

# 웨이퍼 스텝퍼에서의 기준정렬을 위한 2차원 버니어 패턴의 성능예측

이종현\*, 장원익, 최부연, 장기호, 김도훈, 유형준

한국전자통신연구소 반도체연구단 공정장비연구부

## 요약(ABSTRACT)

New methodology for fiducial alignment is proposed to improve the alignment accuracy in wafer steppers. The positioning error is detected by PSD(Position Sensitive Detector) when 2-dimensional vernier patterns on a reticle are projected on the fiducial marks of wafer stage. The width and period of vernier patterns are determined to get the highest S/N ratio for the exposure wavelength 248.4nm of KrF excimer laser. This new method has an advantage of higher accuracy and faster alignment over the conventional one.

### 1. 서론

스텝퍼(stepper)는 반도체 제작공정 중 노광(exposure) 공정을 수행하는 핵심장비이다. 이 노광장비의 주요성능중의 하나인 중첩정확도(overlay accuracy)에 대해서는 최소선폭의 1/3 - 1/5 정도를 요구하고 있으므로, 반도체 회로의 미세화에 따라 더욱 엄밀한 규격이 필요하게 된다. 예를 들어 256M DRAM의 제조에서는 최소선폭이 0.25  $\mu\text{m}$ 이므로 중첩정확도는 최소한 0.08 $\mu\text{m}$  ( $1\text{m} + 3\sigma$ ) 이하가 확보되어야 한다.

중첩정확도를 측정하기 위해서는 정렬마크 및 측정용 1차 패턴을 웨이퍼위에 새기는 첫번째 공정과 새겨진 정렬마크를 기준으로 하여 다음의 2차 패턴을 만드는 두번째 공정이 필요하다[1]. 이 두가지 공정이 같은 노광장비에서 이루어지는 경우(within machine)와 다른 장비에서 이루어지는 경우(between machines)의 두 중첩정확도는 일반적으로 다르며, 이는 투영광학계의 왜곡(distortion) 특성과 stage의 scaling 및 적교도의 차이에 주로 기인한다.

한 노광장비내에서 공정이 이루어진 웨이퍼의 중첩오차는 오차의 특성을 고려할 때, 노광영역(exposure field) 내에서의 중첩오차인 영역내 오차(intra-field overlay error)와 각 노광영역의 중심을 나시 한점으로 하여 전체 웨이퍼를 보았을 때의 중첩오차인 영역간 오차(inter-field overlay error)로 분류된다. 영역내 오차는 노광영역이 달라지더라도 원리적으로 같은 형태의 오차분포를 보여주며, 그 요인으로는 투영광학계의 배율오차 및 레티클의 정렬오차등을 들 수 있다. 반면 영역간 오차는 노광영역에 따라 서로 다른 오차형태를

보여주며, 웨이퍼 정렬평하게 및 구동계의 반복위치정밀도등이 그 원인으로 작용한다.

<표 1>에서는 이와 같은 분류에 따라 노광장비의 각 모듈이 중첩정확도에 영향을 주는 정도를 정성적으로 살펴본 것이다. <표 2>는 중첩정확도의 구체적인 예로서, 본 연구소에서 개발한 KrF 엑시머 레이저 스텝퍼로 수행한 실험결과를 보인 것이다. <표 2>에서 영역내 오차가 영역간 오차보다 크다는 것을 고려하면, 중첩정확도의 개선을 위해서는 영역내 오차를 먼저 수정할 필요가 있다. 이를 위해서는 <표 1>에 보인 바와 같이 active FM(Fiducial Mark)을 이용하여 레티클의 위치오차를 우선적으로 보정해야 함을 알 수 있다.

본 연구에서는, 이와 같은 중첩정확도의 분석으로부터 중첩정확도의 개선방향을 도출하고자 한다. 도출된 새로운 정렬방법에 대해서는 기존의 정렬시스템과 특성을 비교분석한 후, 이의 설계방법 및 웨이퍼 스텝퍼에 실제로 사용하기 위해 최적화된 결과를 보인다.

### 2. FM 정렬방법 분석

FM 정렬방법은, FM의 패턴면에 측정장치가 위치하여 레티클 정렬패턴에 대한 상(image)을 광학적으로 직접 측정하는 방법(active 정렬)과 FM 패턴을 인식하거나 최절신호를 받음으로써 FM의 위치를 간접적으로 측정하는 방법(passive 정렬)의 두가지로 분류된다. 전자는 레티클 위치의 calibration에 주로 이용되며, 후자는 웨이퍼 정렬계의 위치변동에 따른 기준선 변동(baseline drift)등을 보정할 때 쓰인다.

<표 3>은 상용 엑시머 레이저 스텝퍼에서 사용되는 FM 정렬법의 특징을 비교한 것이다. 항목에 보인 바와 같이 정렬과장은 노광과장과 같은 경우 중첩정확도의 관점에서 유리하나 각 방법이 모두 actinic(정렬과장과 노광과장이 동일)이므로, 이점에서의 차이는 없다. FM 패턴은 일반적으로 제작의 어려움에는 큰 차이가 없으며, 패턴이 다른 경우에는 그에 맞는 정렬 algorithm의 변화를 주면 된다.

레티클의 위치정보를 얻는데 있어서 지금까지의 스텝퍼에서는 aerial image를 scan하여 최대광량이 일어나는 위치를 찾는 algorithm을 많이 사용하고 있다. Aerial image scan에 의한 FM 정렬신호의 검출에는 photo detector를 사용하여, 이로 부터 얻은 각 data는 data acquisition 당시의 노광 intensity 값으로 나누어 에너지 변동량을 보상해줌으로써 보다 정밀한 측정값을 얻을 수 있다. 특히 엑시머 레이저를 광원으로 한 스텝퍼의 경우, 각 pulse의 에너지 변동량이  $\pm 5\%$  정도나 되므로 광 에너지에 의한 data 보정은 필수적이며, 이와 같은 보정을 하더라도 실제의 실험결과를 보면, 이것에 의한 정밀도열화를 일부 관찰할 수 있다[2]. 또한 레티클의 위치오차 측정을 위하여 얻어야 할 data는 광원과 웨이퍼 스테이지가 동기(synchronization)된 x, y의 2 방향 scan data이므로 요구되는 제어시스템이 복잡해진다. Data를 모두 얻는데 걸리는 시간도, 200 Hz의 pulse 형태로 노광광이 나오는 엑시머 레이저의 경우 pulse와 동기되어 data를 읽어야 하므로, 수분이상이 길리게 된다.

본 연구에서는 이와 같은 단점을 극복하기 위하여 새로운 FM 정렬방법을 제안하고자 한다. 즉 기존방법에서 x, y 방향 scan의 필요성은 검출소자로서 photo detector를 사용하는데 기인하므로, 레티클 정렬마크의 x, y 위치오차를 scan없이 직접 읽을 수 있는 2차원 PSD를 대신 사용하는 것이다. 따라서 레티클 정렬마크의 3차원 위치중에서, scan이 필요한 좌표는 홑점위치를 찾기 위한 z방향만 남게 되어, 정렬시간이 단축되며 제어시스템도 보다 간단해진다는 개선 효과를 가진다. 그러나 PSD의 해상도는 보통 수  $\mu\text{m}$ 이므로, 0.05  $\mu\text{m}$  정도의 요구규격을 만족하기 위해서는 20-50배 정도의 해상도 향상 효과를 갖는 FM 정렬패턴이 고안되어야 함을 알 수 있다.

해상도를 향상시키기 위한 일반적인 방법은, 렌즈에 의한 상의 확대[3] 또는 격자(grating)에서의 회절을 이용하여 원하는 위치배율을 얻어내는 것이다[4][5]. 그러나 렌즈에 의한 aerial image의 직접적인 확대는 DUV(Deep Ultra-Violet용) CCD camera와 렌즈계가 필요하며, 이 문제가 해결된다 하더라도 웨이퍼 스테이지에 이의 신축을 위한 큰 공간이 요구된다는 문제점이 있다. 회절을 이용하는 경

우에는 렌즈를 사용하지는 않지만 레티클의 위치정보를 얻기 위한 stage scan이 필요하다는 문제점이 있으므로, scan을 사용하지 않는 방법에는 이를 응용할 수 없다.

반면에, 2차원 vernier를 FM window 패턴으로 사용하면 FM 위치변화에 따라 조명되는 면적이 group으로 이동하는 양용 stage의 scan없이 측정할 수 있다. 이때의 해상도는 vernier 설계에 따라 0.05  $\mu\text{m}$ 까지 얻을 수 있으므로 PSD의 한계해상도 문제도 같이 해결된다. 여기에 적합한 검출소자로는 상용화된 DUV용 PSD를 이용할 수 있으며, 세부적인 설계 및 해석은 다음장에서 다루도록 한다.

### 3. vernier 패턴의 설계

#### 3-1. vernier 설계식

<그림 1>은 vernier 패턴의 원리를 보인 것으로서, 레티클 위에 있는 아들자의 aerial image와 FM위의 이미자가 중첩되는 곳에서 조명이 이루어짐을 알 수 있다. 여기서 주요한 성능변수중의 하나인 해상도(resolution) R은, 이미자, 아들자의 주기를 각각  $P_1, P_2$ 라고 할 때, 다음 (1)식으로 표현된다.

$$R = P_1 - P_2 \quad (1)$$

이때 FM의 실제 이동거리 y에 대한 PSD의 검출위치 Y는 (2), (3)식과 같이 배율  $M_d$  만큼 확대되어 나타나며, <그림 2>에 이것을 도식적으로 나타내었다.

$$M_d = P_i / R \quad (2)$$

$$Y = y \cdot M_d = y (P_i / R) \quad (3)$$

따라서 PSD의 해상도  $R_p$ 는, (4)식과 같이 정렬개의 해상도 요구규격인 R에  $M_d$ 를 곱한 값인  $R_d$ 보다는 작아야 원하는 측정해상도를 얻을 수 있다.

$$R_p < R_d = R \times M_d \quad (4)$$

<그림 2>와 같은 조명형태는, 이미자 및 아들자의 눈금이 계속되는 경우, 주기적으로 반복된다. 이주기  $L_c$ 는 (5)식으로 주어지며, 이것으로부터 vernier pattern의 최대크기에 대한 필요조건이 결정된다.

$$L_c = P_1 \times M_d = P_1 / R \times P_1 = P_1^2 / R \quad (5)$$

또한 이미자와 아들자의 패턴 폭을 각각  $W_1, W_2$ 라고 할 때, <그림 1>에 보인 바와 같이, i가 키짐에 따라  $W_1$ 의 오른쪽 반절과  $W_2$ 의 왼쪽 반절이 해상도 R을 한단위로 하여 어긋나고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 어긋남은 바깥쪽의 패턴일수록 조명 면적을 작아지게 하며, 이때의 조명이 되는 전체 갯수  $N_c$ 와 이에 따른 조명길이  $L_c$ 는 각각 (6), (7)식으로 계산된다.

$$N_e = (W_1/2 + W_2/2) / (P_1 - P_2) \quad (6)$$

$$L_e = N_e \cdot P_1 \\ = (W_1 + W_2) P_1 / 2(P_1 - P_2) \quad (7)$$

다른 주요 성능변수인 측정범위 S를 구하기 위하여, 먼저 window 위에서의 이동거리 S<sub>d</sub>를 구하도록 한다. <그림 3>에서 중앙의 조명면적이 이동할 수 있는 최대길이를 S<sub>d</sub>라고 하면 이값은 (8)식과 같이 표현된다.

$$S_d = L_e / 2 - L_e \quad (8)$$

여기서 FM 측정범위는 S<sub>d</sub>를 M<sub>d</sub>로 나눈 값이며, (8)식에 (5), (7)식을 대입한 후, (8)식이 오른쪽 반면에 대한 것임을 고려하여 2를 곱하면 실제의 전체 측정범위 S는 (9)식으로 주어진다.

$$S = S_d / M_d \times 2 \\ = (L_e / 2 - L_e) / M_d \times 2 \\ = (P_1^2 / R - (W_1 + W_2) P_1 / 2R) / (P_1 / R) \times 2 \\ = P_1 - W_1 - W_2 \quad (9)$$

### 3-2. vernier의 최적화

본 절에서는 <그림 1>에 보인 바와 같은 vernier 패턴에서 PSD로 입사되는 전체 광에너지를 계산하고, 이로부터 정렬신호의 S/N비를 줄이기 위한 입사에너지의 최대화 조건을 유도한다. 현재까지 사용된 주요 설계변수는 P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, W<sub>1</sub>, W<sub>2</sub>의 4개이며, 성능변수는 R과 S의 2개뿐이다. 따라서 설계변수의 수가 성능변수의 수보다 많으므로 입사에너지의 최대화에 대응하는 설계식이 존재할 수 있다.

PSD에 대한 광의 입사원리는 <그림 1>의 (a)와 같으며, 실제의 패턴은 이를 2차 원화한 형상이 될 것이다. 따라서 오른쪽 반면에 조명된 각각의 빔을 모두 더한 총길이를 W<sub>e</sub>라고 하면 전체 조명면적의 합 A는 (10)식이 된다.

$$A = 4 W_e^2 \quad (10)$$

이와 같은 계산은 W<sub>1</sub>이 W<sub>2</sub>보다 크거나 또는 작거나 관계가 없으나 <그림 1>과 동일하게 W<sub>1</sub> > W<sub>2</sub>라고 가정하여 계산한다. 최대 조명크기인 W<sub>2</sub>가 유지되는 조명갯수를 N<sub>t</sub>, 조명크기가 순차적으로 감소하는 조명갯수를 N<sub>d</sub>라고 하면, 각 변수는 (11), (12)식으로 표현된다.

$$N_t = (W_1 - W_2) / R \quad (11)$$

$$N_d = W_2 / R \quad (12)$$

따라서 전체 조명길이 W<sub>e</sub>는 중앙의 W<sub>2</sub>/2와 W<sub>1</sub>의 합으로 표시되며, 여기에 (11), (12)식을 대입하면, 최종적으로 (13)식으로 정의된다.

$$W_e = W_2/2 + \sum_{i=1}^{N_t} W_i$$

$$= W_2/2 + W_2 \cdot N_t + W_2 \sum_{i=1}^{N_t} W_i \\ = W_2/2 + W_2(W_1 - W_2)/R + W_2 \sum_{i=1}^{N_t} (N_d - i)/N_d \\ = W_2/2 + W_2(W_1 - W_2)/R + W_2(N_d + 1)/2 \\ = W_2/2 + W_2(W_1 - W_2)/R + W_2(W_2/R + 1)/2 \\ = (2W_1W_2 - W_2^2)/2R + W_2 \quad (13)$$

(13)식의 변수갯수를 줄이기 위하여 (9)식의 W<sub>1</sub> = P<sub>1</sub> - S - W<sub>2</sub>를 대입하면 (13)식은 W<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>의 두 설계변수로 표현된 (14)식이 된다.

$$W_e = \{2(P_1 - S)W_2 - 3W_2^2\} / R + W_2 \quad (14)$$

여기서 P<sub>1</sub>이 클수록 W<sub>e</sub>가 커짐을 알 수 있으므로, P<sub>1</sub>에 대해서는 가능하면 큰 값으로 정해지 (5)식의 L<sub>4</sub>가 PSD 크기의 절반보다 작아야 하는 제약요를 만족하는 범위내에서 임의의 값으로 결정할 수 있다. 이와 같이 하면 P<sub>1</sub>을 상수로 취급할 수 있으며, 비로서 (14)식의 편미분을 통하여 W<sub>e</sub>의 최대값을 구할 수 있다.

$$\partial L_e / \partial W_2 = 0 \\ W_2 = (P_1 - S) / 3 \quad (15)$$

W<sub>e</sub>의 최대값 조건인 (15)식을 (9)식과 함께 (14)식에 대입하면 W<sub>e</sub>의 최대값에 해당하는 (16)식이 구해지며, 이로부터 조명면적 즉, 조명에너지의 최대값을 얻을 수 있다.

$$W_e = \{2(P_1 - S)^2 / 3 - (P_1 - S)^2 / 3\} / R \\ = (P_1 - S)^2 / 3R \quad (16)$$

### 4. 설계에의 응용에

4장에서 유도된 식들을 실제 FM 제작을 위한 설계에 응용해 보기로 한다. 256M DRAM을 기준으로 하였을 때 해상도 R에 대한 요구규격은 0.05 μm이고, 측정범위 S는 2 μm로 하였으며, PSD는 높은 선형성을 나타내는 pin-cushion 형의 Hamamatsu사 S2044 (quartz window type)로 선택하였다[6].

먼저 PSD의 제원을 검토하면, 수정면적은 4.7 × 4.7 mm<sup>2</sup>이므로 L<sub>4</sub>는 4.7 mm / 2 = 2.35 mm보다 충분히 작은 0.5 mm 정도로 기정한다. 다음은 시험 레티클 및 FM의 vernier 패턴을 제작할 때 사용하기 위하여, 4장에서 유도된 식들을 이용하여 주요한 설계변수를 계산해 본다.

$$(1)식 : P_2 = P_1 - R \\ = 5 \mu\text{m} - 0.05 \mu\text{m} = 4.95 \mu\text{m}$$

$$(15)식 : W_2 = (P_1 - S) / 3 \\ = (5 \mu\text{m} - 2 \mu\text{m}) / 3 = 1 \mu\text{m}$$

$$(9)식 : W_1 = P_1 - S - W_2 \\ = 5 \mu\text{m} - 2 \mu\text{m} - 1 \mu\text{m} = 2 \mu\text{m}$$

$$(4)식 : R_d = R \times M_d \\ = 0.05 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m} / 0.05 \mu\text{m} = 5 \mu\text{m}$$

$$(16)식 : W_e = (P_1 - S)^2 / 3R \\ = (5 \mu\text{m} - 2 \mu\text{m})^2 / (3 \times 0.05 \mu\text{m}) \\ = 60 \mu\text{m}$$

여기서 (4)식으로 부터 계산된  $R_d = 5 \mu\text{m}$ 은 PSD의 해상도인  $2.5 \mu\text{m}$ 보다 충분히 크므로, FM 정렬계의 요구규격인  $0.05 \mu\text{m}$ 을 달성하는데 문제가 없도록 설계되었음을 알 수 있다.

다음은 입사광에 대한 감도(sensitivity)의 문제가 없는지 확인하기 위하여, PSD에서 발생하는 광전류의 크기를 예측해 보기로 한다. 먼저 최적화된 조명면적의 합은 (10)식으로부터 아래와 같이 계산된다.

$$A = 4 \times 60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m} \\ = 14400 \mu\text{m}^2 = 1.44 \times 10^{-4} \text{cm}^2$$

여기서 웨이퍼 위에서의 광강도를  $10 \text{ mW/cm}^2$ 로 가정하면 단위시간당 들어오는 전체 에너지  $I_w$ 는 다음과 같다.

$$I_w = 1.44 \times 10^{-4} \text{cm}^2 \times 10 \text{ mW/cm}^2 \\ = 1.44 \times 10^{-3} \text{ mW} = 1.44 \times 10^{-6} \text{ W}$$

이 광강도로 부터 얻어지는 총전류  $i$ 는, PSD가 파장  $248 \text{ nm}$ 에 대하여  $100 \text{ mA/W}$ 의 특성을 가지므로,

$$i = 1.44 \times 10^{-6} \text{ W} \times 100 \text{ mA/W} \\ = 1.44 \times 10^{-4} \text{ mA} = 144 \text{ nA}$$

로 계산된다. 이 전류값은 S2044의 암전류 (dark current)인  $0.5 \text{ nA}$ 보다 200배 이상 큰 값이므로, 레티클의 위치정보를 얻는데 있어서 S/N비 문제는 없을 것으로 예측된다.

## 5. 결론

반도체의 집적도 증가에 따라 노광장비의 해상도 및 중첩정확도(overlay accuracy)에 대한 요구규격이 보다 엄격해지고 있다. 특히 중첩정확도는 미세패턴 형성기술에 비하여 기술발전속도가 늦어 회로패턴의 미세화 진행에 따라 기술개발의 필요성이 더욱 커지고 있는 분야이다.

본 연구에서는 이와 같은 필요성에 따라 중첩정확도에 영향을 주는 오차요소를 분석함으로써 새로운 FM 정렬법용 제안하였다. 이 방법은 레티클의 위치를 측정하는데 있어서, 기존의 방법과는 달리 x, y 방향에 대한 scan을 필요로 하지 않으며, 동시에 높은 중첩정확도를 얻을 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다. 또한 실제 제작에 사용될 수 있는 설계식을 유도하였으며, 위치검출소자의 S/N비를 높이기 위하여 설

계변수를 최적화하였다.

향후 계획으로는 제안된 설계방식에 따라 FM 정렬계를 제작하여, 개발된 역사미 레이저 스텝퍼에 적용함으로써 그 실용가능성을 실험적으로 확인할 예정이다.

## 참고문헌

1. 이종현 외, "웨이퍼 스텝퍼의 중첩정밀도 측정에 대한 연구," 한국정밀공학회지, 제11권, 제1호, pp.150-156 (1993. 2)
2. R. F. Hollman et al., "Design and Performance of Production-Oriented Deep UV Stepper," SPIE Vol. 1264, pp.548-555 (1990)
3. 박기수 외, "PSD를 이용한 광학식 자동 초점장치," 한국광학회, 4권, 2호, pp.157-162 (1993)
4. S. Wittekoek et al., "Deep UV Stepper with Through the Lens Wafer to Reticle Alignment," SPIE Vol. 1264, pp.534-547 (1990)
5. K. Yamashita et al., "Heterodyne holographic nanometer alignment for a half micron wafer stepper," SPIE Vol. 1264, pp.119-226 (1990)
6. Hamamatsu Technical Data (T2000)

<표 1> 중첩정확도에 영향을 미치는 요소 및 해결방법 분석

오차종류 모듈명	within machine		between machines	해결방법
	intra-field	inter-field		
레티클 제조오차 투영광학계 에폭오차 배율오차	x		Δ	제조공차를 작게함 - active FM으로 배율보정
레티클 광학계 측정정밀도 오차 측정해상도 오차 웨이퍼 광학계 측정정밀도 오차 측정해상도 오차	o Δ			active FM - passive FM -
웨이퍼 구동계 위치정밀도 오차 scaling 오차 적교 오차 반복위치 정밀도 (global 정렬)			x Δ	- 온도, 총류 유지 -
정렬 mark runout 오차 웨이퍼 웨이퍼 변형 오차		x Δ		- -

\* o : 큰 영향이 있음.    Δ : 영향이 약간 있음.    x : 무시할 수 있음.

<표 2> 중첩정확도 (overlay accuracy)에 대한 실험결과 분석 (단위 : μm)

방향	목표	m	3σ	m  + 3σ	진류오차
x	0.15	-0.113	0.147	0.260	0.069
y	0.15	-0.110	0.182	0.292	0.127
비교	-	inter-field	inter-field	-	-

<표 3> 상용 excimer laser stepper에서 사용되는 active FM 정렬계의 특성비교

연구기관	Nikon	Canon	GCA	ASM	ETRI
파장	없음	actinic	actinic	actinic	actinic
정렬마크 detector		window photo D	window photo D	grating photo D	vernier 2D PSD
정밀도	-	x	Δ	o	o
laser calib. stage sync.	-	필요	필요	필요	불필요
x, y 방향		필요	필요	필요	불필요
z 방향		필요	필요	필요	필요
정렬시간		길다	길다	길다	짧다

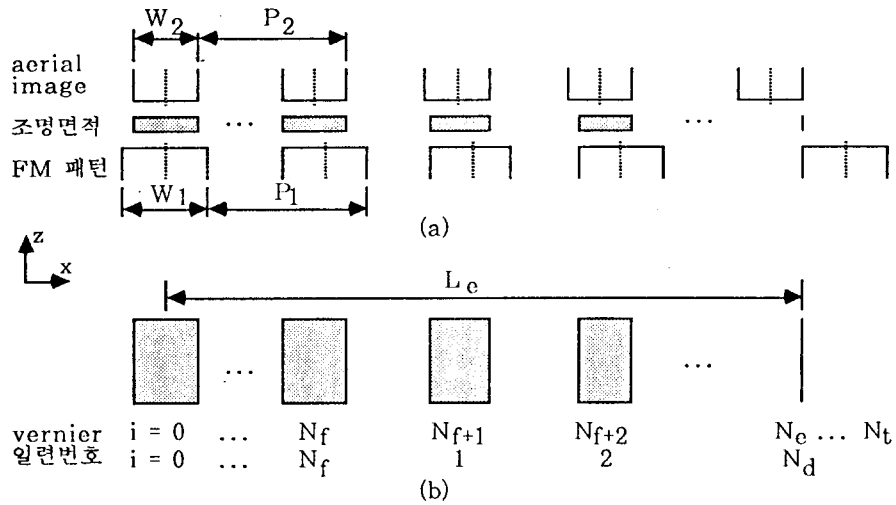


그림 1. FM 정렬을 위한 vernier 패턴의 원리.  $\square$ 는 x방향으로 위치오차가 있는 경우, 조명되는 오른쪽 반면의 면적과 위치를 나타내며, (a), (b)는 각각 옆과 위에서 본 조명특성임.

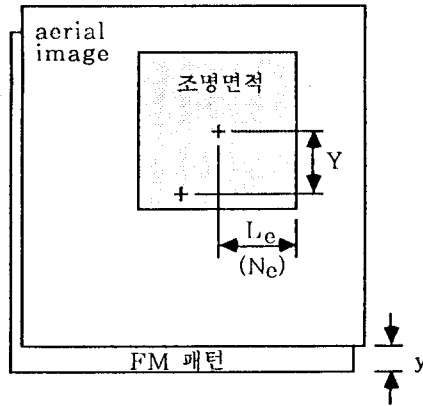


그림 2. 전체 vernier에 있어서의 조명위치 및 면적

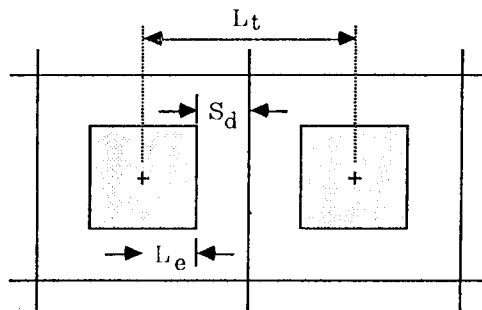


그림 3. FM용 vernier 패턴의 주기성