

Motion Vector Based Overlay Metrology Algorithm for Wafer Alignment

Lee Hyun Chul[†] · Woo Ho Sung^{††}

ABSTRACT

Accurate overlay metrology is essential to achieve high yields of semiconductor products. Overlay metrology performance is greatly affected by overlay target design and measurement method. Therefore, in order to improve the performance of the overlay target, measurement methods applicable to various targets are required. In this study, we propose a new algorithm that can measure image-based overlay. The proposed measurement algorithm can estimate the sub-pixel position by using a motion vector. The motion vector may estimate the position of the sub-pixel unit by applying a quadratic equation model through polynomial expansion using pixels in the selected region. The measurement method using the motion vector can calculate the stacking error in all directions at once, unlike the existing correlation coefficient-based measurement method that calculates the stacking error on the X-axis and the Y-axis, respectively. Therefore, more accurate overlay measurement is possible by reflecting the relationship between the X-axis and the Y-axis. However, since the amount of computation is increased compared to the existing correlation coefficient-based algorithm, more computation time may be required. The purpose of this study is not to present an algorithm improved over the existing method, but to suggest a direction for a new measurement method. Through the experimental results, it was confirmed that measurement results similar to those of the existing method could be obtained.

Keywords : Overlays, Image-Based Overlays, Overlay Targets, Semiconductors, Overlay Metrology Algorithms, Motion Vectors

웨이퍼 정렬을 위한 움직임 벡터 기반의 오버레이 계측 알고리즘

이 현 철[†] · 우 호 성^{††}

요 약

반도체 제품의 높은 수율을 달성하기 위해서는 정확한 오버레이 계측이 필수적이다. 오버레이 계측 성능은 오버레이 타깃 설계와 측정 방법에 많은 영향을 받는다. 따라서 오버레이 타깃은 성능 개선을 위해 다양한 타깃에 적용할 수 있는 측정 방법들이 요구된다. 본 연구는 이미지 기반의 오버레이를 측정할 수 있는 새로운 알고리즘을 제안한다. 제안하는 측정 알고리즘은 움직임 벡터를 이용하는 방법으로 서브 픽셀 단위의 위치를 추정할 수 있다. 움직임 벡터는 선택된 영역의 픽셀들을 이용하여 다항식 전개를 통해 2차 방정식의 모델을 생성한다. 그 후 모델을 이용하여 서브픽셀 단위의 위치를 추정할 수 있다. 움직임 벡터를 활용한 측정방법은 X축, Y축의 적층 오류를 각각 계산하는 기존 상관계수 기반의 측정방법과는 달리 한 번에 모든 방향의 적층 오류를 계산할 수 있다. 따라서 X축과 Y축의 관계를 반영하여 보다 정확한 오버레이 측정이 가능하다. 하지만 기존 상관계수 기반의 알고리즘보다 계산량이 증가하기 때문에 더 많은 연산시간이 사용될 수 있다. 본 연구에서는 기존 방법보다 개선된 알고리즘을 제시하는 것이 아닌 새로운 측정 방법의 방향을 제안하는 것에 목적을 두고 있다. 실험 결과를 통해 기존 방법과 유사한 정밀도의 측정 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

키워드 : 오버레이, 이미지 기반 오버레이, 오버레이 타깃, 반도체, 오버레이 계측 알고리즘, 움직임 벡터

1. 서 론

산업의 쌀이라고 불리는 반도체는 고성능/저전력/소형화로 발전하게 되면서, 더 작고 복잡한 회로로 구성되고 있다. 즉, 미세화에 따라 공정 난이도가 기하급수적으로 높아지고

있으며, 수율 향상을 위한 계측 및 검출(Metrology & Inspection, MI)에 대한 요구가 높아지고 있다[1].

MI 기술 분야가 차지하는 비중이 점차적으로 증가하여 현재 제조공정과 계측공정을 포함한 전체 공정에서, 계측공정이 차지하는 비율이 45%를 상회하고 있다. S전자는 2015년 기술 포럼에서 기존 8대 공정에 MI 공정을 추가하였다. 즉, 품질 유지관리를 위한 측정 및 검사공정을 포함한 공정으로 확대한 것이다[2].

반도체의 높은 수율을 달성하기 위해서는 무엇보다도 노광 공정에서 오버레이 측정이 중요하다. 오버레이는 반도체 제조 공정상의 회로 패턴들이 적층되는 과정 속에서 이전 공정

※ 이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1G1A1007678).

† 비 회 원 : ㈜오로스테크놀로지 책임연구원

†† 정 회 원 : 한국방송통신대학교 이터닝학과 조교수

Manuscript Received : April 15, 2022

First Revision : May 31, 2022

Accepted : July 13, 2022

* Corresponding Author : Woo Ho Sung(hughwoo@knu.ac.kr)

회로패턴과 현재 공정 회로 패턴 간의 수직 방향 정렬도를 의미한다[3]. 구체적으로 실리콘 웨이퍼 위에 형성되는 반도체 칩을 제조하기 위해 서로 다른 여러 종류의 층들이 수직적으로 적층 된다. 회로 패턴은 식각공정을 통해 설계에 따른 일정한 무늬 모양을 만들어 간다. 이때, 적층되면서 만들어지는 무늬들은 일정한 설계법칙에 따라 정렬상태를 유지해야 한다.

계측 공정은 회로 패턴들이 정확하게 정렬되었는지 확인하는 역할을 하며, 그 값을 수치화 혹은 정량화한 것이 바로 오버레이 예산(Budget)이다. 오버레이 예산은 정렬에 대한 최소한의 마진이라고 볼 수 있다. 예를 들어 반도체 회로 선폴을 의미하는 디자인 노드가 20nm일 때 오버레이 예산은 1/6정도인 약 3.3nm가 되며, 이 정도를 제어할 수 있어야 노광이 정확하게 정렬되었는지 확인할 수 있다. 계측 공정에서 사용되는 오버레이 계측은 오버레이 예산을 제어해야 함으로 더 작은 값의 예산이 필요하게 된다. 이것을 계측 예산이라 부르며 오버레이 예산의 1/8정도인 약 0.4nm를 필요로 한다. 예를 들어 디자인 노드가 20nm일 때 오버레이 예산은 3.3nm의 제어가 필요하고 보정 및 계산을 위해 계측 예산인 0.4nm의 제어가 필요하게 된다. 즉, 이와 같은 한계를 극복하기 위해 다양한 시도와 연구가 필요한 상황이다.

오버레이 계측 장비 혹은 측정 방법은 광학 시스템을 이용한 이미지 기반의 오버레이 계측 방법(Image Based Overlay, IBO)과 회절 현상을 이용한 오버레이 계측 방법(Diffraction Based Overlay, DBO)으로 나뉜다. IBO는 상하부 패턴이 겹치지 않게 특수 디자인된 오버레이 타깃을 활용한다. 각 패턴 중심으로 계산한 뒤 중심 값 차이를 이용해 오정렬을 계측한다. DBO는 상하부 간에 특정 패턴이 겹치는 오버레이 타깃을 사용한다. 회절 현상에 의한 층간 오정렬을 유추해 계측한다[4]. DBO는 느린 대신 더 정밀하다는 장점이 있어서 선폴이 좁아지는 D램에서 활용도가 높아지고 있다. 하지만 속도가 느리고 타깃 설계에 대한 제한사항 때문에 특수한 층에만 사용이 가능하다. 이런 이유로 DBO는 전체 계측 공정에서 IBO에 비해 비중이 낮게 사용되고 있다. 결국 IBO는 DBO에 비해 정확도가 떨어지는 단점을 극복하기 위해 많은 연구들이 진행되고 있으며, 무아레 효과(Moire Effect)를 활용한 방법이 그중 하나의 방법이다[5-7].

IBO는 광학 시스템을 통해 측정 데이터를 얻게 된다. 때문에 측정 결과는 광학 설계 및 기술에 많은 영향을 받는다. 현재 사용 광학 시스템은 해상도에 따른 물리적 한계를 가지고 있다. 결국 반도체 공정이 복잡해지고 단차가 증가함에 따라 광학 시스템만으로는 그 흐름을 따라가기 어렵다. 본 논문에서는 측정 알고리즘을 통해 이런 물리적인 한계를 극복하기 위해 이미지 기반의 새로운 계측 알고리즘을 제시하여 반도체 오버레이 연구 활성화에 기여하고자 한다.

이미지 기반의 오버레이 측정 알고리즘은 이미지를 처리하기 위해 광학 해상력 이외의 자료구조가 갖는 한계를 해결해야 한다. 이는 연속성을 가지지 못하는 이산적인 디지털 정보

로부터 매우 정밀한 수치를 측정해야 하는 기술적 과제를 내포하고 있다. 이를 위해 이미지의 픽셀 변화량을 측정하는 방법인 움직임 벡터(Motion Vector)를 활용한다[8]. 또한, 제안된 측정 알고리즘을 사용하기 위한 새로운 타깃을 설계하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련 연구를 설명한다. 3장에서는 제안하는 오버레이 측정 방법에 대한 설명을 한 뒤 4장에서는 제안하는 측정 방법에 맞는 타깃을 설계한다. 5장에서는 실험을 통해 제안된 측정 방법의 테스트 결과와 타당성을 증명하고 5장에서 결론을 맺는다.

2. 관련 연구

2.1 오버레이 타깃과 계측

노광 공정에서 웨이퍼에 새겨지는 실제 패턴을 볼 수 없기 때문에 관측 가능한 측정용 패턴을 제작해야 한다. 이 패턴을 오버레이 타깃이라고 부른다. 오버레이 타깃의 패턴은 층간 오정렬을 측정하는 기능만하며, 반도체 회로 패턴에 영향을 주지 않기 위해 스크라이브 라인(Scribe-lane)에 새겨지게 된다. 스크라이브 라인은 패턴이 형성된 웨이퍼 상의 칩과 칩 사이의 간격으로 약 100um 폭의 직선 형태의 경계선을 의미한다.

일반적으로 가장 많이 사용되는 오버레이 타깃의 예는 Fig. 1과 같다.

오버레이 타깃은 상부층 패턴과 하부층 패턴으로 나누어서 각각 별도로 웨이퍼에 노광되어 진다. 현재 우수한 계측방법으로 가장 많이 사용되는 오버레이 타깃은 AIM(Advanced Imaging Metrology)으로, Fig. 1의 (c)와 같이 안쪽 패턴은 상부 층에서 노광된 패턴, 바깥쪽 패턴은 하부 층에서 노광된 패턴을 나타낸다[11].

일반적으로 고배율의 카메라로 촬영한 타깃 영상의 중심점을 기준으로, 대칭되는 패턴 비교를 통해 변화량을 계산하는 방법을 활용한다. 즉, 타깃이 갖는 오버레이 적층 오차가 얼마나 되는지를 측정할 수 있게 된다. 이와 관련하여 상관계수를 분석하여 오버레이 정확도를 높이는 방법[12, 13]이 있으며, 오버레이 계측의 성능을 높이기 위해 오버레이 측정 품질 지수화 방법[14, 15], 푸리에 변환을 이용한 위치 추정 방법[16, 17], 머신 러닝 알고리즘을 이용한 오버레이 성능을 높이는 방법[18] 등이 있다.

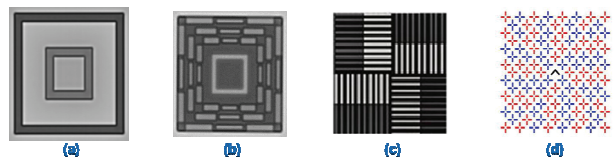


Fig. 1. Overlay Target Design

- (a) Box in Box[9], (b) AuroKey[10],
(c) AIM[11], (d) Blossom[12]

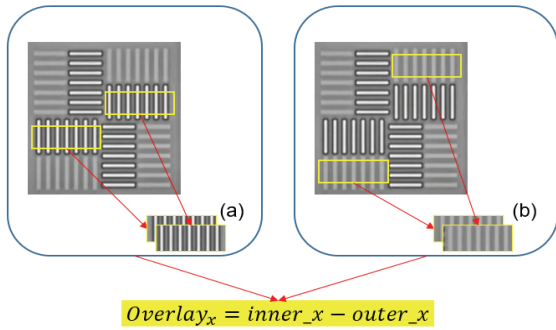


Fig. 2. AIM Target Measurement
 (a) Calculation Inner Pattern COG
 (b) Calculation Outer Pattern COG

Fig. 2는 AIM에서 오버레이를 측정하는 방법의 예이다. 왼쪽은 상부층(Outer Pattern)의 중심점 변화량(Center Of Gravity, COG)을 측정하는 과정(a)을, 오른쪽은 하부층(Inner Pattern)의 중심점 변화량을 측정하는 과정(b)을 보여주며, 상부층과 하부층의 중심점 변화량의 차이가 오버레이 값이 된다.

오버레이 측정은 Fig. 3과 같이, 크게 4가지 절차로 구분될 수 있다. 첫 번째 Select ROI는 비교할 영역을 선택하는 단계(a)이다. 두 번째 Dimension Reduction은 선택된 영역의 2차원 데이터를 1차원 데이터로 투영하는 단계(b)이다. 세 번째 Compute Correlation Coefficient는 각각의 투영된 1차원 신호 데이터들의 상관계수를 계산하는 단계(c)로, 계산된 상관계수 값을 이용하여 타겟의 중심점 변화량을 구할 수 있다. 네 번째 Numerical Analysis는 계산된 이산적인 상관계수 값을 사용하여 곡선 적합(Curve Fitting)을 통하여 미세한 변화량을 계산하는 단계(d)이다. 이와 같은 과정을 통해 상관계수 값이 최대가 되는 위치를 찾고, 두 영역의 서브픽셀 단위의 오차를 계산할 수 있다. 웨이퍼에는 여러 개의 오버레이 타겟들이 존재하며, 그 타겟들을 이용하여 웨이퍼의 전체 변화 값을 측정하게 된다. 이런 오버레이 측정은 기술적으로 어려운 과제를 내포하고 있다. 이미지는 픽셀이라는 단위를 사용하며, 카메라 해상도에 따라 대략 1픽셀당 80nm의 크기를 갖는다. 즉, 이미지로 측정할 수 있는 측정

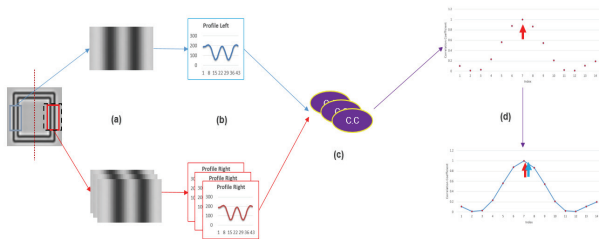


Fig. 3. Conventional Method
 (Correlation Coefficient based Method)
 (a) Select ROI, (b) Dimension Reduction,
 (c) Compute Correlation Coefficient, (d) Numerical Analysis

오차의 한계가 80nm라는 것을 의미한다. 수율을 높이기 위해서는 더 작은 nm 단위의 크기를 측정할 수 있는 방법이 필요하며, 이런 기술적 한계를 극복하기 위해 수치해석이라는 수학적 기법을 사용한다.

2.2 Motion Estimation

움직임 추정이란 Fig. 4와 같이 영상에서 밝기 패턴의 분포를 이용하여 지역적으로 물체들의 이동 정보를 추정하는 방법이다[8]. 추정된 값을 움직임 벡터라고 부르며 영역별 계산된 움직임 벡터 값을 이용해 전체 영상의 변화량을 측정할 수 있다. 이미지는 3차원 공간의 정보를 투영하여 2차원의 데이터로 변환된다. 이때, 데이터의 손실이 필연적으로 발생하게 되며, 손실로 인한 차이로 실제 변화량과 동일한 변화 값을 이미지에서 찾을 수는 없게 된다. 따라서 실제 변화 값을 추정하기 위해 이미지의 주변 값들을 이용하여 근사화하는 방법을 활용하게 된다.

이미지 내의 객체에 움직임 패턴은 객체 자체가 움직이거나 카메라의 움직임으로 인해 발생하게 된다. 이와 같은 상황에서 움직임 추정을 계산하는 방법 중 하나로 다항식 전개를 활용하는 방법이 존재한다[19]. 다항식 전개의 필수적인 가정은 비교 대상의 주변 픽셀 밝기 역시 비슷한 움직임을 가져야 된다는 것이다.

오버레이 측정 시, 다항식 전개를 활용하기 위해서는 타겟 데이터들을 2차원 신호의 함수로 처리해야 한다. 각각의 픽셀 값들은 Equation (1)과 같이 사용된다.

$$x = (x, y)^T \tag{1}$$

각각의 픽셀 값들은 Equation (2)와 같이 2차 방정식으로 근사화 할 수 있다.

$$f(x) \sim x^T Ax + b^T x + c \tag{2}$$

Equation 2의 변수들은 Equation (3)과 같이 A는 2x2 행렬, b는 2x1 벡터, c는 상수로 나타낼 수 있다.

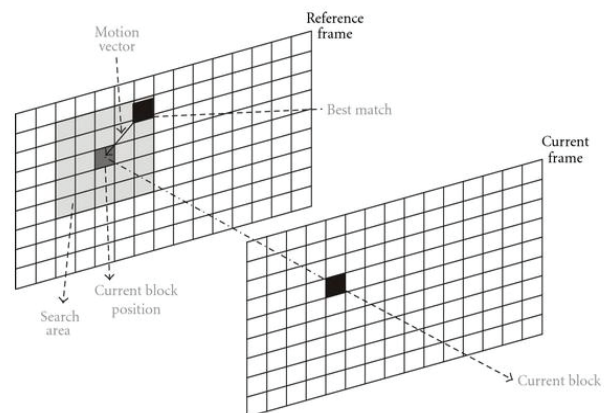


Fig. 4. Motion Estimation

$$c = r_1, \quad b = \begin{pmatrix} r_2 \\ r_3 \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} r_4 & \frac{r_6}{2} \\ \frac{r_6}{2} & r_5 \end{pmatrix} \quad (3)$$

2차 다항식의 계수가 정해진 후에 상기 방정식은 Equation (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$(x, y)A \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + b^T \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + c = r_1 + r_2x + r_3y + r_4x^2 + r_5y^2 + r_6xy \quad (4)$$

즉, 다항식 전개 과정은 직교 좌표계의 2차원 신호 공간을 기본함수 공간으로 변환하는 것을 의미한다. 2차원 신호가 기본함수 공간(1, x, y, x², y², xy)인 6차원 신호로 변환되며, 결국 하나의 픽셀 값을 2차 방정식을 통해 6개의 계수로 나타낼 수 있다[20].

r₁ ~ r₆의 계수 값은 하나의 픽셀을 표현하는 특징 값이 될 수 있다. 하지만 하나의 픽셀 값으로 6개의 미지수를 계산하는 것은 불가능하므로 주변의 픽셀과 함께 계산된다. 이를 통해 하나의 픽셀을 대표하는 값을 생성하게 된다. 결론적으로 Ax = B의 방정식으로 문제를 해결할 수 있으며, 픽셀 하나에 대한 6개의 계수 값인 x값을 산출할 수 있다. 가중치를 산출하기 위해서 특정 픽셀 기준으로 주변 범위를 지정하게 된다. 그 값으로 지정된 영역은 동일한 가중치가 적용되는 것이 아닌 특정 픽셀 점 기준에서 멀어질수록 값의 가중치를 낮추는 방법을 사용하게 된다. 이렇게 모든 픽셀에 대한 계수 값을 산출하게 되면 픽셀 단위로 6개의 값을 가지는 하나의 큰 행렬 데이터가 생성된다. 두 이미지의 큰 행렬 데이터를 이용하여 각 픽셀의 미세한 변화량을 추정할 수 있게 된다.

3. 제안하는 오버레이 측정 방법

3.1 Motion Vector Overlay Measurement (MVOM)

본 연구는 움직임 벡터를 이용하여 오버레이를 측정할 수 있는 알고리즘인 MVOM(Motion Vector Overlay Measurement)을 제안한다. MVOM은 일부 패턴 영역을 선택하여 비교하는 방식과 모든 패턴 영역을 비교하는 방식들을 모두 지원할 수 있다. 특히, 움직임 벡터를 활용한 측정 방법은 기존보다 확장성 있는 타깃을 설계할 수 있는 기회를 제공할 수 있다.

움직임 벡터 계산은 Fig. 5와 같이, 3가지 단계로 구분할 수 있다.

1단계인 Select ROI는 비교할 영역을 선택하는 단계(a)이다. 2단계인 Compute Motion Vector는 선택된 두 영상 간의 움직임 벡터들을 계산하는 단계(b)이다. 마지막 3단계인 Analysis Motion Vector는 계산된 움직임 벡터의 값들을 이용하여 최종 변화량을 계산하는 단계(c)이다. 최종 변화량은 움직임 벡터 값들의 평균을 이용하거나 변화 모델을 이용한다. 만약 전체 영역을 기준으로 비교할 경우 비교할 영역을 선택하는 Select ROI 단계를 생략하고 수행하게 된다.

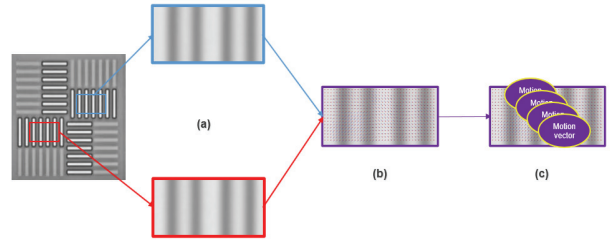


Fig. 5. Motion Vector Calculation Process

- (a) Select ROI, (b) Compute Motion Vector,
- (c) Analysis Motion Vector

MVOM의 측정 방법은 Fig. 6과 같다. 왼쪽은 상부층(Inner Pattern), 오른쪽은 하부층(Outer Pattern)의 중심점 변화량 계산 과정을 보여준다. 계산된 상부층과 하부층의 중심점 변화량의 차이를 이용하여 최종 오버레이를 측정할 수 있다. 이때, 각각의 중심점 변화량 계산은 움직임 벡터를 이용하게 된다.

MVOM은 이미지의 각 밝기값을 다항식 확장 알고리즘으로 변환하여 영상 전체의 변화량을 추정하게 된다. 다항식 확장 알고리즘은 항상 비교할 대상이 존재해야 하며, 사용자가 선택한 영역과 동일한 값을 가지는 영역이 비교 대상으로 설정된다. 만약 AIM 타깃이라면, 비교 대상 영역은 선택된 영역에 대칭이 되는 영역이 될 것이다.

Fig. 7은 대칭이 되는 두 영역(빨간 사각형 영역, 초록색 사각형 영역)의 움직임 벡터를 계산한 결과를 보여준다. 우측 상단 그래프는 선택된 영역의 밝기(Intensity)를 비교한 값이다. 초록색 영역을 기준으로 빨간색 영역이 왼쪽으로 미세하게 움직인 것을 나타내며 움직임 벡터 결과 또한 동일하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

MVOM은 패턴의 모양에 의존적이지 않다. 즉, AIM 타깃의 특징인 바(Bar) 모양의 주기적 패턴일 필요는 없다. AIM 타깃의 경우 상관계수를 이용한 알고리즘에 최적화되어 있는 타깃이기 때문에 바의 패턴이 주기적이고, X축과 Y축을 각각 계산하는 단점이 존재하지만 움직임 벡터를 이용한 알고리즘의 경우는 각각 계산할 필요가 없으며 바의 패턴 또한 주기적일 필요가 없다.

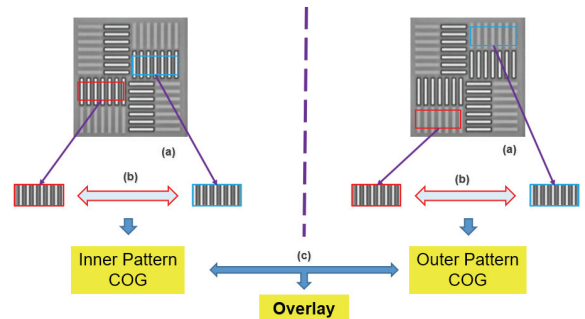


Fig. 6. MVO Measurement

- (a) Select ROI, (b) Calculation COG(Motion Vector),
- (c) Calculation Overlay

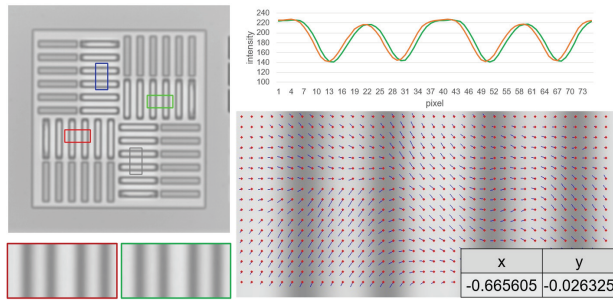


Fig. 7. Motion Vector Calculation

Fig. 7에서 움직임 값들을 살펴보면, 좌측으로 움직이고 있다는 것을 확인할 수 있다. X축 방향은 모두 유사한 값들이 나타나지만 Y축 방향은 일정하지 않는 값들이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 선택된 영역의 패턴이 X축의 변화만을 가지고 있기 때문이다. Y축의 변화량은 파란색 영역 혹은 갈색 영역을 비교하여 계산할 수 있다. X축과 Y축 변화량을 하나의 패턴에서 찾기 위해서는 X축 Y축 변화가 동시에 포함되는 타깃 패턴을 설계하면 가능하다.

실험 결과를 통해 MVOM이 미세한 변화량을 정상적으로 측정하고 있다는 것을 확인할 수 있었다. 본 논문에서는 MVOM이 X축, Y축을 동시에 계산하기 위한 최적화된 타깃 설계를 4장에서 소개한다.

3.2 기존 측정 방법 vs. MVOM 측정 방법

기존의 측정 방법과 MVOM의 측정 방법에 대한 주요 절차는 Fig. 8과 같다.

기존 측정 방법은 선택된 영역에서 상관 계수 값을 이용하여 변화량을 계산한다. 반면에 MVOM은 움직임 벡터 값을 이용하여 변화량을 측정한다. 상관계수 값을 사용하기 위해서는 검색 영역이 필요하기 때문에 비교 대상을 선택할 때 더 넓은 영역을 선택해야 한다. 하지만 움직임 벡터 값을 활용할

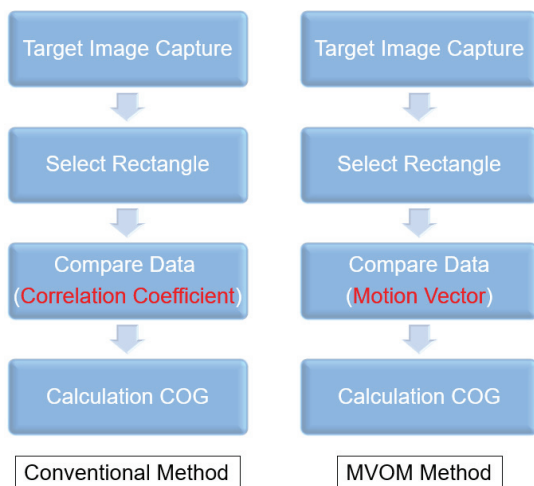


Fig. 8. Conventional Method vs. MVOM Method

경우 선택 영역과 대칭이 되는 영역만 있으면 되기 때문에 좀 더 직관적이고 이해하기 쉽게 변화량을 측정할 수 있다. 더불어, 선택된 영역 안에서 픽셀 단위로 분할하여 움직임 벡터를 계산하기 때문에 자세한 분석이 가능해지며 다양한 타깃 디자인을 적용할 수 있다는 장점이 있다.

4. 제안하는 오버레이 타깃 디자인

오버레이를 계산하기 위해서는 상부층과 하부층 각각 독립적으로 중심점 변화량을 계산해야 한다. 독립적인 측정을 허용하기 위해서는 오버레이 타깃들은 중첩되지 않아야 한다. 따라서 오버레이 타깃들은 패턴의 면적 및 비 중첩 요구 조건에 의해 영역에 대한 효율적인 관리가 요구된다. 또한, 오버레이의 정밀도를 개선시키려면 많은 샘플링 데이터를 요구하게 된다. 많은 샘플링 데이터는 결국 면적에 비례하게 된다. 즉, 패턴 면적 크기와 측정된 정밀도 사이에는 밀접한 연관성을 가지고 있다[9].

본 논문에서는 위와 같은 제약사항을 극복하기 위해 교차점 패턴의 타깃을 예시로 제안한다. 제안하는 교차점 패턴은 기존의 BIB 및 AIM 타깃보다 제한된 공간을 보다 효과적으로 사용할 수 있다. 그 이유는 독립적으로 구분되어 있던 X축 패턴과 Y축 패턴이 동일한 공간을 함께 사용하고 있기 때문이다.

Fig. 9의 교차점 패턴은 각각의 격자가 움직임 벡터를 찾을 수 있는 중심점 역할을 하기 때문에 X축과 Y축을 한 번에 계산할 수 있는 MVOM에 최적화된 타깃이라고 볼 수 있다.

측정 방법은 Fig. 9의 왼쪽과 같이 점진적으로 나누어 측정될 수도 있으며, 오른쪽과 같이 3개의 섹터로 측정될 수 있다. 각각의 층(Current Layer, Reference Layer)은 타깃의 중심점 변화량을 계산하게 되고 그 차이를 통해 오버레이 값을 계산한다. 즉, 선택된 영역과 대칭이 되는 영역 비교를 통해 기준이 되는 타깃의 중심 위치가 어떻게 변화가 나타났는지 측정하여 오버레이를 계산할 수 있게 된다.

일반적으로 움직임 벡터를 이용한 변화량 계산은 각 픽셀의 움직임 벡터 값을 기준으로 변화량을 측정하지만 이와 같

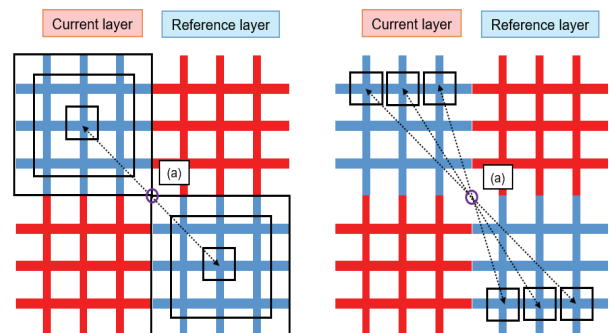


Fig. 9. Proposed Overlay Target Design Simulation
(a) Compute Motion Vector(Folding Center)

은 방법은 각 픽셀이 독립적으로 측정되기 때문에 전체적인 타깃의 움직임을 계산할 때 오차가 발생할 수 있다. 따라서 타깃의 중심점을 기준으로 모든 영역에서 변화량을 측정하는 방법은 이런 오차를 개선할 수 있다. 이 방법을 사용하기 위해 Fig. 9와 같이 대칭이 되는 교차점 패턴을 생성하고 대칭 영역과 비교를 통해 타깃 중심점의 변화량을 계산하게 된다. 각각의 교차점별로 측정하는 방법은 비교 대상이 되는 중심점 샘플이 교차점 수만큼 존재하며 그 교차점들의 움직임 벡터 값들을 이용하여 타깃 전체의 변화량을 계산할 수 있다. 격자 교차점 패턴의 경우 비교 영역을 다양하게 변경하면 더 많은 비교 샘플을 얻을 수 있다는 특징이 있다.

5. Experiment

실험을 위한 환경은 다음과 같이 구축하였다.

첫째, 제안 방법인 교차점 패턴을 이용한 타깃과 AIM 타깃을 선정하였다.

둘째, 제안된 타깃을 장비에서 측정하기 위해 테스트 웨이퍼를 제작하였다.

셋째, 계측을 위한 도구로 Aurostech IBO Tool를 선택하였다.

넷째, 오버레이 타깃 측정 알고리즘은 2.1절에서 설명한 기존 상관계수 기반의 알고리즘과 논문에서 제안하는 MVOM을 적용하였다.

다섯째, 오버레이 계측을 위해 층과 층 사이의 영향을 최소화하였으며, 5번의 반복된 측정 결과를 비교하였다.

Fig. 10은 테스트 구조의 단면과 노광된 격자 교차점 타깃을 나타낸다. 하나의 웨이퍼 안에는 많은 다이(Die)들로 구성되어 있으며 다이와 다이사이에는 스크라이브 레인(Scribe lane)이 존재한다. 오버레이 계측을 위해서 스크라이브 레인에 오버레이 타깃을 삽입하게 된다. 테스트 웨이퍼는 185개의 다이들로 구성되어 있으며, 각 다이마다 교차점 타깃을 5개씩 삽입하였다.

Fig. 11은 현업에서 가장 많이 사용되는 AIM 타깃과 교차점 타깃의 정합 수치이다. 정합 수치는 동일한 알고리즘을 사용하여 측정된 두 타깃의 유사도를 의미한다. 알고리즘은 MVOM을 사용하여 측정된 결과이다.

유사도가 높다는 것은 격자 교차점 타깃의 결과가 신뢰성이 있다는 것을 보여준다. Fig. 11의 왼쪽 그래프는 두 타깃의 중심점 변화량 관계이다. 세로축은 AIM 타깃의 중심점 변화량, 가로축은 교차점 타깃의 중심점 변화량이다. 중심점 변화량은 타깃의 각 상하부 패턴의 대칭 비교를 통해 변화량을 측정된 결과이다. 두 타깃의 R-Square값은 0.961로 높은 정합 수치를 보여주고 있다. 오른쪽 그래프는 두 타깃 간의 중심점 변화량의 차이를 보여준다. 차이 값이 10nm 이하의 변동성을 보여주며, 그 결과 교차점 타깃이 반도체 계측 공정에서 사용하는데 문제가 없음을 확인할 수 있었다.

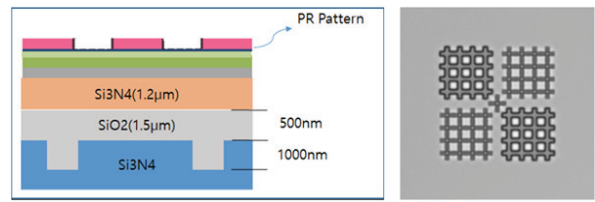


Fig. 10. Practical Layer & Intersection Target

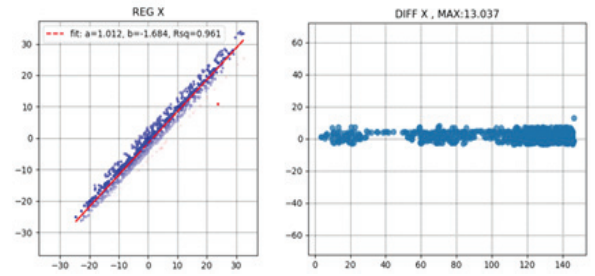


Fig. 11. AIM vs. Intersection Target Matching Test

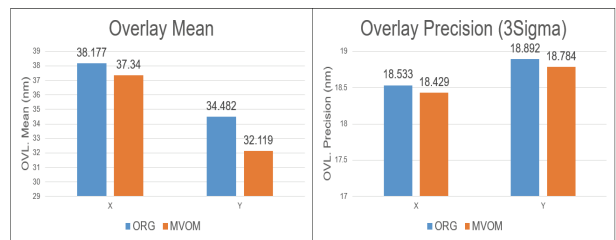


Fig. 12. Overlay Measurement Test Result

Fig. 12는 교차점 타깃을 이용하여 기존 알고리즘과 MVOM 알고리즘의 측정된 오버레이 값들을 비교한 결과이다.

왼쪽 그래프는 각 알고리즘에 대해 웨이퍼에 존재하는 오버레이 타깃들을 측정하여 평균값을 비교한 결과이며, 기존 알고리즘을 기준으로 제안된 알고리즘과의 차이를 나타낸다. 일반적으로 오버레이 추정은 바이어스가 없다고 가정하고 예측을 하게 된다. 미세한 오버레이의 실제 값을 확인하기 위해서는 매우 정밀한 광학 현미경을 사용해야 하는데 그마저도 정확하게 확인하기 어렵기 때문에 반복적으로 측정되는 값을 정답으로 측정 후 그 값을 보정하게 된다. 결국 본 실험에서는 기존 알고리즘으로 측정된 오버레이를 기준으로 평가하여 정확도의 지표로 사용하였다. 기존 알고리즘과 값이 같고 해서 정확도가 높은 것이 아니며, 차이 값의 범위가 크게 벗어났을 경우 문제가 되는 것으로 판단할 수 있다.

오른쪽 그래프는 평균 오버레이 값의 정밀도 결과이다. 즉, 5번 반복 측정된 값으로 계산된 결과이다. 정밀도는 계측기의 안정성을 나타내며, 동일한 오버레이 타깃 측정 결과의 표준 편차 3배로 정의된다. 오른쪽 그래프의 X축과 Y축의 정밀도 값을 살펴보면, 기존 알고리즘 보다 제안된 방법이 좀 더 안정적으로 측정하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 Fig. 12의 왼쪽 그래프의 오버레이 평균값은 기존 알고리즘에 비해 다

소 낮은 수치를 나타내었다. 기존 알고리즘 측정 결과를 대조군으로 가정한다면, MVOM은 다소 차이를 보인다고 할 수 있지만 그 크기가 2nm 이하로 작기 때문에 잘못된 값이라고 판단할 수 없다. 결국 오버레이 측정값의 변화가 줄어들면서 오버레이 정밀도가 향상되었을 가능성이 존재하지만 그 차이가 미미하며 기존 알고리즘과 유사한 결과를 얻었다고 볼 수 있다.

이와 같은 결과는 MVOM이 한번에 X축과 Y축의 변화량을 계산하기 때문에 변화에 대한 평균치가 감소하는 현상이 발생하는 것으로 보인다. MVOM이 기존 알고리즘보다 정확성은 미세하게 낮을 수 있지만, 계측의 가장 중요한 요소인 안정성을 지킬 수 있다는 것으로 볼 수 있다. 따라서 오버레이 값을 일정하게 측정하였느냐가 알고리즘의 성능을 판단하는 중요한 기준이라면, MVOM 알고리즘은 충분한 가능성을 보여주었다고 할 수 있다.

6. 결 론

각 반도체 제조공정에는 공정별로 전문화된 장비를 사용한다. 장비는 가공, 생산(조립) 장비뿐 아니라 검사단계까지를 포함한다. 반도체 장비 산업은 기술 집약형 산업으로 기술 발전 속도가 빠르고 기술 수명이 짧아 급속한 혁신이 요구된다. 고가의 자본재 산업으로 투자 부담이 크며, 신뢰성 문제로 인하여 진입 장벽이 매우 높다.

학문적인 측면에서도 반도체 관련 국내 연구는 매우 저조한 수준이다. 관련 연구들은 구체적인 기술을 공개하는 것을 기피하며, 연구 환경을 조성하기 어렵기 때문에 대학교 및 일반 연구자들이 접하기 어려운 게 현실이다. 기업 측면에서 수행되는 연구의 경우 특허나 영리로 귀결되기 때문에 비공개로 수행되는 것이 관행이다.

본 논문에서는 기존 오버레이 측정 방법에서 벗어나 새로운 방식의 오버레이 측정 방법과 교차점 패턴 설계를 제안하였다. 제안하는 측정 방법은 기존 방법보다 정밀도 개선 효과를 얻을 수 있었다. 하지만 연산량의 증가로 인해 시간적인 면에서 차이를 발생시켰다.(기존 : 50ms, 제안알고리즘 : 400ms) 결국 제안하는 알고리즘의 앞으로의 과제는 시간을 줄이는 연구가 될 것이다.

기존 오버레이 측정 연구들은 상관계수를 활용한 측정 방법이었던 제안된 방법은 다항식 전개를 통한 2차 방정식 모델을 이용한 측정 방법이다. 이런 방법은 오버레이 측정 분야에서 누구도 시도하지 않은 방법으로 반도체 공정에서 컴퓨터 비전 분야의 소프트웨어 융합 연구가 필요하다는 신호가 될 수 있다. 이는 학문적, 산업적으로 큰 기여를 할 수 있을 것으로 사료된다. 마지막으로 본 논문의 산출물은 기초 연구이며, 많은 개선이 필요하지만 새로운 측정 알고리즘을 공개함으로써 반도체 오버레이 연구 활성화에 기여하기를 기대한다.

References

- [1] M. S. Lee and Y. H. Shim, "Study on flow balance analysis for semiconductor photo inline equipment using simulation modeling approach," *Korean Journal of Logistics*, Vol.20, No.2, pp.63-74, 2012.
- [2] KIPOST. (2019. Aug. 27). 'Semiconductor 9 major processes' measurement and inspection (MI) goes beyond the barriers of performance and throughput. [Internet], <https://www.kipost.net/news/articleView.html?idxno=201664>
- [3] N. Sullivan and J. Shin, "Overlay metrology: The systematic, the random and the ugly," In: *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics. pp.502-512, 1998.
- [4] J. Bischoff, R. Brunner, J. J., Bauer, and U. Haak, "Light-diffraction-based overlay measurement," In: *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XV*. SPIE, pp.222-233, 2001.
- [5] D. Van den Heuvel et al., "Moiré effect-based overlay target design for OPO improvements," *Proceedings SPIE 11611, Metrology, Inspection, and Process Control for Semiconductor Manufacturing XXXV*, 1161125, 22 Feb. 2021.
- [6] C. W. Wong et al., "Self-referenced and self-calibrated MoiréOVL target design and applications," *Proceedings SPIE 11611, Metrology, Inspection, and Process Control for Semiconductor Manufacturing XXXV*, 1161122, 22 Feb. 2021.
- [7] Y. Hagio et al., "Overlay improvement for semiconductor manufacturing using Moiré effect," In: *2020 31st Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC)*. IEEE. pp.1-5, 2020.
- [8] G. Farneback, "Polynomial expansion for orientation and motion estimation," PhD Thesis. Linköping University Electronic Press., 2002.
- [9] M. Adel et al., "Optimized overlay metrology marks: Theory and experiment," in *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol.17, No.2, pp.166-179, May 2004, doi: 10.1109/TSM.2004.826955.
- [10] 장현진, 하호철, 이길수, 2017. WO2017200159A1. Overlay Mark, and overlay Measurement method and semiconductor device manufacturing method using same, accessed <https://patents.google.com/patent/WO2017200159A1/en>
- [11] Overlay marks, methods of overlay mark design and methods of overlay measurements, KR2016,
- [12] C. P. Ausschnitt et al., "Blossom overlay metrology implementation," In: *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXI*. SPIE. pp.167-172, 2007. (Blossom)

[13] S. NakaJima, Y., Kanaya, A., Takahashi, K., Yoshida, and H. Mizutani, "Improving the measurement algorithm for alignment," In: *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XV*. SPIE. pp.572-582, 2001.

[14] R. Moddemeijer, "On the determination of the position of extrema of sampled correlators," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol.39, No.1, pp.216-219, Jan. 1991, doi: 10.1109/78.80788.

[15] D. Kandel, V. Levinski, N. Sapiens, G. Cohen, E. Amit, D. Klein, and I. Vakshtein, "Overlay accuracy fundamentals," *Proceedings SPIE 8324, Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXVI*, 832417 (5 Apr. 2012).

[16] G. Cohen, E. Amit, D. Klein, D. Kandel, and V. B. Levinski "Overlay quality metric," *Proceedings SPIE 8324, Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXVI*, 832424 (5 Apr. 2012).

[17] S. Zhou, Y. Fu, X. Tang, S. Hu, W. Chen, and Y. Yang, "Fourier-based analysis of moiré fringe patterns of superposed gratings in alignment of nanolithography," *Optics Express*, Vol.16, No.11, pp.7869-7880, 2008.

[18] J. Petit, P. Boher, T. Leroux, P. Barritault, J. Hazart, and P. Chaton, "Improved CD and overlay metrology using an optical Fourier transform instrument. In: *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XIX*. SPIE. pp.420-428, 2005.

[19] B. Ophir et al., "Machine learning for Tool Induced Shift (TIS) reduction: An HVM case study," *Proceedings SPIE 11611, Metrology, Inspection, and Process Control for Semiconductor Manufacturing XXXV*, 116110E (22 Feb. 2021).

[20] Basha, S. Mahaboob and M. Kannan. "Literature survey on motion estimation techniques," *International Journal of Engineering and Technology*, Vol.7, pp.394, 2018.

[21] H. Lee, S. Lee, and O. Choi, "Improved method on image stitching based on optical flow algorithm," *International Journal of Engineering Business Management*, Vol.12, 1847979020980928, 2020.



이 현 철

<https://orcid.org/0000-0003-2089-2010>

e-mail : deletenim@naver.com

2012년 아주대학교 지식정보보안학과(석사)

2011년 ~ 2019년 QURAM 연구소

책임연구원

2020년 ~ 2021년 (주)한화시스템 연구원

2021년 ~ 현 재 (주)오로스테크놀로지 책임연구원

관심분야 : 반도체 오버레이 계측, 컴퓨터 비전, 이미지 프로세싱



우 호 성

<https://orcid.org/0000-0001-8059-9524>

e-mail : hughwoo@knou.ac.kr

2020년 고려대학교 컴퓨터학과(박사)

2020년 ~ 2021년 고려대학교

정보창의교육연구소 연구교수

2021년 ~ 현 재 한국방송통신대학교

이러닝학과 조교수

관심분야 : 데이터마이닝, 컴퓨터 비전, 반도체 오버레이 계측, e러닝