부르며, 후자를 시변 전자계(Time-Varying Electromagnetic Field)라 부른다[8].

정전기장은 공간상에 존재하는 임의의 전하에 의해 발생하는 전기력이 미치는 공간을 의미한다. 공간상에 임의의 전하(정전하, Static Charge)가 존재하는 경우, 이 전하는 같은 극성을 가진 다른 전하를 밀어내거나(척력), 다른 극성을 가진 다른 전하를 잡아당긴다(인력). 따라서 공간상에 존재하는 임의의 전하는 전기장을 형성하며, 이 때 임의의 전하 q_1 이 거리 r 만큼 떨어진 다른 임의의 전하 q_2 에 미치는 힘은

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

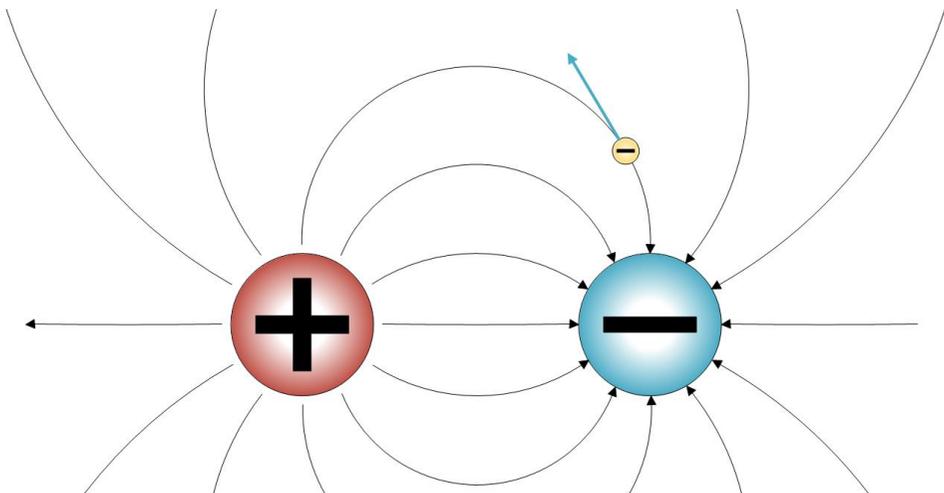


그림 2.1 정전하에 의한 전기장의 형성

으로 정의되며 이 때 k 는 쿨롱 상수를 의미한다. 이 경우 전하 q_1 에 의해 형성되는 전기장의 크기는

$$E = k \frac{q_1}{r^2}$$

과 같이 정의된다.

정전기장은 전기력을 일으키므로 정전기장 내에 전하를 띤 물체가 존재하는 경우 물체를 움직이게 하는 물리력이 발생한다. 예를 들면, 전하를 띤 두 도체를 줄에 매달아놓고 서로 접근시키면 전하의 극성에 따라 두 물체간에 척력 또는 인력이 발생한다.

또한 정전기장은 도체 또는 반도체 내부의 자유전자를 이동시켜 물체 내부의 전하 분포를 변형시키거나, 부도체 내부에서 분극 현상(Electric Displacement)을 발생시킨다. 예를 들면, 축전지는 두 전극 상의 전위차에 의해 형성된 전기장이 전극 사이의 유전체에 분극 현상을 일으키는 원리를 이용하여 전기를 저장한다.

한편, 시변 전자계는 전하의 운동에 의해 유도되는 전기장이다. 패러데이의 전자기 유도 법칙에 의하면 전류, 또는 전기장의 변화는 유도 자기장을 형성한다. 한편, 자기장의 변화는 유도 전류 또는 전기장을 형성한다. 전기장과 자기장의 상호 작용에 의해 공간상에 형성되는 전기장을 시변 전자계라 부른다. 물리적으로 시변 전자계는

$$\nabla \times \mathbf{V} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

와 같이 표현되며, 이때 \mathbf{V} 는 전위를, \mathbf{B} 는 자기장의 벡터를 의미한다.

시변 전자계의 가장 대표적인 예는 전자기파이다. 전자기파는 서로 수직 방향으로 형성된 전기장과 자기장의 상호작용에 의해 발생한다.

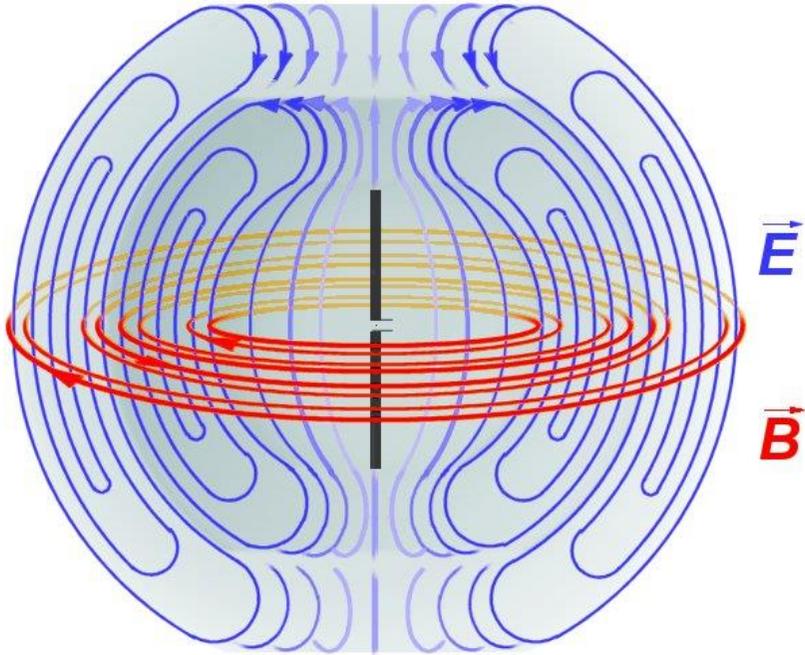


그림 2.2 다이폴 안테나에 의해 형성되는 시변 전자계 [30]

그림 2.2와 같이 다이폴 안테나에 흐르는 교류 전류는 유도 자기장을 발생시키는데, 이 유도 자기장의 크기와 방향은 교류 전류의 크기와 방향에 따라 변화한다. 변화하는 자기장은 다시 전기장을 유도하므로, 공간상에 유도 전기장이 형성되게 된다. 두 가지 장은 서로 수직 방향으로 형성되며, 이들의 상호 작용에 의해 다이폴 안테나의 수직 방향으로 전자기파가 발생한다.

2.3 전기장 측정 장치의 원리 및 구조

앞서 설명한 것과 같이 공간상에 형성된 전기장은 어떤 물리적 현상으로 나타나게 된다. 이러한 물리적 현상을 관측하거나 이용하여 전기장 측정 장치를 구현할 수 있다. 전기장에 의해 발생하는 물리적인 현상을 살펴보면, 먼저 1) 전하를 띤 물체에 대해 전기력이 작

용하며, 2) 공간 내에 전기적인 위치 에너지의 차이를 발생시키며 3) 물질 내부의 전자를 이동시키거나 혹은 분자 구조의 변화를 일으킨다. 전기장 측정 장치는 이러한 물리적 현상들을 이용하여 전기장을 측정하는데, 측정 시 사용되는 원리 및 측정 장치의 구조에 따라 기계식 전위계, 정전식 측정 장치, 안테나 등으로 구현된다. 이 절에서는 전기장 측정 장치들의 원리 및 구조에 대해 자세히 살펴본다.

2.3.1 기계식 전위계

전위계(Electrometer)는 충전된 물체 사이의 정전기력에 의하여 전위 또는 전위차를 재는 기구로서, 2.2절에서 설명한 첫 번째 물리적 현상인 전하를 띤 물체 간 작용하는 전기력을 이용한다. 기계식 전위계는 전기력을 기계 장치를 이용하는 장치 구현이 비교적 간단하므로 아주 오래 전부터 다양한 형태로 구현되어왔다.

고전 물리학에서 주로 등장하는 기계식 전위계는 비틀림 저울(Torsion balance)이라고도 불리는 쿨롱(Coulomb)의 전위계이다 [23]. 쿨롱의 전위계는 원통 형태로 생겼는데, 내부에는 전하를 띤 쇠구슬이 달린 막대가 줄에 묶여 장치의 머리 부분에 연결된다. 이 전위계 내에 전하를 띤 다른 물체를 위치시키면 전기력에 의해 두 물체는 서로 가까워지거나 멀어지게 되는데, 이 이동량을 측정할 수 있도록 외부에 눈금이 부착된다. 줄에 연결된 쇠구슬이 전기력을 받아 움직이기 시작하면 줄의 비틀림이 점점 커지게 되는데, 비틀림이 커질수록 줄의 복원력 역시 커지게 된다. 이 두 힘이 등가를 이루는 어떤 지점에서 쇠구슬의 이동은 멈추게 되며 이 때의 이동량을 통해 쇠구슬에 미치는 힘의 크기를 계산할 수 있다.

현재의 기계식 전위계에서는 전기력의 크기를 측정하는 데에 뒤에 설명할 정전식 센서에서 사용하는 커패시턴스의 변화를 이용한다. 예

를 들어, 최근까지 사용되는 기계식 전위계인 진동 리드 전위계 (Vibrating reed electrometer) [23]는 고정된 하나의 전극과 움직일 수 있는 자유 전극으로 구성되며, 전기장 내에서 진동하는 자유전극에 의한 두 전극간 커패시턴스 변화를 측정하여 전기장의 크기를 계산한다.

기계식 전위계는 원리가 간단하며 구현이 쉬운 장점이 있지만 움직이는 기계장치가 가진 잡음 통제의 어려움으로 인해 현재는 자주 사용되지 않는다.

2.3.2 정전식 측정 장치 (Capacitive Sensor)

정전식 측정 장치는 두 개의 전극, 또는 물체 사이의 전위차에 의해 발생하는 정전 용량(Capacitance)의 변화를 이용하여 전기장을 측정한다[17]. 두 개의 전극 사이의 정전 용량은

$$C = \epsilon \frac{A}{d}$$

로 정의된다. 즉, 정전 용량은 전극의 넓이(A)와 전극 사이 매질의 유전율(ϵ)에 비례하며 전극 사이의 거리에 반비례한다. 만약 두 개의 전극 중 하나가 움직일 수 있는 전극이라면, 이 전극에 방사되는 전기장에 의해 전극의 움직임이 발생하게 되며, 이에 따라 전극 사이의 거리가 변할 것이며, 따라서 정전 용량이 변화할 것이다. 이 정전용량의 변화를 통해 전기장의 크기를 감지하는 것이 정전식 측정 장치의 원리이다.

일반적으로 정전식 측정 장치는 가까운 거리에서의 전기장 변화를 감지하는데 주로 사용된다. 대표적으로 동작 인식[10], 지문인식장치[16], 습도 감지 및 접촉 센서 등으로 사용된다.

2.3.3 안테나

안테나(Antenna)는 페러데이의 전자기 유도 법칙에 의해 도체에 흐르는 유도 전류를 이용하여 전기장을 측정한다[19]. 전자기 유도 법칙은 시간에 따라 변화하는 전기장 내에서 자기장이 발생하거나 또는 그 역이 가능하다는 법칙으로, 안테나에서는 안테나에 흐르는 교류 전류에 의해 공간상에 자기장이 형성되며, 이 자기장에 의해 다시 공간상에 전기장이 형성되는 형태로 나타난다. 이를 시변 전자계라 부르며, 이와 같은 방법으로 안테나가 송신기 역할을 할 수 있다. 반대로, 시변 전자계 내에 안테나가 위치하는 경우, 안테나에 시변 전자계의 전기장 및 자기장의 영향으로 유도 전류가 흐르게 된다. 이 같은 경우 안테나는 수신기의 역할을 하게 된다[8].

한편, 안테나는 그 형상에 따라 특정 주파수에서 좋은 감도를 지니게 되는데, 이를 공명 주파수라 부른다. 일반적으로 널리 쓰이는 다이폴 안테나(Dipole antenna)의 경우, 안테나 길이의 두 배의 파장을 가진 주파수가 공명 주파수가 된다[19]. 반대로, 공명 주파수가 아닌 주파수 대역에서 안테나의 감도는 상당히 낮아지므로 일반적으로 안테나는 그 형상에 의해 측정 가능한 주파수 대역이 결정된다. 또한 안테나는 그 특성상 시변 전자계만 측정 가능하며 정전기장에 대한 측정은 불가능하다는 제약이 존재한다.

2.3.4 기존 전기장 측정 장치의 한계

이와 같은 물리적 현상을 이용한 전기장 측정장치들이 각 분야에서 사용되고 있지만 이들은 다음과 같은 공통적인 한계점을 지니고 있다.

위의 전기장 측정 장치들은 측정 장치의 종류 및 물리적 특성에 따라 측정하고자 하는 대상 전기장이 한정되는 한계가 있다. 예를 들

면, 안테나의 경우는 전자기장의 변화에 따른 유도 전류를 이용하여 전기장의 크기를 측정하므로 전기장의 크기가 변화하는 시변 전자계만을 측정할 수 있으며, 측정하고자 하는 주파수 대역 역시 안테나의 종류와 길이에 의해 결정되는 특성이 있다. 하지만 전기장의 영향은 정전기장과 시변 전자계를 구분하지 않고 중첩될 수 있으므로 이와 같은 모든 종류의 전기장을 종합적으로 측정하는 기술 및 장치가 필요한데, 기존 장치로 이러한 기능을 구현하는 것은 상당히 어렵다.

또한, 위의 전기장 측정 장치들은 전기장의 방향과 세기를 동시에 측정하기 힘든 단점이 존재한다. 기계식 전위계의 경우 일반적으로 전기장의 영향을 받는 기계 장치는 구동축을 중심으로 움직이므로 해당 구동축을 중심으로 한 단방향의 전기장만을 측정할 수 있다. 안테나 역시 전기장의 위상과 안테나의 위상이 일치해야 하므로 정확한 전기장의 세기와 방향 측정을 위해서는 수회 반복하여 측정하여야 하는 불편함이 있다.

2.4 반도체 기반 전기장 측정 장치 관련 연구

반도체를 이용한 측정 장치 역시 위에 언급한 전기장 측정장치들이 사용하는 측정 원리를 사용한다. 이중 일부를 살펴보면, 그림 2.3의 A. N. Cleland와 M. L. Roukes가 제안한 나노미터 스케일 기계식 전위계 (Nanometre-Scale Mechanical Electrometer) [9]의 경우 반도체상에 미세전자기계시스템(Micro Electromechanical System; MEMS) 기술을 이용하여 구현되었다. 이 장치는 일반적인 기계식 전위계처럼 전기장에 의해 기계적 운동을 일으키는 감지 전극(Detection Electrode)과 게이트 전극(Gate Electrode)으로 구성되며, 정전식 측정 장치에서와 유사하게 감지 전극의 운동에 따라 변화하는 정전 용량을 게이트 전극에서 측정하는 방식으로 동작한다.

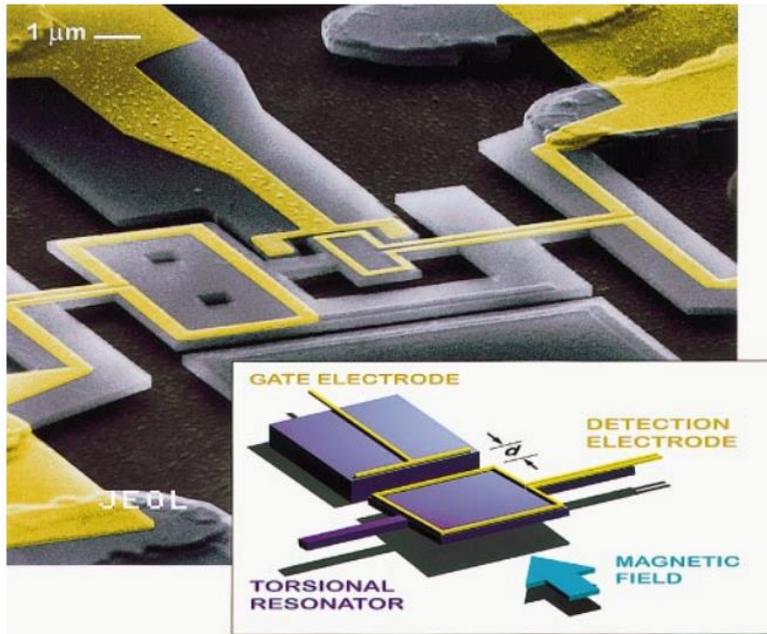


그림 2.3 나노미터 스케일 기계식 전위계

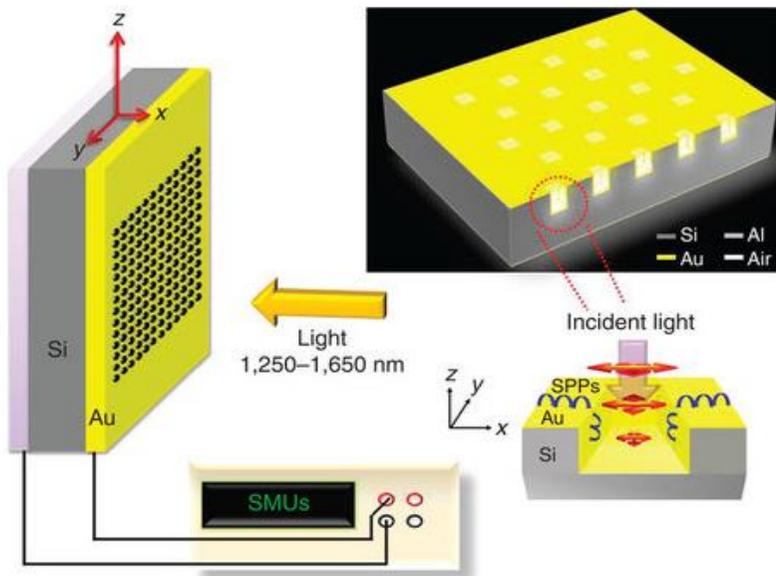
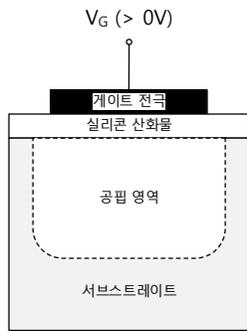


그림 2.4 실리콘 기반 나노 안테나 배열

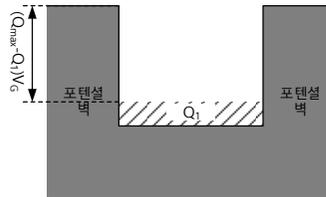
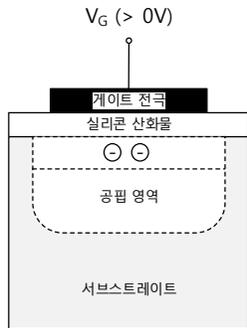
한편, K. T. Lin 등은 실리콘 표면에 안테나를 복수 배치하여 테라헤르쯔 영역의 주파수를 광대역으로 측정하는 장치[24]를 구현하였다. 이 장치는 실리콘 표면에 깊은 홈을 여러 개 형성하고 그 위에 백금을 증착함으로써 일종의 혼 안테나(Horn Antenna)를 배열한 형태를 지니고 있다. 이 장치는 단순히 안테나에 흐르는 유도 전류만을 이용하는 것이 아닌, 이 유도 전류를 일종의 자유 전자처럼 이용하고 이 전자를 광 다이오드(Photodiode)로 읽어내는 방식을 취하고 있다.

또한 정전식 측정 장치와 유사하게 두 개의 전극간 발생하는 전위차를 MOSFET 트랜지스터의 게이트 전극에 인가하여 전기장의 크기를 측정하는 장치인 DeFET[11][13], MEMS 공정을 이용하여 실리콘 내부에 코일을 삽입하고 이를 이용하여 전기장 및 자기장을 측정하는 측정 장치[6] 등이 제안되었다.

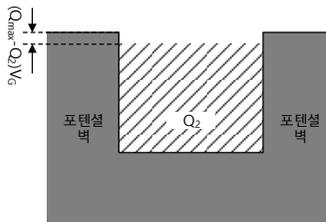
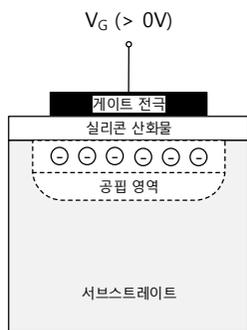
이러한 반도체 기반 전기장 측정 장치들이 가지는 문제점은 해당 장치를 구현하기 위해 일반적인 반도체 공정보다 복잡한 공정이 필요하다는 것이며, 이에 따라 장치의 생산 능력 저하 및 단가 상승이 야기될 수 있다는 점이다. 따라서 본 연구에서는 일반적인 반도체 공정을 통해 제작 가능한 형태에 집중하게 되었고 그 결과 MOS 커패시터의 동작 원리를 이용하여 전기장을 측정하는 방법을 제안하게 되었다.



(a)



(b)



(c)

그림 2.5 MOS 커패시터의 구조와 작동 원리

2.5 MOS 커패시터의 원리 및 기능

MOS 커패시터는 MOS 커패시터의 구조를 나타내는 Metal-Oxide-Semiconductor의 약어로부터 유래하였다. MOS 커패시터는 반도체 물질로 구성된 서브스트레이트와, 서브스트레이트 위에 증착된 산화물 절연체 및 금속 물질의 전극으로 이루어진다[25].

일반적으로 MOS 커패시터는 단독으로 사용되기 보다는 다른 구성품들과의 조합으로 이용된다[26]. 일반적으로 가장 많이 사용되는 형태는 MOSFET 트랜지스터이다. MOSFET 트랜지스터는 하나의 MOS 커패시터와 그 양 쪽에 위치하는 두 개의 PN 접합으로 구성되며, MOS 커패시터의 게이트에 인가되는 전압의 크기에 따라 양단의 PN 접합 사이에 전류를 흐르게 하는 역할을 한다. 또한 이미지 센서로 널리 사용되는 전하결합소자(Charge-Coupled Device; CCD)에서 MOS 커패시터는 서브스트레이트가 빛에 노출됨에 따라 생성되는 전자-정공 쌍(Electron-Hole Pair)의 전자를 수집하는 역할과 함께 수집된 전자를 출력 회로로 이동시키는 역할을 한다[2].

그림 2.5를 참고하여 MOS 커패시터의 동작 원리를 설명하면, MOS 커패시터는 게이트에 인가되는 전압을 이용하여 산화물 절연체 아래의 서브스트레이트 영역에 전하를 저장한다. 저장되는 전하의 종류는 게이트에 인가되는 전압의 극성 및 서브스트레이트를 구성하는 반도체 물질의 종류에 따라 달라진다. 만약 정공을 주 캐리어로 사용하는 P형 반도체를 서브스트레이트로 이용하는 MOS 커패시터에 그림 2.5 (a)와 같이 양(+)의 전압이 인가되면 서브스트레이트상의 정공은 게이트 전극으로부터 반대편으로 이동한다. 또한, 이상적인 P형 반도체 내에는 자유전자가 존재하지 않으므로 양(+)의 전압에 의해 끌려오는 전자는 존재하지 않을 것이다. 따라서, 게이트 전극 주

변과 인접한 서브스트레이트 영역에는 정공과 전자가 존재하지 않는 공핍 영역(depletion region)이 형성된다.

한편, MOS 커패시터에 인가된 게이트 전압은 서브스트레이트 표면의 전기적 위치에너지 분포를 변화시킨다. 여기서 위치에너지란 임의의 물체를 끌어당기는 힘에 대한 상대적인 위치를 말하며, 끌어당기는 힘이 강할수록 위치에너지는 낮아진다. MOS 커패시터에서 전자를 끌어당기는 힘은 게이트 전압에 의한 전기력이며, 게이트 전압이 높아질수록 전기력은 커지게 된다. 따라서 게이트 전압이 높아질수록 전기적 위치에너지는 낮아지는데, 다른 서브스트레이트 영역의 위치에너지 관점에서 볼 때, MOS 커패시터의 게이트 전압에 의해 전기적 위치에너지가 낮아진 서브스트레이트 영역은 일종의 웅덩이와 같은 형태를 갖게 된다. 이와 같이, 다른 영역에 비해 상대적으로 낮은 위치 에너지를 지닌 영역을 포텐셜 우물(potential well)이라고 한다.

일반적으로 높은 에너지 상태에 있는 물체 또는 물질은 낮은 에너지 상태로 이동하려는 성질이 있다. 마찬가지로, 높은 에너지 상태에 있는 포텐셜 우물 밖의 전자는 낮은 에너지 상태인 포텐셜 우물 안으로 이동하려고 할 것이고, 반대로 낮은 에너지 상태인 포텐셜 우물 안의 전자는 포텐셜 우물 밖의 에너지 상태가 되기 위한 여분의 에너지를 얻지 못하는 한, 포텐셜 우물 밖으로 이동할 수 없다.

한편, 포텐셜 우물은 주위의 높은 위치에너지를 가진 영역으로 둘러 쌓여있다고 볼 수 있으며, 이를 개념적으로 포텐셜 벽(potential wall)이라 할 수 있다. 이 때, 포텐셜 벽의 높이는 포텐셜 우물의 깊이와 동일하며, 포텐셜 우물의 위치에너지와 포텐셜 우물 밖의 위치에너지의 차이와 같다. 따라서 낮은 에너지 상태인 포텐셜 우물 안의 전자가 포텐셜 우물 밖으로 이동하기 위해서 가져야 하는 에너지의 크기는 포텐셜 벽(potential wall)의 높이와 같다.

그림 2.5 (a)에서와 같이 양(+)의 게이트 전압 V_G 를 통해 MOS 커패시터에 저장할 수 있는 최대 전하량은 $Q_{\max} = C_{OX}V_G$ (C_{OX} : MOS 커패시터의 커패시턴스)로 나타낼 수 있으며, 이 때 저장된 전하가 가지는 에너지는 $E_{\max} = Q_{\max}V_G$ 와 같다. 따라서 포텐셜 우물의 깊이는 $W_{\text{well}} = Q_{\max}V_G$ 이라 할 수 있다. 한편, 그림 2.5 (a)에서는 MOS 커패시터 내 저장된 자유전자는 존재하지 않으므로 포텐셜 우물은 비어있는 상태가 된다. 이 때의 포텐셜 벽의 높이는 포텐셜 우물의 깊이 동일한 $h_{\text{wall}} = Q_{\max}V_G$ 이다. 이와 같은 상태에서, 만약 서브스트레이트 영역에 자유전자가 존재할 경우 게이트 전압에 의해 형성된 빈 포텐셜 우물에 쉽게 저장될 수 있다.

한편, 그림 2.5 (b)와 같이 공핍 영역에 자유 전자가 유입되는 경우, 이 전자들은 양(+)의 게이트 전압에 의해 서브스트레이트 표면에 끌려온다. 이 때, 게이트 전극 아래의 서브스트레이트 영역은 정공에 의한 양전하를 띠는 다른 서브스트레이트 영역과 달리 전자에 의한 음전하를 띠게 되며, 따라서 이러한 영역을 반전층(inversion layer)이라 부른다. 형성된 반전층에 모인 음전하가 게이트 전압을 상쇄하므로 공핍 영역의 깊이는 반전층이 존재하기 전인 그림 2.5 (a)에서 공핍 영역의 깊이보다 얇아진다.

그림 2.5 (b)에서 반전층을 형성한 전하량을 Q_1 이라고 하면, 포텐셜 벽의 높이는 반전층의 전하량에 의한 에너지 Q_1V_G 만큼 낮아진 $h_{\text{wall}} = (Q_{\max} - Q_1)V_G$ 가 된다. 따라서 포텐셜 우물에 저장된 전자(311)가 h_{wall} 보다 더 큰 에너지를 얻게 되면 포텐셜 벽을 넘어 포텐셜 우물로부터 유출될 수 있다. 예를 들어, 그림 2.5 (b)의 MOS 커패시터에 E 의 크기를 가진 전기장이 인가되면, 전기장에 의한 전기력의 작용에 의해 MOS 커패시터에 저장된 전자의 운동 에너지가 증가한다. 이와 같이 MOS 커패시터에 저장된 운동 에너지의 크기가

포텐셜 벽의 높이인 $(Q_{max} - Q_1)V_G$ 이상으로 증가하는 경우, MOS 커패시터에 저장된 전자의 일부가 포텐셜 우물 밖으로 유출될 수 있다.

그림 2.5 (c)는 그림 2.5 (b)와 같이 형성된 얇은 반전층에 더 많은 자유 전자의 유입에 따른 깊은 반전층의 형성과 이에 따른 공핍 영역의 변화를 설명하기 위한 도면이다. 그림 2.5 (c)에서 공핍 영역 내에 형성된 반전층은 그림 2.5 (b)에서 형성된 반전층보다 더 많은 전자가 모여 있으므로 더 큰 음전하를 띄게 된다. 더 큰 음전하는 더 큰 게이트 전압의 상쇄를 일으키므로, 공핍 영역의 깊이는 이전보다 더욱 얇아진다. 한편, 이 상태를 포텐셜 우물에 다수의 전하 Q_2 가 유입된 상태로 표현할 수 있다. MOS 커패시터의 전하량 Q_2 가 최대 전하량 Q_{max} 에 가까워지면 포텐셜 벽의 높이는 현저히 낮아지며, MOS 커패시터에 저장된 전하를 속박하는 힘은 매우 약해진다. 따라서, 얇은 깊이의 포텐셜 우물에 저장된 전하는 약한 힘만으로도 쉽게 유출될 수 있다.

이와 같이, MOS 커패시터에 인가되는 게이트 전압에 의한 공핍 영역의 형성과 유입되는 전자에 의한 반전층 형성, MOS 커패시터의 전하량에 따른 전자의 유입/유출 민감도 변화와 같은 특성들은 포텐셜 우물이라는 물리적 개념을 통해 설명 가능하다. MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정장치는 이러한 특성들을 이용, 서브스트레이트 표면에 적절하게 형성된 포텐셜 우물의 배치와 전하량을 조절함으로써 전기장 측정장치에 방사되는 전기장의 세기와 방향을 측정할 수 있다

제 3 장 전기장 측정 장치의 설계

본 장에서는 MOS 커패시터를 이용하여 전기장 측정 장치를 설계하고 이를 구현하는 방법을 설명한다.

MOS 커패시터는 반도체 물질로 구성된 서브스트레이트 표면의 전자기 위치에너지를 변화시킬 수 있다. 이는 3장에서 설명한 전기장 측정을 위한 전위를 형성하는데 적합한 기능이다. 평면상에 배치된 MOS 커패시터는 2차원상에서 전위를 변화시킬 수 있다. 또한 MOS 커패시터는 수직 기둥 형태로 배치될 수도 있다. 예를 들면 수직 게이트 낸드 플래시 메모리 (Vertical-Gate NAND Flash Memory)에서 사용하는 마카로니 바디 필드 이펙트 트랜지스터 (Macaroni-Body Field Effect Transistor) [15]와 같은 형태로 수직 방향으로 배치되도록 구현할 수 있으며, 기둥 형태로 형성된 MOS 커패시터의 배열을 평면 서브스트레이트상에 결합시켜 3차원의 전기장 측정이 가능하도록 구성될 수 있다.

MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정 장치는 MOS 커패시터에 저장된 전하량의 변화만을 이용해 전기장의 세기 및 방향을 측정하기 때문에 전기장의 형태에 상관없이 전기장의 종합적인 영향을 측정할 수 있다. 예를 들어, 전기장 측정 장치는 정전하(static charge)에 의한 정전기장(static electric field)과 전자기파에 의해 형성되는 시변전자계 (time varying electro-magnetic field)에 의한 전자의 유입/유출 효과를 모두 측정할 수 있다. 특히 시변전자계의 경우에 있어서, 안테나의 물리적 특성에 의해 측정 가능한 주파수 대역이 결정되는 일반적인 전기장 측정 장치와는 달리, 모든 주파수 대역에서 발생하는 전기장의 분포를 MOS 커패시터의 전하량 변화만으로 판단할 수 있다.

또한, MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정 장치는 작고 저렴하게 구성될 수 있다. MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정의 최저단위는 단 몇 개의 MOS 커패시터와 PN 접합을 포함하므로 매우 작게 구성할 수 있는 한편, 매우 저렴하게 제작할 수 있다.

한편, 전기장 측정 장치는 전기장에 반응하는 MOS 커패시터의 배열뿐만 아니라 이를 제어하기 위한 제어부를 함께 필요로 한다. 따라서 본 장에서는 MOS 커패시터의 배열을 이용한 측정부 및 이를 제어하기 위한 제어부의 구성을 함께 제시할 것이다.

3.1 구성 요소 및 기능

MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정 장치는 전기장에 노출되어 저장된 정보가 변경되는 측정부와 측정부가 전기장에 반응할 수 있도록 측정부를 제어하는 역할을 하는 제어부로 구성된다. 측정부는 하나 이상의 MOS 커패시터로 구성되며, 제어부로부터 입력된 신호에 따라 이들 MOS 커패시터에 정보를 저장하는 입력 회로 및 저장된 정보를 외부로 출력하는 출력 회로를 포함한다.

제어부는 전기장에 의해 측정부에 저장된 정보가 변경되도록 측정부를 제어하는 한편, 측정부에 저장된 초기화 정보의 전송 및 측정 결과의 출력을 위해 입출력 회로를 제어하는 역할을 수행한다. 또한,

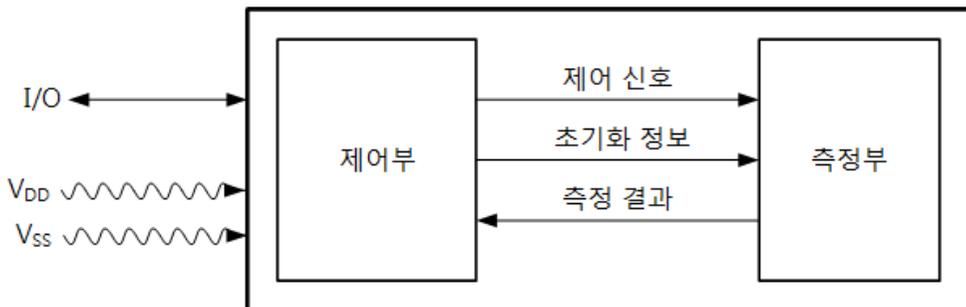


그림 3.1 기본 구성

제어부는 외부로부터 입력되는 I/O 신호를 이용하여 측정부에 전송될 제어 신호 및 초기화 정보를 생성할 수 있으며, 측정부로부터 출력된 측정 결과를 I/O 신호를 통해 외부로 출력할 수 있다.

3.2 측정부 설계

MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정 장치의 측정부는 MOS 커패시터의 배치 형태에 따라 전기장의 세기를 측정하거나, 1차원 혹은 2차원에서 전기장의 세기와 방향을 측정할 수 있다. 여기서 MOS 커패시터는 서브스트레이트 표면의 전기적 위치 에너지 제어 및 전하의 저장이라는 역할을 수행하는 도구이므로, 우선적으로 측정부 내에 구현하여야 하는 전기적 위치에너지와 전하의 분포를 포텐셜 우물의 배치 형태를 통해 먼저 설명하는 한편, 이를 구현하기 위한 MOS 커패시터의 배치를 이어서 설명한다.

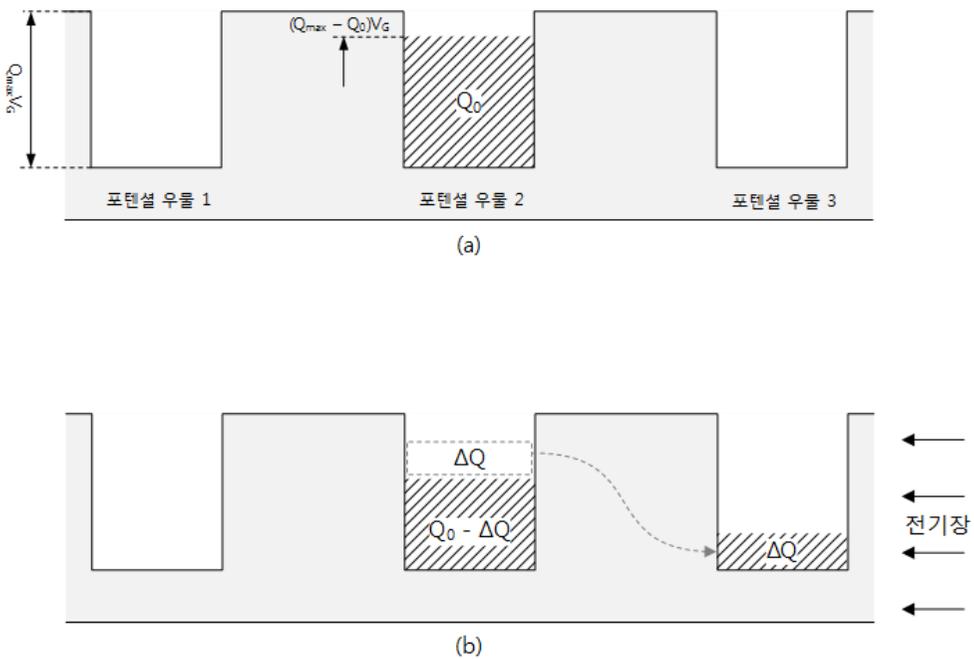


그림 3.2 1차원상의 전기장 측정 원리

3.2.1 1 차원상의 전기장 측정 방법

그림 3.2를 통해 1차원상에서 전기장의 세기와 방향을 측정하기 위한 포텐셜 우물의 배치를 설명하면, MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정 장치의 측정부는 일렬로 배치한 포텐셜 우물과 여기에 주입되는 전하를 이용하여 1차원상의 전기장의 세기와 방향을 측정할 수 있다. 예를 들어, MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정 장치의 측정부는 그림 3.2 (a)와 같이 세 개의 포텐셜 우물로 구성될 수 있다. 각각의 포텐셜 우물은 게이트 전압 V_0 에 의해 형성됨을 가정하면, 포텐셜 우물의 깊이는 $Q_{max}V_0$ 로 모두 동일하다. 측정부 중앙에 위치한 포텐셜 우물 2에 초기화 전하량인 Q_0 이 입력 회로를 통해 입력됨을 가정하면, 포텐셜 우물 2에서 포텐셜 벽의 높이는 $(Q_{max} - Q_0)V_0$ 가 된다.

한편, 포텐셜 우물 2를 중심으로 서로 대칭되는 위치에 포텐셜 우물 1과 포텐셜 우물 3이 배치된다. 이 때, 그림 3.2 (b)와 같이 측정부에 인가되는 전기장이 $(Q_{max} - Q_0)V_0$ 이상의 에너지를 공급하는 경우, 포텐셜 우물 2에 저장된 전자는 포텐셜 우물 2로부터 유출되어 전기장의 반대 방향으로 이동하게 되며, 이들 전체 또는 일부는 낮은 전기적 위치에너지를 지닌 포텐셜 우물 3에 저장될 수 있다. 이 때, 유출된 전하량을 ΔQ 라고 하면, 전기장에 노출된 후 포텐셜 우물 2의 전하량은 $Q_0 - \Delta Q$ 가 되며, 유출된 전하가 모두 포텐셜 우물 3에 유입됨을 가정하면 포텐셜 우물 3의 전하량은 ΔQ 가 된다. 이 때, ΔQ 의 크기는 전기장에 의해 전달된 에너지의 크기에 비례하므로 전기장의 세기는 ΔQ 로부터 계산해낼 수 있다. 또한 유출된 전하의 이동 방향은 전기장의 반대 방향이므로, 전기장의 방향은 포텐셜 우물 2로부터 포텐셜 우물 3의 반대 방향인 $-x$ 방향이 된다.

한편, 전기장 측정 장치가 매우 강한 전기장에 노출될 경우, 포텐셜 우물 2로부터 유출되어 포텐셜 우물 1 또는 포텐셜 우물 3에 유입된 전자가 동일한 원리로 포텐셜 우물 1 또는 포텐셜 우물 3으로부터 다시 유출될 수 있으며, 이로 인해 정확한 전기장의 세기와 방향의 측정이 어려울 수 있다. 그림 3.3를 참고하면, 이와 같은 유입된 전자의 재유출 현상을 막기 위해 그림 3.3 (a)와 같이 그림 3.2에서 설명한 포텐셜 우물의 배치에 추가로 하나 이상의 빈 포텐셜 우물을 그림 3.3 (a)와 같이 좌우 양쪽에 배치하여 중앙의 포텐셜 우물 주위의 빈 포텐셜 우물에 유입된 전자가 다시 유출될 때 이를 외곽의 포텐셜 우물이 다시 유입할 수 있도록 측정부를 구성할 수 있다.

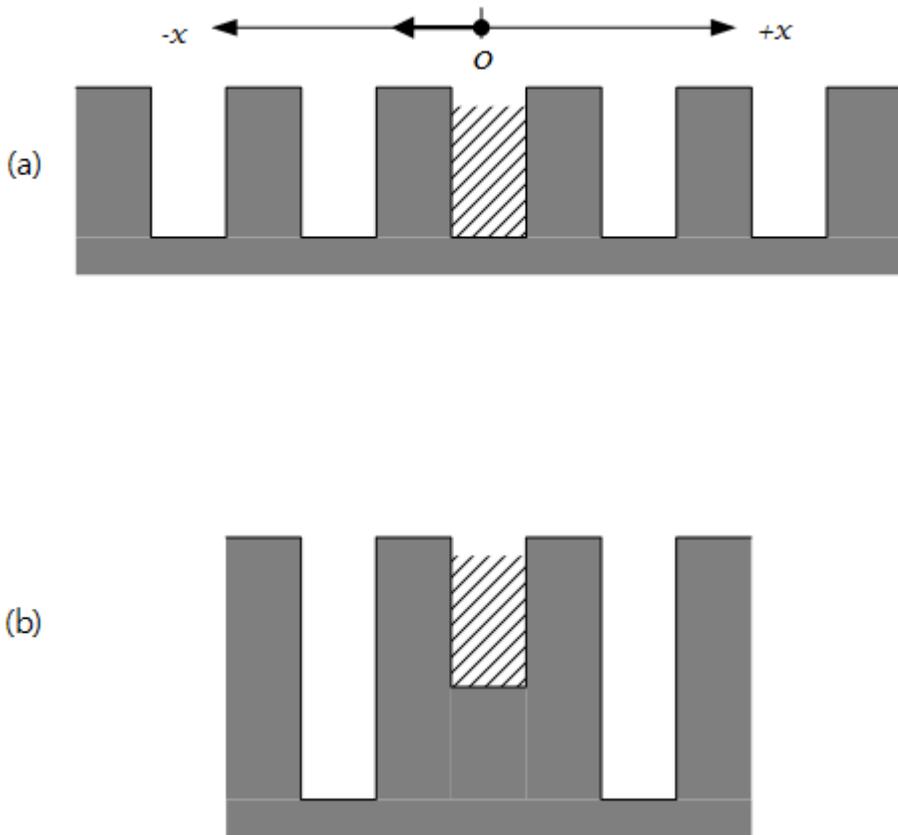
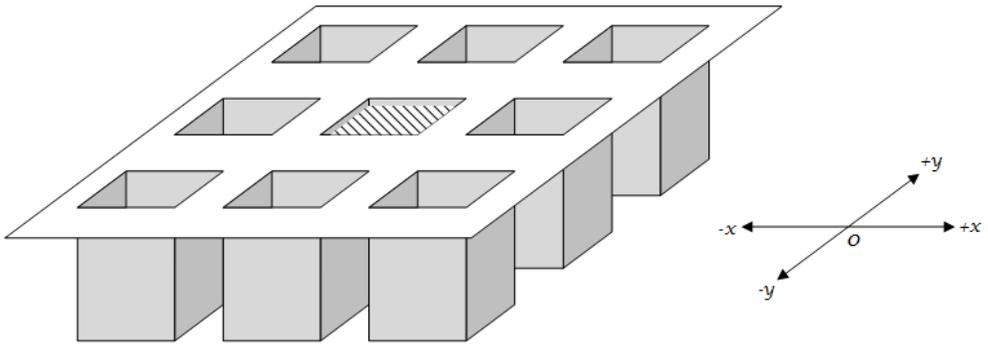
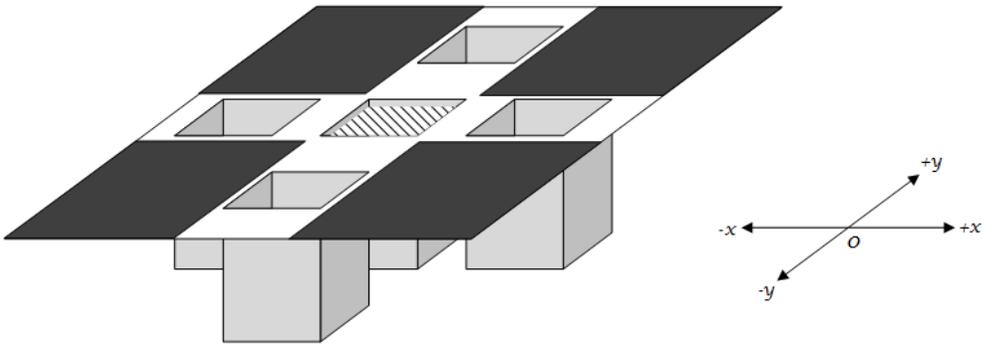


그림 3.3 1차원상의 전기장을 측정 방법의 변형

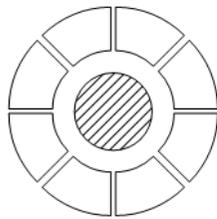
보다 근본적으로, 빈 포텐셜 우물에 유입된 전자의 재유출 현상은 빈 포텐셜 우물의 전자를 속박하는 힘이 유입된 전자를 속박하기에 충분히 강하지 못하기 때문에 발생한다. 따라서, 그림 3.3 (b)와 같이 빈 포텐셜 우물의 깊이를 더 깊게 설정함으로써 더욱 강하게 전자를 속박할 수 있다. 이 경우, 중앙의 포텐셜 우물에 저장된 모든 전하가 빈 포텐셜 우물에 옮겨간다 하더라도 여전히 전자의 이동을 막을 수준의 포텐셜 벽의 높이를 보장할 수 있다. 이와 같은 서로 다른 깊이의 포텐셜 우물의 형성은 측정부를 구성하는 각각의 MOS 커패시터에 인가되는 게이트 전압을 서로 다르게 조절함으로써 쉽게 구현할 수 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 3.4 2차원상의 전기장 측정 원리

3.2.2 2차원상의 전기장 측정 방법

그림 3.4는 전기장의 세기와 방향을 2차원상에서 측정하기 위한 포텐셜 우물의 배치를 설명하기 위한 그림이다. MOS 커패시터를 이용한 전기장의 세기와 방향을 2차원상에서 측정하기 위한 전기장 측정 장치는 그림 3.2를 통해 서술한 1차원상에서 전기장의 세기와 방향을 측정하기 위한 포텐셜 우물의 배치를 병렬로 배열하는 방법으로 설계될 수 있다.

그림 3.4 (a)를 참조하면, MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정 장치의 측정부 내에 9개의 포텐셜 우물이 3열로 배치된다. 중앙의 포텐셜 우물에는 전기장에 대한 민감도를 고려하여 적절한 전하량을 갖도록 초기 전하가 입력된다. 또한, 중앙의 포텐셜 우물을 둘러싼 주변의 포텐셜 우물들은 1차원상의 전기장의 세기와 방향을 측정하는 포텐셜 우물의 배치 방법에서와 동일하게 중앙의 포텐셜 우물로부터 유출되는 전자가 유입되도록 비어있는 상태로 설정된다.

MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정 장치는 중앙의 포텐셜 우물로부터 주변의 포텐셜 우물들의 상대적인 위치 및, 전기장에 노출된 후 각 포텐셜 우물의 전하량 변화를 이용하여 2차원상의 전기장의 세기 및 방향을 측정한다. 2차원상의 전기장의 세기와 방향을 측정하는 전기장 측정장치에서 중앙의 포텐셜 우물로부터 주변 포텐셜 우물들의 상대적인 위치는 직교 좌표계상의 방향 벡터로 표현될 수 있으며, 주변 포텐셜 우물들에 유입된 전하량은 벡터의 크기로 표현될 수 있다. 이를 이용하면, 각 포텐셜 우물들의 방향에 대한 전기장의 세기를 직교 좌표계 상의 벡터로 표현할 수 있으며, 이들 벡터들을 종합하면 전기장의 세기와 방향을 나타내는 하나의 벡터를 얻을 수 있다.

한편, 2차원상에서 이동하는 전자는 1차원상에서 이동하는 경우와 달리 정확히 다른 포텐셜 우물의 방향으로 이동하지 않을 수 있다. 예를 들면, 평면상에 배치된 포텐셜 우물들은 서로 포텐셜 벽으로 분리되어 있는데, 이 때 포텐셜 벽의 높이 이상의 에너지를 얻은 전자는 임의의 포텐셜 우물에 유입되지 않고 포텐셜 우물들 사이의 포텐셜 벽을 따라 이동할 수 있다. 결과적으로 그림 3.4 (a)의 중앙의 포텐셜 우물로부터 유출된 전자는 어떤 빈 포텐셜 우물들에도 유입되지 않을 수 있으며, 이는 전기장의 방향 측정에 대한 오차 요인으로 작용할 수 있다.

이와 같은 전기장의 방향 측정 오류를 막기 위해 그림 3.4 (b)와 같이 서브스트레이트 표면에서 전자의 이동 경로를 제한하는 구조가 추가될 수 있다. 그림 3.4 (b)를 참조하면, 중앙의 포텐셜 우물 주변으로 배치된 4개의 빈 포텐셜 우물을 이용하여 2차원상의 전기장의 세기와 방향을 측정할 수 있다. 빈 포텐셜 우물은 각각 직교 좌표계의 XY축상에 서로 대칭되는 방향으로 배치된다. 이 때, 중앙의 포텐셜 우물로부터 유출된 전자가 XY 좌표축을 따라 이동할 수 있도록 전자의 이동을 제한하는 물질이 서브스트레이트 표면에 삽입된다. 삽입되는 물질은 물리적으로 전자의 이동을 차단하는 실리콘 산화물과 같은 절연체이거나, 또는 다른 서브스트레이트 영역보다 전기적 위치 에너지를 높이기 위해 다수의 정공이 주입된 P+ 또는 더 적은 전자가 주입된 n-형 반도체 물질일 수 있다.

한편, 그림 3.4 (a)의 포텐셜 우물 배치는 XY 좌표축상에 배치된 포텐셜 우물과 대각선상으로 배치된 포텐셜 우물 사이의 거리 불균등으로 인한 전자의 유입 특성의 불균형을 야기할 수 있다. 다시 말해, 중앙의 포텐셜 우물로부터 대각선상에 배치된 포텐셜 우물까지의 거리는 같은 중앙의 포텐셜 우물로부터 XY 좌표축상에 배치된 포텐

설 우물까지의 거리에 비해 멀기 때문에, 만약 전기장에 노출되는 시간이 매우 짧게 요구되는 경우, 대각선상에 배치된 포텐셜 우물이 중앙의 포텐셜 우물로부터 유출된 전하를 유입할 수 있는 확률은 XY 좌표축상에 배치된 포텐셜 우물이 전하를 유입하는 확률에 비해 낮게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 그림 3.4 (c)와 같이 중앙의 포텐셜 우물 주변의 포텐셜 우물을 동심원 형태로 배치할 수 있다. 이 때, 중앙의 포텐셜 우물로부터 유출된 전자가 주변의 포텐셜 우물에 유입되지 않고 포텐셜 벽을 따라 이동하는 확률을 줄이기 위해 그림 3.4 (a)나 그림 3.4 (b)에서 제시한 포텐셜 우물의 배치에 비해 더 많은 포텐셜 우물을 더욱 조밀하게 배치하도록 설계할 수 있다. 이러한 구조는 단지 기존의 사각형 형태의 게이트 전극 대신 원형 또는 다각형 형태의 게이트 전극을 사용함으로써 구현할 수 있다.

한편, 2차원상의 전기장 측정 결과는 각 포텐셜 우물에서 전하량의 증감을 중앙의 포텐셜 우물로부터 각 포텐셜 우물 방향으로의 벡터 크기로 환산하여 계산될 수 있다. 그림 3.5를 참고하여 이를 설명하면, 그림 3.5 (a)와 같이 배치된 포텐셜 우물은 그림 3.5 (b)와 같이 직교 좌표계 상의 좌표로 표현될 수 있다. 전기장에 노출되기 전 각각의 포텐셜 우물에 전하를 주입하는데, 예를 들면 그림 3.5(c)와 같이 포텐셜 우물 E에 10fC의 음전하를 주입한다. 이 상태에서 외부로부터 전기장이 방사되면 포텐셜 우물 E에 저장된 전하의 일부가 유출되어 다른 포텐셜 우물에 유입될 수 있으며, 이에 따라 측정부의 포텐셜 우물에 저장된 전하량의 분포가 달라진다. 그 측정 결과가 그림 3.5 (d)와 같다고 하면, 이 측정 결과는 그림 3.5 (e)와 같이 직교 좌표계 상에 벡터로 표현할 수 있다. 각각의 전기장 성분 벡터를 \vec{E}_B , \vec{E}_C , \vec{E}_F 라 하면, 이들을 모두 더한 \vec{E}_{TOT} 가 측정부에 방사된 전기장의 세기와 방향을 나타내는 벡터임을 알 수 있다. 이와 같은 방법

으로 MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정 장치는 2차원상의 전기장의 세기와 방향을 측정할 수 있다.

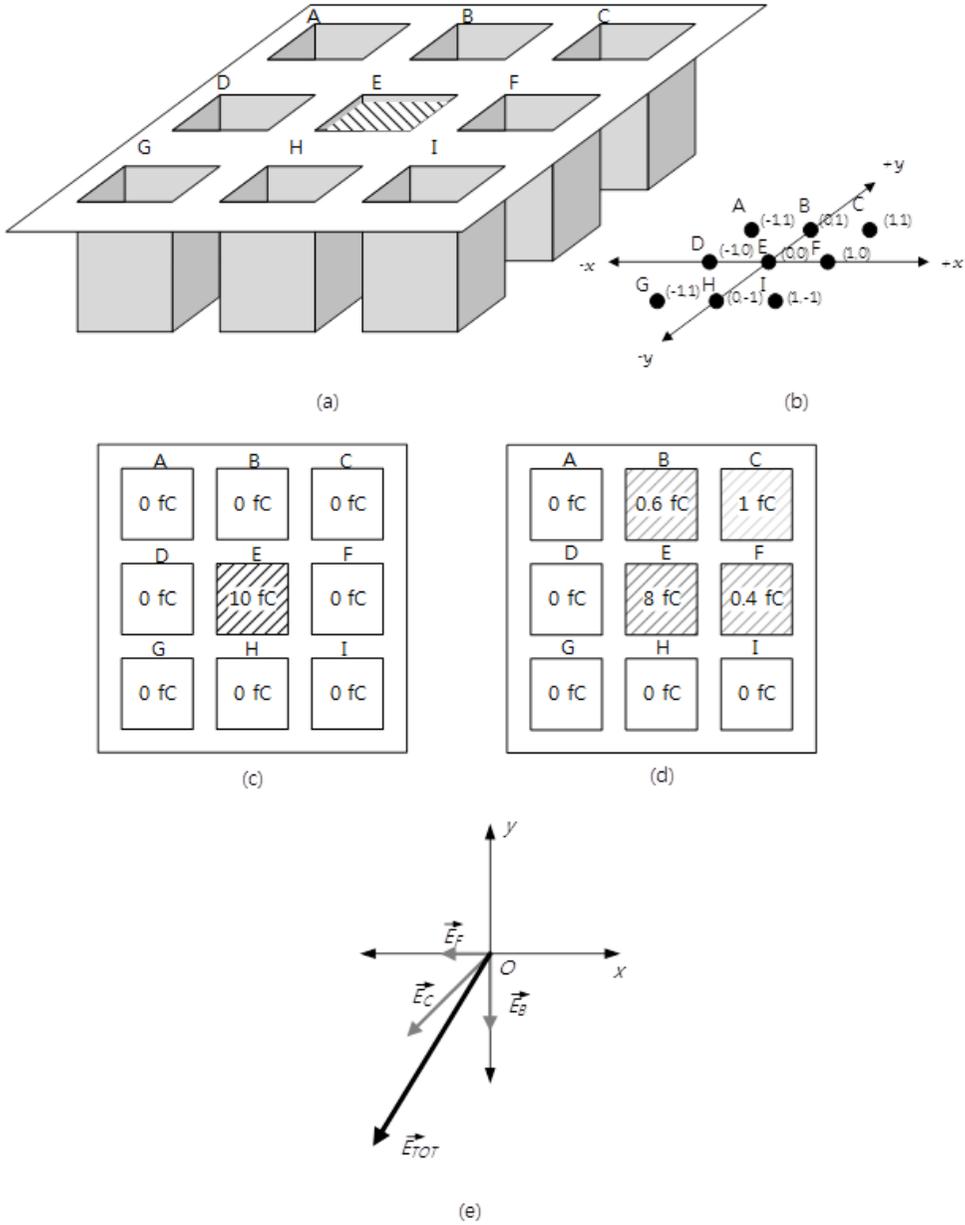


그림 3.5 2차원상의 전기장 측정 결과

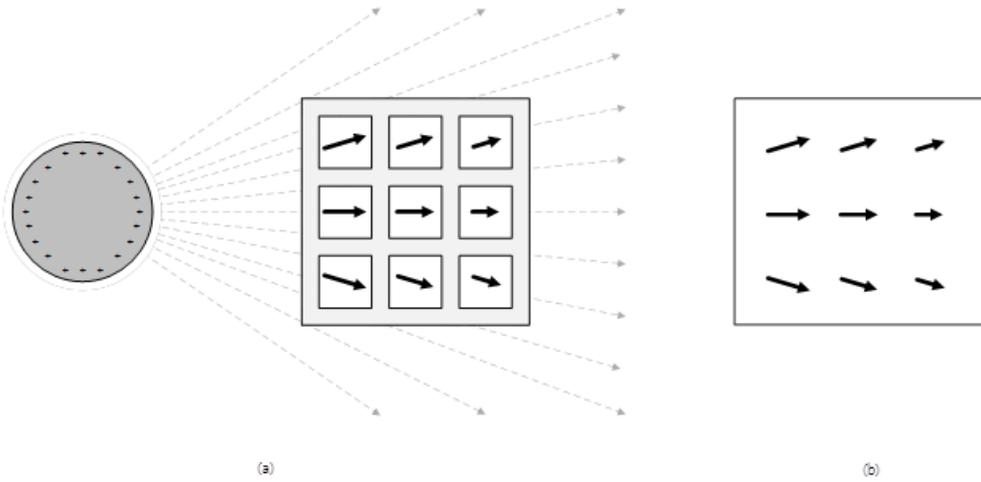


그림 3.6 2차원상의 전기장 시각화 방법

3.2.2 전기장의 시각화

2차원상에서 전기장의 세기와 방향을 측정하는 전기장 측정장치를 하나의 측정 단위로 이용하고 이 측정 단위를 공간상에 배열하면 2차원상에 분포한 전기장을 시각화하는 장치로서 활용할 수 있다. 그림 3.6 (a)를 참고하면, 9개의 전기장 측정 단위로 이루어진 전기장 측정 장치를 임의의 전기장이 미치는 공간 안에 위치시키면 전기장 측정 장치를 구성하는 각각의 측정 단위는 각자의 위치에서 전기장의 방향과 세기를 측정할 것이다. 측정된 결과는 그림 3.6 (b)와 같이 세기와 방향을 나타내는 화살표 형태로 표시가 가능하며, 이를 이용하여 공간상에 전기장이 분포하는 모습을 유선(Streamline) 형태로 표현할 수 있다.

3.3 측정부의 실제 구조

MOS 커패시터를 이용하여 3.2절에서 언급한 포텐셜 우물의 배치를 서브스트레이트 표면에 구현할 수 있다. 이러한 목적을 달성하기

위해 복수의 MOS 커패시터를 1차원 혹은 2차원상에 배열하고 적절한 형태로 전압을 인가한다. 이 절에서는 MOS 커패시터를 어떤 방식으로 이용하여 서브스트레이트 표면에 포텐셜 우물을 형성하는지에 대해 설명한다.

한편, 배열된 MOS 커패시터를 이용하여 전기장을 측정하는 장치의 구조는 MOS 커패시터의 배열을 이용하여 빛을 감지하는 장치인 전하결합소자(Charge Coupled Device; CCD)의 구조를 응용하여 구현될 수 있다. 대표적으로, 본 측정 장치의 입출력회로는 기존 전하결합소자의 동작을 위해 사용되었던 입출력회로를 응용하여 구현될 수 있다. 반면, 전하결합소자의 경우 빛을 효과적으로 감지하는 목적을 달성하기 위해 고유한 구조를 지닐 수 있다. 이와 같은 내용을 종합한 전기장 측정 장치와 전하결합소자의 유사점과 차이점을 이 절의 마지막 부분에서 설명한다.

3.3.1 단일 MOS 커패시터를 이용한 기본 구조

가장 기본적인 전기장 측정 장치는 단일 MOS 커패시터를 이용하여 구현될 수 있다. 그림 3.7은 단일 MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정 장치의 측정부를 나타내는 도면이다. 단일 MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정 장치의 측정부는 반도체 물질로 이루어진 서브스트레이트 위에 배치된 MOS 커패시터와, MOS 커패시터에 초기화 정보를 입력하기 위한 입력 회로 및 전기장에 노출된 후 측정 결과를 출력하기 위한 출력 회로로 구성된다.

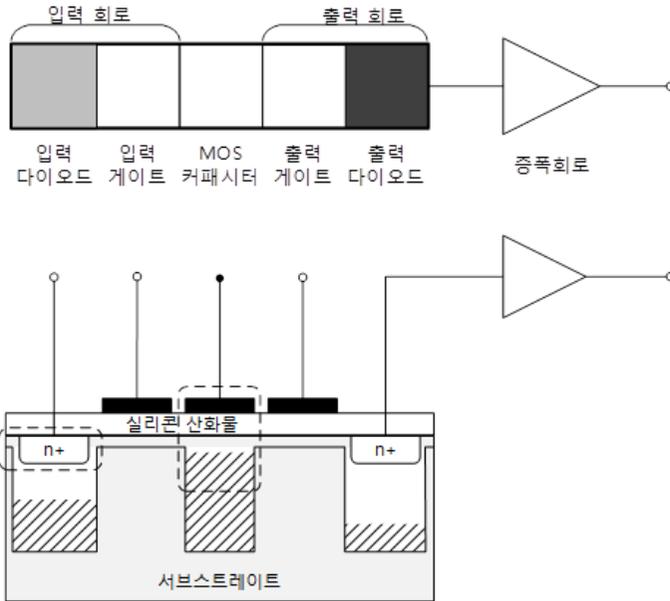


그림 3.7 단일 MOS 커패시터를 이용한 구조

단일 MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정장치에서 전기장은 MOS 커패시터에 입력된 전하량의 변화를 통해 감지된다. 이 때, 유출된 전하가 이동되는 위치는 단일 MOS 커패시터를 통해 알아낼 수 없으며 오로지 유출된 전하량의 크기만을 출력 회로를 통해 측정할 수 있다.

3.3.2 1 차원상의 전기장을 측정하는 측정부의 구조

복수의 MOS 커패시터를 이용하여 3.1절에서 설명한 1차원상에서 전기장의 세기와 방향을 측정하는 포텐셜 우물의 형상을 서브스트레이트 영역에 형성할 수 있다. 그림 3.8을 참고하면, 복수의 MOS 커패시터는 각각 3개의 페이즈 회선 중 어느 하나에 연결되어 동시에 전압이 인가된다. 그림 3.8에서는 $\Phi 2$ 회선에 전압이 인가되고 있으

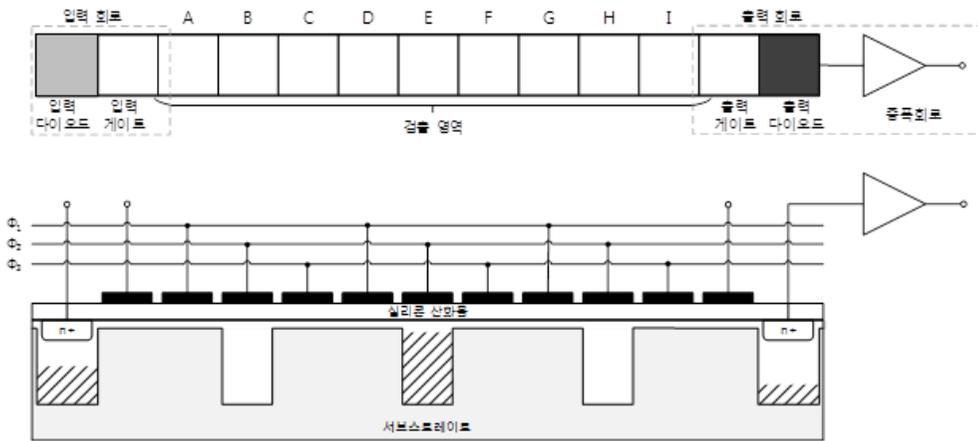
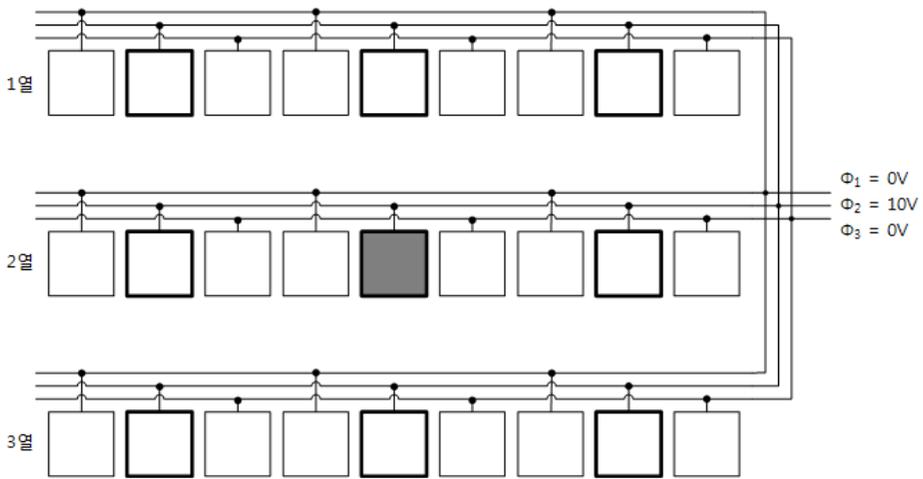


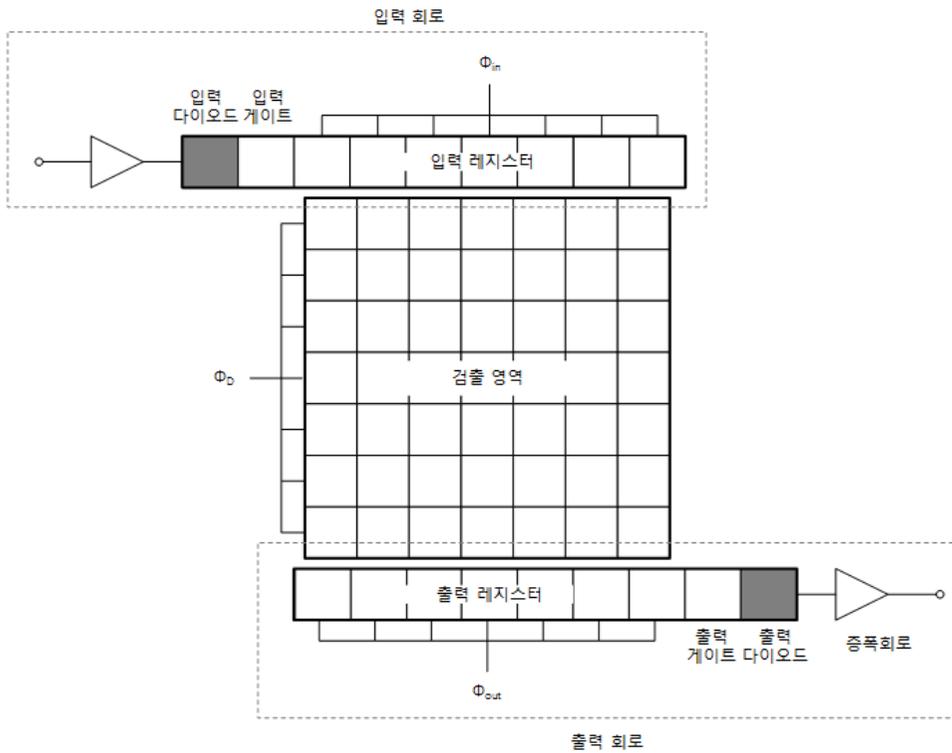
그림 3.8 복수의 MOS 커패시터를 이용한 구조

며 이에 따라 서브스트레이트 내의 전기적 위치 에너지의 분포가 그림 3.2와 같이 변경된다. 이 중, MOS 커패시터 E에 미리 입력된 전하가 존재한다고 가정하면, 외부 전기장에 의해 MOS 커패시터 E에 저장된 전하의 일부가 유출된다. 유출된 전하는 MOS 커패시터 B 또는 MOS 커패시터 H로 유입될 수 있다. 이 경우 전기장의 세기는 MOS 커패시터 E로부터 유출된 전하량으로, 전기장의 방향은 유출된 전하가 유입된 MOS 커패시터의 방향으로 판단될 수 있다.

한편 3.1절의 단일 MOS 커패시터를 이용한 기본 장치에서처럼 복수의 MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정 장치 역시 입력 회로와 출력 회로를 포함한다.



(a)



(b)

그림 3.9 2차원 전기장 측정 장치 구조

3.3.3 2차원상의 전기장을 측정하는 측정부의 구조

그림 3.9는 2차원상의 전기장을 측정하는 측정 장치의 구조이다. 2차원상에서 전기장의 세기와 방향을 측정하기 위한 측정 장치는 2차원상에 배치된 복수의 MOS 커패시터들로 구성되며, MOS 커패시터들에 인가되는 게이트 전압을 통해 서브스트레이트 표면의 전기적 위치 에너지 분포를 변화시키며, 이를 이용하여 전기장의 세기와 방향을 2차원상에서 측정한다.

2차원상의 전기장을 측정하는 전기장 측정 장치는 1차원상에서 전기장을 측정하는 측정 장치와 마찬가지로 MOS 커패시터들로 구성된 검출 영역과, 검출 영역에 초기화 전하를 입력하는 입력 회로 및 전기장 측정 결과를 출력하는 출력 회로로 구성된다.

이 때, MOS 커패시터들로 구성된 검출영역의 형태는 그림 3.9 (a)와 같이 3.2.2절에서 설명한 1차원상에서 전기장을 측정하는 측정부를 여러 줄로 배열한 형태를 띤다. 중앙의 음영으로 표시된 MOS 커패시터에는 초기화 전하가 입력되어 전기장에 노출될 때 저장된 전하의 일부가 유출되도록 제어된다. 또한 중앙의 MOS 커패시터와 페이즈 회선을 공유하는 복수의 MOS 커패시터들은 빈 포텐셜 우물을 형성하여 유출된 전하가 유입될 수 있도록 구현된다.

또한 2차원상에서 전기장을 측정하는 측정 장치는 그림 3.9 (b)와 같이 입력 회로와 출력 회로를 지닌다. 이 때, 입력 회로와 출력 회로는 전하를 검출 영역에 저장하거나 또는 저장된 전하를 출력시키기 위해 이들 전하를 임시로 저장하는 영역인 입출력 레지스터를 포함하는 형태로 구성될 수 있다. 입력 전하는 입력 레지스터에 순차적으로 저장되며, 이후 검출 영역으로 동시에 이동된다. 한편, 검출 영역에 저장된 전하는 출력 레지스터에 한번에 이동된 후 순차적으로

외부로 출력되는데, 이 때 저장된 정보를 증폭하기 위한 증폭 회로를 통과할 수 있다.

3.3.4 전기장 측정 장치와 전하결합소자의 비교

앞서 언급하였다시피, 본 연구의 전기장 측정 장치와 전하결합소자는 평면상에 MOS 커패시터를 배열하고 이를 이용하여 측정 대상(빛, 전기장)의 물리적 특성(세기, 혹은 세기와 방향)을 측정하며, 이 때 측정된 결과가 MOS 커패시터에 저장된 전하의 형태로 나타난다는 공통점이 있다. 따라서 두 장치는 서로 유사한 형태의 입력 회로와 출력 회로, MOS 커패시터의 배열 형태 및 페이즈 회선의 연결 방법 등의 기본 구조를 지닐 수 있으며, 전기장 측정 장치의 구현 시 전하결합소자의 물리적 구현 형태 및 동작 원리[20]를 참고하여 구현할 수 있다.

한편, 전하결합소자의 경우 빛의 감지 시 서브스트레이트에서 생성된 전자가 MOS 커패시터에 저장되므로 별도의 입력 회로를 필요로 하지 않는다. 또한, MOS 커패시터에 저장된 전하가 이동할 수 있는 방향은 오로지 출력 회로의 방향으로 한정되며, 이와 같은 단방향 전자 이동을 위해 이동 방향 이외의 방향으로 전자가 이동하지 못하도록 하는 구조를 포함하고 있다[27]. 이와 반대로, MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정 장치에서 전기장을 측정하는 경우 MOS 커패시터에 저장된 전하의 유출과 재유입을 이용하므로 2차원상의 어느 방향으로나 전자가 이동할 수 있어야 한다.

3.4 전기장 측정 장치의 제어 방법

앞서 설명한 구조의 전기장 측정 장치를 이용하여 전기장을 측정하기 위해서는 임의의 MOS 커패시터들에 전압을 인가하고 이 중 일

부의 MOS 커패시터에 전하를 입력하는 초기화 작업과, 측정 이후 MOS 커패시터에 저장된 전하를 출력하는 작업이 필요하다. 이러한 작업을 수행하기 위해 입력회로를 통한 전하의 입력과 출력 회로를 통한 전하의 출력, 그리고 MOS 커패시터들간 전하의 이동과 같은 작업의 수행이 필요하다. 본 절에서는 전하의 입출력과 이동과 같은 기본적인 작업을 수행하기 위한 방법을 먼저 소개하고 이러한 방법들을 종합적으로 이용하여 전기장을 측정하는 방법을 이어서 서술한다.

3.4.1 전하 입력

전기장 측정 장치의 측정부에 포함된 입력 회로는 입력 다이오드와 입력 게이트로 구성된다. 입력 회로는 소스(source)와 드레인(drain)을 갖는 MOSFET 트랜지스터와 유사한 방식으로 동작한다. 그림 3.10 (a)와 같이 두 개의 입력 게이트를 갖는 입력 회로를 통해 입력 회로의 동작에 대해 살펴보면, 입력 다이오드는 MOSFET 트랜지스터의 소스(source)와 유사하게 입력 회로에 전자를 공급하는 역할을 하며 입력된 전자는 입력 게이트 1에 인가된 게이트 전압 V_{G1} 에 의해 서브스트레이트 영역에 형성된 채널을 따라 MOSFET 트랜지스터의 드레인(drain) 역할을 하는 입력 게이트 2로 이동하여 입력 게이트 2의 서브스트레이트 영역에 저장된다. 이 때, 입력 게이트 2에 저장되는 전하량은 입력 신호의 크기인 V_{G2} 와 입력 게이트 1에 인가되는 전압 V_{G1} 의 차이에 의해 결정된다. 즉, 입력 전하량의 크기는

$$Q_{in} = C_{ox}(V_{G2} - V_{G1})$$

이며, 이 때 Q_{in} 은 입력 전하량, C_{ox} 는 실리콘 산화물의 정전 용량을 나타낸다.

그림 3.10 (a)는 시간 T_0 부터 T_3 까지 시간 흐름에 따른 입력 회로 내의 전기적 위치 에너지와 전하의 분포를 나타내며, 그림 3.10 (b)는 입력 회로의 각 구성 단위에 인가되는 전압을 시간 흐름에 따라 나타낸다. T_0 에서 입력 다이오드에 인가되는 전압인 V_D 는 15V로 설정되며, V_{G2} 는 10V로 설정된다. V_{G1} 은 2V로 설정되어 입력 다이오드와 입력 게이트 2 사이에 채널을 형성하지만 V_D 가 V_{G2} 보다 높은 상태이므로 전자의 입력은 아직 일어나지 않는다. T_1 에서 V_D 가 5V로 설정되면 입력 다이오드로부터 공급되는 전자가 입력 게이트 1의 채널을 통과하여 낮은 전기적 위치 에너지를 가진 입력 게이트 2로 이동한다. T_2 에서 V_D 는 다시 15V로 설정되며, 입력 회로 내에 저장된 전자의 일부가 다시 입력 다이오드를 통해 빠져나간다. 이 때, 입력 게이트 2에 저장된 전자는 V_{G1} 과 V_{G2} 간 전위차에 의해 형성된 포텐셜 우물에 갇히게 된다. 마지막으로, T_3 에서 ϕ_1 게이트에 10V의

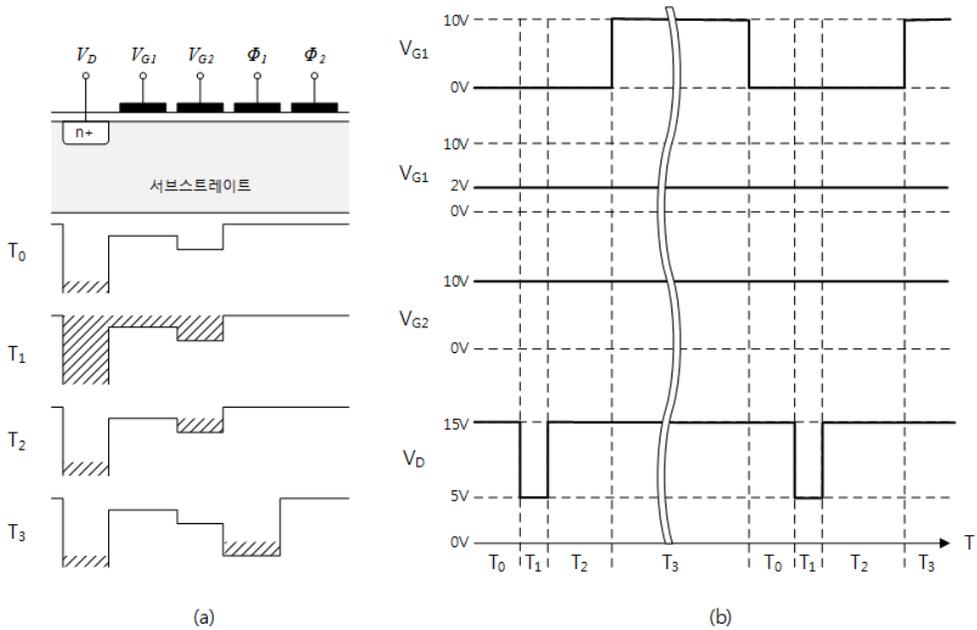


그림 3.10 입력 회로 제어 방법

전압이 인가되어 입력 게이트 2에 저장된 전자가 Φ_1 게이트에 이동하게 된다.

3.4.2 전하 전송

그림 3.11과 같이 인접한 MOS 커패시터 간에는 서로 전하의 이동이 가능하다. 이와 같이 인접한 MOS 커패시터 간 전하의 이동을 전하 전송이라 한다.

그림 3.11과 같이 MOS 커패시터 A에서 MOS 커패시터 B로의 전하 전송 과정을 살펴보면, 우선 T_1 에서 Φ_1 회선에 10V의 전압이 인가된다. 이에 따라 MOS 커패시터 A에 포텐셜 우물이 형성된다. MOS 커패시터 A에 임의의 전하량이 저장되어 있음을 가정하고, T_2 에서 Φ_1 회선과 함께 Φ_2 회선에 10V가 인가되면 포텐셜 우물은 MOS 커패시터 A와 MOS 커패시터 B에 걸쳐 확장되며, MOS 커패시터 A에 저장된 전하의 일부가 MOS 커패시터 B에 옮겨진다. T_3 에서 Φ_1 회선의 전압이 0V로 설정되면 T_2 에서 MOS 커패시터 A에 저장되었던 전하는 MOS 커패시터 B로 모두 이동한다. 동일한 방법으로, Φ_2 와 Φ_3 의 전압을 제어함으로써 MOS 커패시터 B의 전하를 MOS 커패시터 C로 이동시킬 수 있으며, Φ_3 와 Φ_1 의 전압을 제어함으로써 MOS 커패시터 C의 전하를 MOS 커패시터 D로 이동시킬 수 있다. 나머지 MOS 커패시터에서도 동일한 방법을 이용하여 전하 전송 동작을 수행할 수 있다.

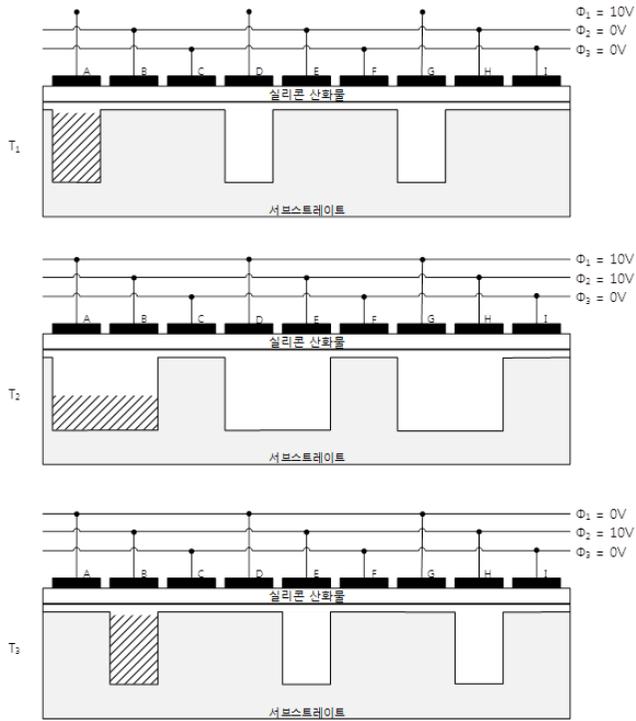


그림 3.11 MOS 커패시터 간 전하의 이동 방법

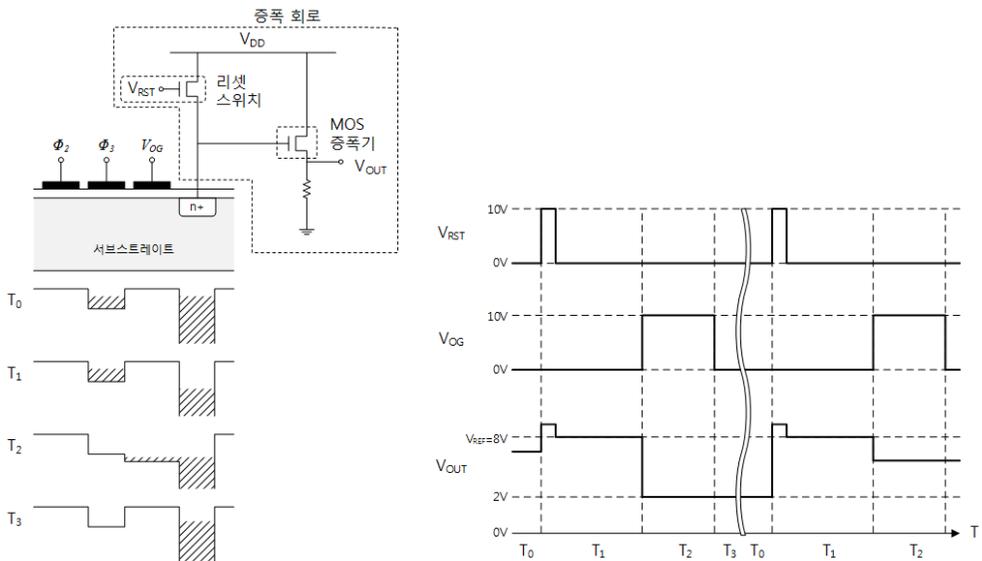


그림 3.12 출력 회로 제어 방법

3.4.3 전하 출력

MOS 커패시터에 저장된 전하량을 전압의 형태로 출력하는 출력 회로는 MOS 커패시터에 저장된 전하량을 전압의 형태로 변환하는 하나의 출력 다이오드, 출력 다이오드로의 전자의 이동을 제어하는 하나의 출력 게이트 및 출력 다이오드를 통해 출력된 전압의 크기를 증폭하는 역할을 하는 증폭 회로를 포함한다. 한편, 증폭 회로는 출력 전압 V_{OUT} 을 기준 전압 V_{REF} 으로 초기화하는 리셋 스위치 및 출력 다이오드로부터의 출력 전압을 증폭하는 역할을 하는 MOS 증폭기를 포함할 수 있다.

시간 흐름에 따른 출력 회로의 동작을 그림 3.12를 통해 살펴보면, T_0 에서 검출 영역의 맨 마지막 MOS 커패시터에 출력될 전하가 옮겨진다. 출력 게이트 전압 V_{OG} 는 0V로 설정되어 출력 다이오드로의 전하의 이동은 일어나지 않는다.

T_1 에서, 출력 전압 V_{OUT} 을 기준 전압 V_{REF} 으로 초기화하기 위해 리셋 스위치에 10V의 전압이 펄스 형태로 인가된다. 보다 구체적으로 V_{OUT} 의 초기화 과정을 살펴보면, 펄스 신호 입력에 따라 출력 다이오드에 저장된 여분의 음전하가 출력 회로 외부로 빠져나간다. 이에 따라 리셋 스위치와 출력 다이오드 사이의 회로가 양전하로 대전되어, MOS 증폭기에 양의 전압이 인가되도록 한다. 따라서 MOS 증폭기에는 MOS 증폭기 양 단의 전압 V_{DD} 와 접지전압에 의한 전류가 흐르게 되며, 이 전류의 크기에 따라 출력 회로의 출력 전압이 결정되는데, 이 때의 전압을 기준전압이라고 한다. 한편, 출력 회로의 기준 전압은 출력 회로의 구성에 따라 달라질 수 있는데, 여기에서는 기준 전압을 8V로 가정하였다.

T_2 에서, V_{OG} 가 10V로 설정되며, 이에 따라 검출 영역에 저장된 전하가 출력 다이오드로 이동한다. 출력 다이오드를 통해 출력된 음전하는 MOS 증폭기에 인가되는 전압을 낮추며, 이로 인해 V_{OUT} 은 기준 전압보다 낮은 값이 출력된다. 그림 3.10 (b)를 참고하면, T_1 에서 8V가 출력되던 출력 회로는, T_2 에서 출력 다이오드를 통해 출력된 음전하로 인한 전압강하에 의해 2V의 전압을 출력한다.

마지막으로 T_3 에서는 출력 게이트가 폐쇄되고 출력 동작이 종료된다. 이 때, 출력 전압은 T_1 에서 이루어지는 기준 전압으로의 초기화 전까지 2V로 유지된다.

3.4.4 전기장 측정 장치의 작동 단계

MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정은 초기화 단계, 전기장 검출 단계 및 전기장의 세기/방향 정보 획득 단계로 구성된다. 그림 3.13을 이용하여 전기장 측정 장치의 작동 단계를 살펴보면, 먼저 초기화 단계는 초기화 신호의 수신에 반응하여 측정부를 초기화한다. 보다 구체적으로, 초기화 단계는 측정부가 전기장에 노출될 때 측정부에 포함된 MOS 커패시터로부터 전자가 유출되거나 유출된 전자가 유입되는 민감도를 고려하여 측정부에 제공할 초기화 정보를 결정한다. 결정된 초기화 정보를 이용하여 전기장 측정 장치의 MOS 커패시터에 정해진 양의 전하가 입력 회로를 통해 입력되며, 입력된 전하는 전하 전송 동작을 이용하여 전기장 측정을 위해 미리 정해진 적절한 위치의 MOS 커패시터에 이동된다. 또한 초기화 단계는 측정부 내에 전기장 측정을 위한 포텐셜 우물이 형성될 수 있도록 측정부에 인가되는 게이트 전압을 조절하며, 측정부에서 출력되는 출력 전압을 기준 전압으로 초기화한다.

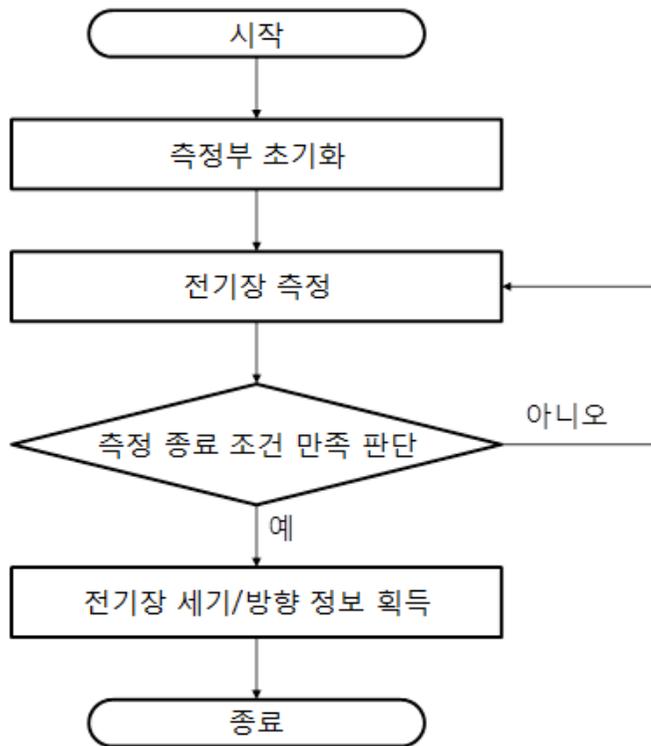


그림 3.13 전기장 측정 장치의 작동 순서도

전기장 측정 단계는 전기장 측정 장치의 측정부를 전기장에 노출시킨다. 이 때, 전기장 측정 단계는 초기화 단계에서 입력된 초기화 정보가 전기장에 의해 변경되도록 측정부의 게이트 전압을 제어할 수 있다.

측정 종료 조건 만족 판단 단계는 측정 종료 조건 만족 여부를 판단한다. 예를 들면, 측정 종료 조건은 미리 설정된 노출 시간과 같은 것이 될 수 있다. 만약 측정 종료조건을 만족하는 경우, 측정부에 저장된 정보가 전기장에 의해 변화되지 않도록 측정부의 게이트 전압을 제어할 수 있다. 다시 말해, 측정 종료조건 이후에는 전기장 측정 단계에서 인가하던 전압보다 더 큰 전압을 인가하여 전하의 이동을 막을 수 있다.

전기장 검출 작업이 완료되었다고 판단되면, 측정부에 저장된 측정 결과를 기초로 전기장의 세기와 관련된 정보 및 전기장의 방향과 관련된 정보를 얻을 수 있다. 이 단계를 전기장 세기/방향 정보 획득 단계라고 한다. 이 단계에서 각 MOS 커패시터들에 저장된 전하는 출력 회로로 이동하며, 출력 회로를 통해 전압의 형태로 출력된다. 전기장 세기/방향 정보 획득 단계가 완료되면 사용 목적에 따라 전기장 측정을 종료하거나 초기화 단계로부터 재시작하도록 제어될 수 있다.

이러한 각 작동 단계들은 앞서 설명한 전하 입력, 전하 전송 및 전하 출력 동작을 통해 이루어진다. 예를 들면, 초기화 단계는 정해진 양의 전하를 입력하는 전하 입력 및 입력된 전하를 이동시키는 전하 전송으로 구성된다. 또한 전기장 세기/방향 정보 획득 단계는 전하 전송 및 전하 출력 동작을 통해 구현될 수 있다. 한편, 전기장 측정 단계는 단지 특정 MOS 커패시터들에 게이트 전압을 선택적으로 제공하는 방법으로 구현할 수 있다. 전기장 측정 장치의 구현을 위해 이러한 작동 단계들을 어떤 식으로 구체화하는지는 다음 장에서 시제품 구현의 예를 통해 설명한다.

제 4 장 전기장 측정 장치 시제품 구현

본 장에서는 3장에서 설명한 전자기 위치 에너지의 차이를 이용하여 전하의 움직임을 제한하고 이를 관측하여 전기장을 측정하는 장치의 실제 구현에 대해 설명한다.

본 연구에서는 전기장 측정 장치의 실제 구현을 위해 MOS 커패시터의 배열을 별도로 제작하는 대신 전하결합소자를 이용하여 전기장 측정 장치의 시제품을 구현하였다. 전하결합소자는 MOS 커패시터의 배열로 구성되어있다는 점에서 본 연구에서 제안하는 전기장 측정 장치와 유사성이 있는 반면 이미지 센서로서 사용되기 때문에 발생하는 차이점, 예를 들면 전하의 움직임을 0.5차원¹으로 제한하는 점과 대부분의 전하결합소자에서 입력 회로를 생략하는 점 등에서 중요한 차이를 보인다. 이러한 이유로 전기장 측정 장치를 구현하기 위해 필요한 형태의 전하결합소자를 구하기 어려운 점과, 실제로 구현하더라도 이상적인 전기장 측정 장치에서 구현하고자 하는 기능을 완벽히 구현할 수 없다는 제한이 존재한다. 그렇다 할지라도 시중에서 구할 수 있는 일반적인 전하결합소자를 이용한 전기장 측정 장치의 시제품 역시 제한적이거나 MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정 장치와 유사한 측정 결과를 제공할 수 있다 볼 수 있으므로, 향후 제작할 실제 MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정 장치의 형태 및 작동 방법을 제시할 수 있다.

¹ 수직 또는 수평방향으로의 이동으로 제한되며, 이동 방향 역시 1차원 내에서의 자유로운 움직임을 보장하는 대신 구조적으로 전하의 움직임을 단방향으로 제한하므로 0.5차원의 자유도를 가진다고 볼 수 있다.

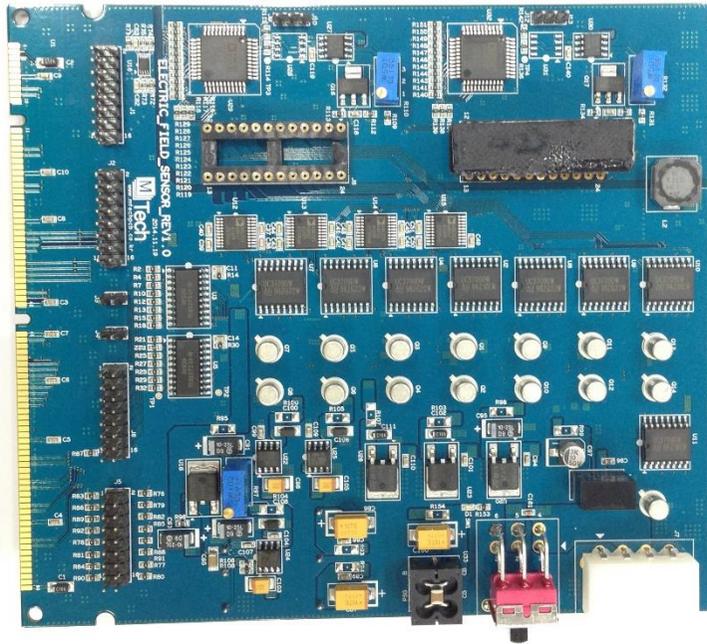


그림 4.1 전기장 측정 장치 시제품 (상: 측정부, 하: 제어부)

4.1 전기장 측정 장치의 시제품 구현

전하결합소자를 이용한 전기장 측정 장치의 시제품을 그림 4.1과 같이 제작하였다. 본 시제품은 MOS 커패시터를 대신하는 전하결합소자와, 이의 동작을 위해 필요한 주변 회로를 포함하는 측정부 및 측정부의 제어를 위한 제어부로 구성된다. 측정부와 제어부는 별도의 보드로 구현되어 제어부에 갖춰진 SDRAM 소켓을 통해 신호를 주고받는다. 이 절에서는 전하결합소자, 측정부 및 제어부 각각의 구현에 대해 보다 자세히 살펴본다.

4.1.1 시제품 구현을 위한 전하결합소자의 선정

MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정 장치의 시제품 구현을 위해 다음과 같은 조건을 가진 전하결합소자를 선정하였다.

1. 입력 회로의 구비: 이미지 센서로 사용되는 일반적인 전하결합소자는 빛에 의해 생성되는 전자-정공 쌍이 MOS 커패시터에 저장되는 전자를 공급하므로 별도의 입력 회로를 필요로 하지 않는다. 반면, MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정 장치는 초기화 전자의 입력 없이는 전기장의 측정이 불가능하므로 입력 회로를 별도로 갖춘 전하결합소자를 찾는 일이 필요하였다.
2. 3페이지 또는 4페이지 구조: 전하결합소자에서 페이지 회선은 적은 수의 회선으로 많은 MOS 커패시터들에 동시에 전압을 공급하기 위해 존재하는데, 최근의 전하결합소자에서는 2페이지 또는 가상 페이지 구조 등의 채용으로 페이지 회선의 수를 상당부분 감소시켰다. 이와 같은 구조는 저장된 전하를 특정 방향으로 빠르게 이동시켜야 하는 이미지 센서로서는 좋은 구조이지만 서브스트레이트 영역에 포텐셜 우물을 형성하고 전자를 직접 제어해야 하는 전기장 측정 장치로서는 사용할 수 없

는 구조이다. 심지어 이런 구조는 포텐셜 우물의 형태를 MOS 커패시터에 인가되는 게이트 전압에 의해 전기적으로 제어하는 방법에 더불어 도핑 농도가 다른 영역을 서브스트레이트 표면에 형성하여 전자의 이동을 제한시킨다. 따라서 이와 같은 물리적 구조가 배제된 가장 단순한 형태의 전하결합소자가 필요하였다.

3. 이면조사(Back Illuminated) 형상: 일반적인 이미지 센서는 게이트 전극 및 이를 제어하는 제어 회로 등이 위치한 윗면을 빛에 노출시키는 방식으로 구현되었는데, 이러한 구조를 전기장 측정장치로 사용하는 경우 게이트 전극과 제어 회로에 의한 전기장의 왜곡이 발생할 가능성이 상존하였다. 따라서 빛 등 외부에 노출되는 면의 반대쪽에 전자회로가 위치하는 이면조사형 전하결합소자[12]를 사용하여 시제품을 구현하여야 하였다.

이러한 조건을 만족시키는 전하결합소자를 찾은 결과, Hamamatsu Photonics 사의 전하결합소자인 S10420-1006-01[28]이 이러한 조건을 만족시키는 것을 확인되었다. S10420-1006-01은 수평



그림 4.2 S10420-1006-01 전하결합소자

1044 픽셀 및 수직 70 픽셀로 구성된 이면조사 센서이며 수직 2페이지, 수평 4페이지의 구조를 지닌다. 대부분의 전하결합소자와 동일하게 S10420-1006-01 역시 수직은 2페이지 구조를 지니므로 전기장 측정을 위해 사용되기 어려우나 수평 방향으로 4페이지 구조를 지니므로 전기장 측정을 위해 사용될 수 있으며, 이에 따라 1차원 상에서 전기장을 측정하는 측정부의 구현과 제어 로직 설계를 목표로 하였다. S10420-1006-01 전하결합소자의 물리적 특성은 표 4.1과 같다.

표 4.1 S10420-1006-01의 물리적 특성

항목	값
Pixel size	14 x 14 μ m
총 픽셀 개수	1044 (가로) \times 70 (세로)
유효 픽셀 개수	1024 (가로) \times 64 (세로)
패키징	세라믹
프레임 레이트	189.0 frames/s
반응 파장 범위	200 to 1100 nm
포화 전하량 (수직)	60 ke ⁻
누설 전류량	50 e ⁻ /pixel/s
독출 잡음	6 e ⁻ rms

4.1.2 전하결합소자를 이용한 측정부 구현

전기장 측정 장치의 측정부를 구현하기 위해 전하결합소자를 이용한 개발 보드를 그림 4.2와 같이 구현하였다. 개발 보드는 앞서 설명한 Hamamatsu사의 S10420-1006-01 전하결합소자를 이용하여 구현되었으며, 전하결합소자의 제어를 위해 필요한 전원을 생성하는

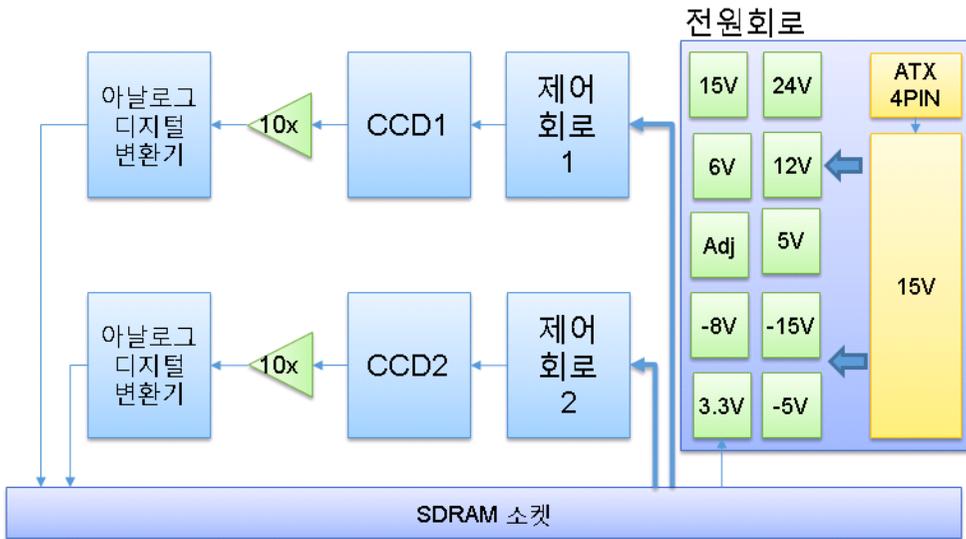


그림 4.3 측정부 개발 보드의 구성

전원 회로, 제어부로부터 입력되는 디지털 신호를 전하결합소자에 입력되는 작동 전압으로 변환하는 변환 회로 및 전하결합소자로부터 출력되는 신호를 디지털 신호로 변환하는 아날로그-디지털 변환기 (Analog-to-Digital Converter)를 갖추고 있다. 측정부 개발 보드의 개략적인 구성은 그림 4.3과 같다.

4.1.3 전기장 측정 장치의 제어부 구현

전기장 측정 장치의 제어부는 Xilinx사의 Spartan-6 (XC6SLX150T) [29] FPGA를 이용하여 구현되었으며 측정부 개발 보드와의 인터페이스를 위해 SDRAM용 소켓을 장착하고 있다. Spartan-6 FPGA 내부에는 Microblaze 프로세서가 포함되어 전기장 측정 장치의 제어를 위한 소프트웨어 프로그램을 구동할 수 있다. 기타 전기장 측정 장치의 주변 장치들을 포함하는 서브 시스템들은



그림 4.4 제어부의 구성

Xilinx사의 ISE 및 EDK 13.1 버전을 이용하여 구현하였다. 제어부의 개략적인 구성은 그림 4.4와 같다.

그림 4.4와 같이 구현된 제어부는 호스트 컴퓨터와 UART 통신을 이용하여 사용자로부터 명령을 입력받는다. 입력받은 명령은 Microblaze 프로세서를 통해 전기장 측정장치 제어기에 전달되며, 제어기는 입력받은 명령에 따라 3장에서 설명한 전하 입출력 및 전하 전송을 위한 신호를 SDRAM 소켓을 통해 측정부 개발 보드에 전송한다. 또한 전기장 측정 장치 제어기는 측정부 개발 보드의 아날로그-디지털 변환기에서 출력된 측정 결과를 제어부 내의 DRAM에 저장하며, 저장된 정보는 사용자 요청에 따라 외부로 출력된다.

보다 구체적으로, 사용자는 제어부에 초기화, 출력 및 측정의 세 가지 명령을 내릴 수 있다. 초기화 명령은 전기장 측정 장치를 초기화하는 명령으로 전하 입력 동작 수행 후 이를 특정 픽셀에 전송하는 동작으로 구성된다. 예를 들면 그림 4.5 (a)와 같이 100번 픽셀에 전하를 입력하는 경우, 전하 입력 동작을 통해 1043번 픽셀에 전하를 입력한 후 943번 전하 전송 동작을 수행하여 100번 픽셀에 전

하가 옮겨지도록 구현된다. 또한 본 시제품 구현에서는 입력 동작을 수행하는 시간을 조절하도록 설계되어 복수의 픽셀에 연속해서 전하를 전송하도록 구현되었다.

또한 출력 명령은 측정부의 모든 픽셀의 정보를 출력하는 명령으로 전하 출력과 전하 전송 동작이 반복적으로 수행된다. 예를 들어 초기화를 통해 입력된 전하를 출력하는 동작을 그림 4.5 (b)와 같이 수행하는 경우, 전하 전송과 전하 출력을 하나로 묶은 한 사이클을 100번 반복하면 100번 픽셀의 전하의 출력이 이루어진다.

측정 명령은 정해진 시간 동안 전기장을 측정 후 측정 결과를 출력하는 명령으로 초기화 동작 수행 후 일정 시간동안 게이트 전압을 유지하여 측정 동작을 수행한다. 일정 시간이 경과되면 출력 동작을 통해 전기장 측정 결과를 확인한다.

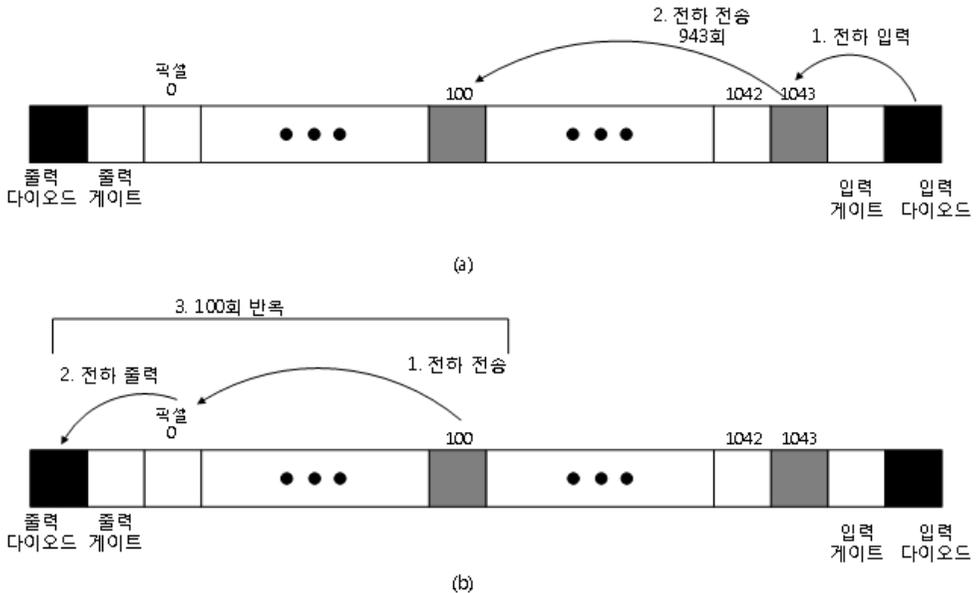


그림 4.5 사용자 명령에 따른 측정부의 동작

4.2 실험 방법 및 결과

4.2.1 실험 방법

본 전기장 측정 장치의 시제품을 이용하여 전기장 검출 가능성을 확인하기 위한 실험을 수행하였다. 먼저 전기장 측정 장치의 초기화를 위해 입력 회로를 통해 입력되는 초기화 전하량의 크기를 측정하였고, 이후 전기장을 인가하지 않은 상태에서 전기장 측정 장치를 작동시켜 기준 전하량을 얻었다. 다음으로 전기장 측정 장치를 전기장에 노출시킨 후 MOS 커패시터에 저장된 전하량을 출력하고 이를 기준 전하량과 비교함으로써 유출 전하량의 크기를 구하였다.

본 실험에서는 전하가 입력된 MOS 커패시터 주변의 다른 MOS 커패시터에 전압을 인가하는 방법으로 전기장을 형성하였다. 본 시제품의 측정부의 경우 한 픽셀은 총 4개의 MOS 커패시터로 구성되며, 초기화 전하는 이들 중 일부에 저장된다. 본 실험에서는 그림 4.6과 같이 P2 커패시터에 전하를 저장하였으며, 인접한 MOS 커패시터로의 직접적인 전하 이동을 막기 위해 P2 커패시터로부터 게이트 하나 너비만큼 떨어져 있는 P4 커패시터에 전압을 인가하여 P2 커패시터의 전하를 유출할 수 있는 전기장을 형성하였다.

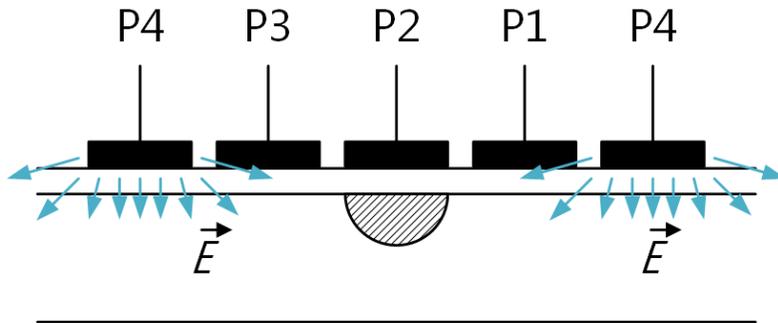


그림 4.6 측정부 내 전기장 형성 방법

한편, P4 커패시터에 인가되는 게이트 전압에 의해 형성되는 전기장의 세기 $E = V/d$ 이므로 P4 커패시터에 인가되는 게이트 전압의 크기와 P2 커패시터에서의 전하 유출량을 비교함으로써 MOS 커패시터로부터의 전하 유출량과 전기장의 세기와의 상관관계를 확인할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 P4 커패시터에 인가되는 게이트 전압을 변화시켜가며 P2 커패시터의 전하 유출량을 측정하였다. 또한, 시변 전자계에 대한 전기장 측정 장치의 반응을 살펴보기 위해 P4 게이트 전압이 변하는 경우에서도 실험을 수행하였다.

4.2.2 실험 결과

입력 회로를 통해 입력되는 전하량은 그림 4.7과 같이 측정되었다. 입력 회로를 통해 입력되는 전하량은 입력 회로를 통해 전하를 공급한 시간과 이 때의 전류량의 곱($Q = I \times t$)으로 표현되는데, 실험 결

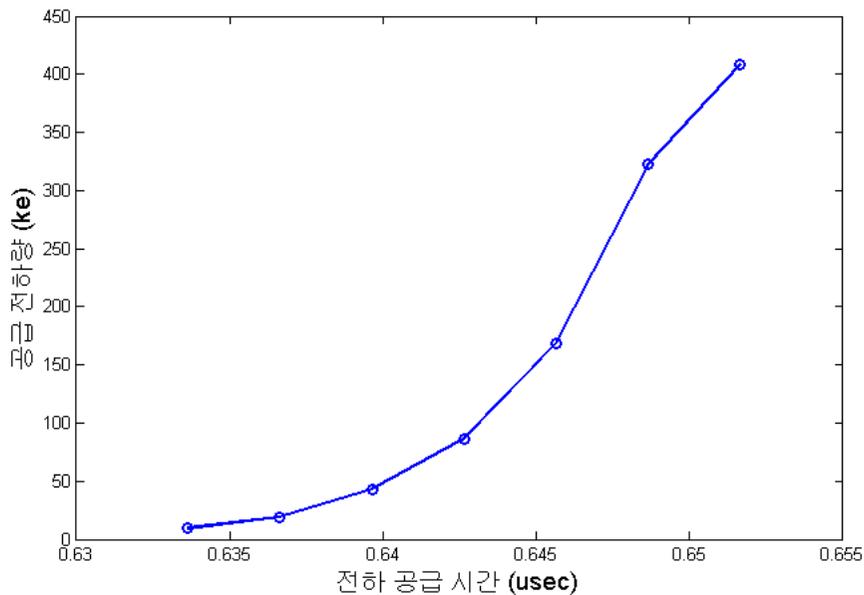


그림 4.7 전하 공급 시간에 따른 공급 전하량

과, 본 전기장 측정 장치에서 입력 전하량 역시 전하 공급 시간에 비례하여 증가함을 확인할 수 있었다.

P4 커패시터에 고정된 전압이 인가되는 경우 전자의 유출은 그림 4.8과 같이 측정되었다. 측정 결과는 전압이 인가되지 않은 경우 (즉, $V_{DC} = 0V$)를 기준으로 전자 유출량을 측정하였는데, 측정 결과 초기 2V까지 전하 유출이 발생되지 않다가 2V 이상에서부터 전하 유출이 시작되었다. 이후 전자 유출량은 인가 전압에 비례하여 증가하였다.

또한 P4 커패시터에 교류 전압의 형태로 전압 인가 시 전자의 유출은 그림 4.9와 같이 측정되었다. 측정 결과는 교류 전압이 인가되지 않은 경우 (즉, $V_{AC} = 0V$)를 기준으로 전자 유출량을 측정하였는데, 측정 결과 고정 전압 인가시와 마찬가지로 인가되는 교류 전압의 크기가 클수록 전자 유출량이 증가함을 알 수 있었으며, 이 때 전자 유출량은 인가되는 교류 전압에 선형으로 증가함을 확인할 수 있었다.

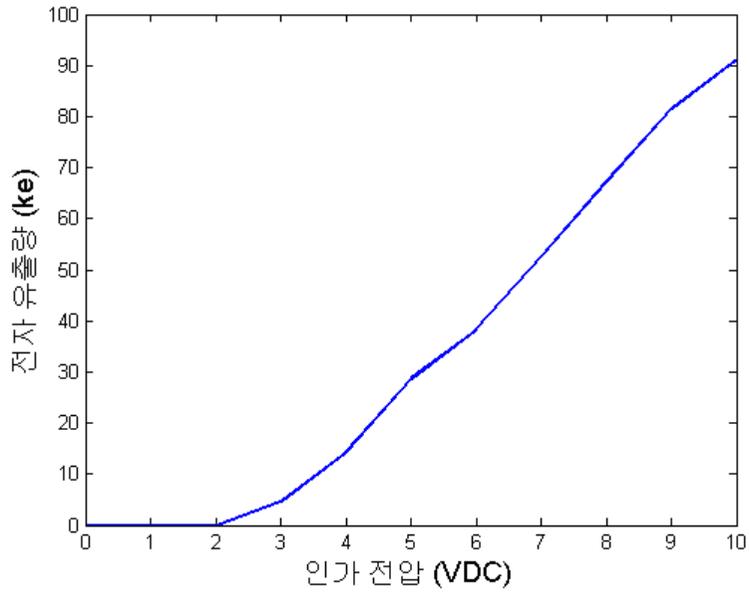


그림 4.8 고정 전압 인가 시 전자 유출량

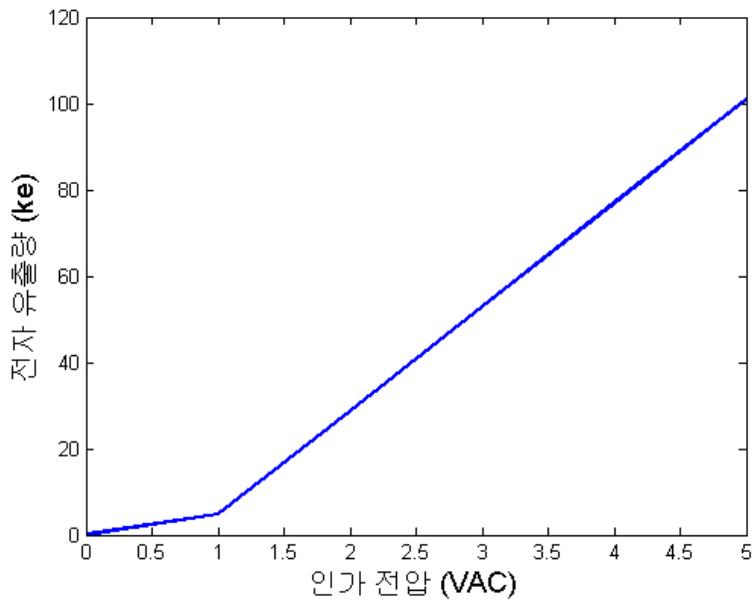


그림 4.9 교류 전압 인가 시 전자 유출량

제 5 장 결론 및 향후 연구 과제

본 논문에서는 MOS 커패시터를 이용하여 전기장의 세기와 방향을 동시에 측정할 수 있는 측정 장치를 제시하였다. 본 측정 장치는 기존의 전기장 측정 장치에 비해 다음과 같은 장점이 있다.

1. MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정 장치는 전기장의 형태에 상관없이 전기장을 측정할 수 있다.
2. MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정 장치는 전기장의 세기와 방향을 동시에 측정할 수 있다.
3. MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정 장치는 쉬운 반도체 공정을 이용하여 제작될 수 있으므로 소형화가 용이하며 낮은 제작 비용으로 생산이 가능하다.

MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정 장치의 전기장 측정 가능 여부를 판단하기 위해 전하결합소자를 이용한 시제품을 구현하였다. 시제품을 이용한 시험 결과 전자가 저장된 MOS 커패시터 주위에 작용하는 전기장의 크기에 비례하여 전자의 유출이 일어남을 확인할 수 있었다.

향후 연구 과제로서 MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정 장치의 실제 구현을 위해 본 장치의 전기장에 대한 반응을 물리적으로 해석한 모델을 개발할 필요가 있다. 정확한 물리적 모델의 개발은 이번 실험에서 전기장 관찰이 어려웠던 원인을 보다 정확하게 해석해주는 한편 실제 장치의 세부적인 설계 역시 가능하게 할 것이다. 이러한 물리적 모델을 통해 도출된 전기장 측정 장치의 세부 설계 내용을 토대로 MOS 커패시터를 이용한 전기장 측정 장치의 실질적인 구현이 가능할 것이

며 여기에 대한 정량적 실험을 통해 본 장치의 효용성이 보다 확실하게 입증될 것이다.

한편, 본 장치를 통해 전기장을 이용한 다양한 어플리케이션들을 개발하는 것 역시 중요한 연구가 될 수 있다. 본 장치는 전기장을 감지하는 원리를 가진 다른 장치들을 대체할 수 있다. 예를 들면 통신 장치 및 기계 제어 장치 등의 전자기 적합성 판단을 위한 도구, 의료·산업용 영상 장치 등을 대체할 수 있는 가능성을 가지고 있다. 따라서 본 장치를 이용한 다양한 어플리케이션 개발을 통해 다양한 산업 분야의 발전에 이바지할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] T. Adams and R. Layton, “Introductory MEMS: fabrication and applications,” Springer, 2010.
- [2] D. Barbe, “Imaging devices using the charge-coupled concept,” Proc. IEEE, vol. 63, no. 1, 1975.
- [3] M. Bareiß and B. Tiwari, “Nano antenna array for terahertz detection,” Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, vol. 59, no. 10, pp. 2751–2757, 2011.
- [4] J. Bean, B. Tiwari, and G. Bernstein, “Thermal infrared detection using dipole antenna-coupled metal-oxide-metal diodes,” Journal of Vacuum Science & Technology B, vol. 27, no. 1, p. 2, 2009.
- [5] A. Beiser, “현대물리학(6판).” 교보문고, 2009.
- [6] M. Bertocco, A. Selmo, and A. Sona, “Design of a Measurement System for Electric and Magnetic Field Analyses,” in 2005 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2005, vol. 1, pp. 220–225.
- [7] N. Blanc, “CCD versus CMOS—has CCD imaging come to an end,” in Photogrammetric Week, 2001, vol. 1, pp. 131–137.
- [8] D. K. Cheng, “Field and Wave Electromagnetics,” Addison-Wesley, 1989.

- [9] A. N. Cleland and M. L. Roukes, “A nanometre–scale mechanical electrometer,” *Nature*, vol. 392, no. 6672, pp. 160–162, Mar. 1998.
- [10] G. Cohn, S. Gupta, T.–J. Lee, D. Morris, J. R. Smith, M. S. Reynolds, D. S. Tan, and S. N. Patel, “An ultra–low–power human body motion sensor using static electric field sensing,” in *Proceedings of the 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing – UbiComp ’12*, 2012, p. 99.
- [11] Y. Ghallab and W. Badawy, “DeFET: A novel CMOS electric–field sensor for lab–on–a–chip and biomedical applications,” *Sensors Journal, IEEE*, vol. 6, no. 4, pp. 1027–1037, 2006.
- [12] D. Groom, S. Holland, M. Levi, N. Palaio, S. Perlmutter, R. Stover, and M. Wei, “Back–illuminated, fully–depleted CCD image sensors for use in optical and near–IR astronomy,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 442, no. 1, pp. 216–222, 2000.
- [13] S. Hasan and S. Ibrahim, “Design of an enhanced electric field sensor circuit in 0.18 μm CMOS for a lab–on–a–chip bio–cell detection micro–array,” *Sens. Transducers J*, 2008.
- [14] J. Janesick and T. Elliott, “New advancements in charge–coupled device technology: subelectron noise and 4096 x 4096 pixel CCDs,” *SC–DL tentative. Int. Soc. Opt. Photonics*, pp. 223–237, 1990.

- [15] J. Jang, H. Kim, W. Cho, and H. Cho, “Vertical cell array using TCAT (Terabit Cell Array Transistor) technology for ultra high density NAND flash memory,” Symposium on VLSI Technology, IEEE, pp. 192–193, 2009.
- [16] G. L. Marcialis and F. Roli, “Fingerprint verification by fusion of optical and capacitive sensors,” Letters of Pattern Recognition, vol. 25, no. 11, pp. 1315–1322, 2004.
- [17] R. Matias and M. Cunha, “Modeling capacitive coupling systems for body coupled communications,” Proceedings of the 7th International Conference on Body Area Networks. ICST, 2012.
- [18] J. Nakamura, Image sensors and signal processing for digital still cameras. 2005.
- [19] ARRL inc., “The ARRL Antenna Book: For Radio Communications.” American Radio Relay League, 2011.
- [20] A. Theuwissen, “Solid–state imaging with charge–coupled devices,” Springer Netherlands, 1995.
- [21] F. Zare, “Electromagnetic Interference Issues in Power Electronics and Power Systems,” Bentham Science Publishers, 2011.
- [22] T. G. Zimmerman, J. R. Smith, J. A. Paradiso, D. Allport, and N. Gershenfeld, “Applying Electric Field Sensing to Human–computer Interfaces,” in Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 1995, pp. 280–287.

- [23] S. Parker, "Electricity," DK, 2005.
- [24] K.-T. Lin, H.-L. Chen, Y.-S. Lai, and C.-C. Yu, "Silicon-based broadband antenna for high responsivity and polarization-insensitive photodetection at telecommunication wavelengths," Nature Communications, vol. 5, Feb. 2014.
- [25] D. K. Schroder, "Advanced MOS devices," Addison-Wesley Pub. Co., 1987.
- [26] C. Hu, "Modern Semiconductor Devices for Integrated Circuits," Prentice Hall, 2010.
- [27] J. R. Janesick, "Scientific Charge-coupled Devices," SPIE Press, 2001.
- [28] Hamamatsu Photonics, "Back-thinned type CCD area image sensor S10420-1006-01", available at <http://www.hamamatsu.com/us/en/product/category/3100/4005/4206/4214/S10420-1006-01/index.html>.
- [29] Xilinx, "Spartan-6 Family", available at <http://www.xilinx.com/products/silicon-devices/fpga/spartan-6.html>
- [30] "Dipole Antenna" available at http://en.wikipedia.org/wiki/Dipole_antenna.

Abstract

Design and Implementation of Electric Field Measuring Device using MOS Capacitor

Young Hun Lee

School of Computer Science Engineering

College of Engineering

The Graduate School

Seoul National University

Electric field is a space in which the electric force reaches and induced by existence or movement of charges. Numerous numbers of electronics are used with respect to development of modern electronic technology. Therefore, the electric field is formed in the space with various shapes to be used for many purposes. However, using electricity is negative impacts such as cancer, either. So, electric field measurement device which measure conclusive electric field in the space. However, electric field measurement devices until now cannot measure this kind of electric field accurately.

MOS capacitor reserves charges using electric field, and also have characteristic losing its charge when it is exposed to external electric field. Therefore, Electric field can be measured by counting inflow and outflow charges of MOS capacitors.

This study suggests the method of measuring electric field using MOS capacitors and the way of controlling the MOS capacitors. To proof this method, we made prototype of electric field measurement device using charge coupled device and conducted a experiment.

In conclusion, this prototype device using charge coupled device instead of MOS capacitor was worked well, and electron leaking from the MOS capacitor was nearly proportional to the strength of the electric filed. In future works, physical analysis and manufacturing of actual electric field measurement device using MOS capacitor will be proceeded and quantitative experiment will be also conducted.

keywords : Electric Field, Measuring device, MOS capacitor, Semiconductor, Charge Coupled Devices

student number : 2013-22509