

스텝 앤드 리피트 投影露光方式의 微細形象 線幅調節에 관한 研究

(The Study on the Control of Pattern Linewidth
for the Step and Repeat Projection Imaging)

黃 永 某*, 韓 百 亨**

(Young Mo Hwang and Baik Hyung Han)

要 約

本 論文에서는 스텝 앤드 리피트(step and repeat) 投影露光方式의 光學 lithography 特性을 考察하였다.

먼저 광학 lithography 특성에 영향을 주는 파라미터들의 상호관계를 고찰하였고, 表面平扁도가 $\pm 5 \mu\text{m}$ 인 마스크(mask) 상에서 實驗하여 微細形象의 集點深度에 대한 線幅偏差의 관계와 노광량에 따른 선 폭 변화의 관계를 얻었다. 이들 관계로부터 스텝 앤드 리피트 투영 노광에서의 미세형상의 線幅調節의 安定化를 이루게 하는 條件을 제시한다.

Abstract

The characterization of optical lithography on the step and repeat projection system is studied.

Parameters that influence optical lithography were analyzed and the experiment was performed on the mask of $\pm 5 \mu\text{m}$, the surface flatness. From the experiment, the relationship between linewidth deviation on defocus and linewidth shift on exposure of the small features is obtained. Conditions maintaining good uniformity of small features from these relationships is presented.

I. 序 論

半導体 IC에서 素子의 각 성분은 微細形象으로 되어 있으며, 現在 VLSI IC는 線幅이 $1 \sim 3 \mu\text{m}$ 에 이르

는 미세형상으로 구성되어 있다. 單位 面積當 소자의 集積도가 높아짐에 따라 형상선폭은 더욱 微細化하여 形象形成과 線幅調節에는 고도의 기법이 필요하게 되었다.

微細形象은 패턴 제네레이터^[1] (pattern generator) 와 lithography 技法에 의해 形成된다.^[1-3] Lithography는 1798년에 개발되었으며, 이를 반도체 제조공정의 미세형상 형성에 이용한 역사는 약 20여년 정도이다.^[3] 현재는 光의 특정 波長과 렌즈 시스템을 사용하는 光學 lithography^[3]가 대부분 이용되고 있으며 기타 電子 빔^[4], X-ray^[5], 이온 빔^[6] lithography가

*正會員, 韓國電子通信研究所
(Electronics and Telecommunication Research Institute)

**正會員, 漢陽大學校 電子工學科
(Dept. of Electronics Eng., Hanyang Univ.)
接受日字: 1984年 12月 5日

개발되고 있으며 장래의 미세형상의 형성에 이용될 것이다.

스텝 엔드 리피드 투영노광방식은 광학 Lithography 에 속한다. 이 방식은 線幅이 1~2 μm에 이르는 미세형상을 우수한 再現性으로 形成할 수 있어 最近의 VLSI IC의 微細形象 形成에 사용하고 있다.

本 論文에서는 광학 Lithography 특성에 영향을 주는 파라메터의 상호관계를 考察하였고, 실험은 表面平扁度가 ±5 μm인 마스크(Mask) 상에서 행하여졌다. 露光量과 集點深度를 加變시켜가며 실험하여 미세형상의 집점심도에 대한 線幅의 偏差와 露光量에 따른 線幅變化의 관계를 얻었다. 이들 관계로부터 스텝 엔드 리피드식 노광을 행하였을 경우 광학 Lithography의 특성에 미치는 現象을 考察하고, 微細形象의 좋은 均一度를 유지하는데 必要한 條件을 제시한다.

II. 變調 轉寫 函數 (Modulation Transfer Function)

光學露光裝備의 性能은 變調轉寫函數 (modulation transfer function; MTF)에 의해 評價할 수 있다.^{1,7)}

MTF는 마스크상에서의 aerial形象의 光強度 分布와 substrate에 到達한 光強度 分布와의 比에 의해 결정된다. (그림 1 참조) 光學 露光 裝備의 性能을 MTF에 의해 평가하는 이유는 aerial形象의 質과 形象 形成 裝置의 基本 光學 特性을 평가할 수 있기 때문이다. 일단 MTF가 決定되면 노광장비의 解像力, 線퍼 집函數 (line spread function), 線幅調節, 露光量 變動에 따른 感度등의 精確한 豫測이 가능하다.

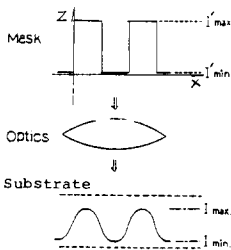


그림 1. 光強度 프로파일 Fig. 1. Light intensity profile

MTF는 공간 주파수 (spatial frequency)가 ν (格子 pitch의 역: 1/P)인 格子 形象으로 구성된 마스크 상에 露光하여 透過된 光強度 分布의 最小와 最大置에서 MTF값을 얻는다.

$$MTF(\nu) = \frac{M_{image}(\nu)}{M_{mask}(\nu)} \quad (1)$$

여기서, M_{mask}(ν)와 M_{image}(ν)는 마스크와 substrate 상에서의 光強度 分布를 나타내는 것으로, 각각 다음과 같이 표현된다.

$$M_{mask}(\nu) = \frac{I_{max}' - I_{min}'}{I_{max}' + I_{min}'} \quad (2)$$

$$M_{image}(\nu) = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (3)$$

一般的으로 M_{mask}는 1.0으로 假定하여 MTF(ν) ≃ M_{image}(ν)로 近似化하여 사용한다.^{13,7)}

한편 마스크상을 照明하는 光의 coherence 程度는 노광 장비의 形象轉寫能力에 크게 影響을 주게된다. 投影光學 시스템의 coherence 程度는 다음과 같이 정의된다.

$$S = \frac{\text{Numerical Aperture of Illumination Optics}}{\text{Numerical Aperture of Projection Optics}} \quad (4)$$

여기서, S=0인 境遇를 完全 coherence 照明, S=∞ 일때 Incoherence 照明, 0 < S < ∞인 경우를 部分(partial) coherence 照明이라 한다. 실제 모든 投影露光 시스템은 部分 coherence 조명을 사용하며 照明光의 coherence 程度는 0.5 < S < 0.9 範圍이다.¹³⁾

그림 2는 理想化된 光學 노광 시스템의 MTF 曲線이다. 가로축의 νλf는 정규화된 空間周波數로서 λ는 조명광의 波長이고, f는 투영 광학 렌즈의 F-수 (F/number)이다.

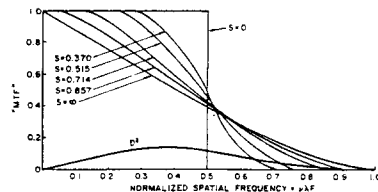


그림 2. MTF 曲線 Fig. 2. MTF curve.

Coherence와 incoherence 照明의 境遇, 投影露光 시스템은 광강도에 대해 線型應答을 하므로, MTF 曲線이 주어지면 주어진 마스크 形象에 대해서 aerial形象의 光強度 分布를 豫측할 수 있다. 部分 coherence 形象形成 시스템에서는 object와 image의 스펙트럼成分사이의 函數의 關係가 非線型이므로 aerial形象의 精確한 豫측은 어렵다. 이러한 難點에도 불구하고, 部分 coherence 투영노광 시스템의 性能評價에 MTF 曲線을 흔히 사용한다.¹⁷⁾

III. 微細形象의 線幅調節

반도체 IC의 높은 수율(yield)을 유지하기 위해서

는 전 웨이퍼 面에서는 물론, 한 Lot內에 있는 모든 웨이퍼, 더 나아가서 lot대 lot에 이르기까지 미세형상의 정확한 선폭을 유지해 주어야 한다. 線幅을 調節하는 것은 미세형상을 우수한 재현성으로 제작할 수 있는 能力의 척도가 되며, 이는 露光 에너지의 變動, resist threshold 에너지의 변동 그리고 最適 focus 面에서의 defocus된 양에 달려 있다. Lithographic 변수와 미세형상 조절 사이의 관계식은 다음과 같이 쓸 수 있다.¹⁷⁾

$$\left(\frac{\Delta L}{L}\right) = \frac{2}{L} \left(\frac{\partial X}{\partial E_M}\right) \Delta E_M + \frac{2}{L} \left(\frac{\partial X}{\partial M}\right) \Delta E + \frac{2}{L} \left(\frac{\partial X}{\partial M}\right) \Delta M \quad (5)$$

식(5)에서 볼 수 있는 바와같이 線幅의 變化는 첫 번째항인 照光 에너지의 變動, 두 번째항인 resist threshold 에너지의 變動, 그리고 마지막 항인 aerial 형상 變調의 변동에 기인된 線幅 變化의 合計 된다. 이하에서 각 coherence의 變調函數 (modulation function; M)와 光強度 分布의 관계식을 식(5)에 적용해 얻은 결과식을 考察한다.

1. Incoherence 照明에서의 線幅調節

Incoherence 照明에서 각 lithographic 파라메터에 대한 線幅 依存度를 결정하기 위해 變調函數와 광강도 분포에 대한 관계식을 식(5)에 적용하고, lines와 spaces의 境界面이며 線幅變動이 일어나는 곳인 X=0에 대해서 풀면 다음과 같은 수식을 얻을 수 있다.

$$\left(\frac{\Delta L}{L}\right)_I = -\frac{1}{M_I} \left(\frac{E}{E_M}\right) \left(\frac{\Delta E_M}{E_M}\right) + \frac{1}{2M_I} \left(\frac{\Delta E}{E}\right) - \frac{1}{2M_I} \left(\frac{2E}{E_M} - 1\right) \left(\frac{\Delta M_I}{M_I}\right) \quad (6)$$

여기서, M_I는 Incoherence 照明에서의 變調函數이며, E_M과 E는, 각각 substrate에 도달할 수 있는 최대 에너지와 substrate에 도달한 광강도 에너지이다.

한편 substrate 상에서 同等한 lines과 spaces (nominal size)를 얻으려면 E_M=2E₀와 E(X=0)=E₀ (動作點 露光에너지)이다¹⁷⁾. 이 조건식 식(6)에 적용하면 다음과 같다.

$$\left(\frac{\Delta L}{L}\right)_I = -\frac{1}{2M_I} \left[\left(\frac{\Delta E_M}{E_M}\right) - \left(\frac{\Delta E_0}{E_0}\right) \right] \quad (7)$$

여기서, E₀는 두께 T로 도표된 포토레지스트 (photoresist)를 제거시키는데 필요한 最小에너지이다.

식(6)과 (7)을 비교해 보면 식(7)에서는 식(6)의 세 번째항이 사라져 있음을 볼 수 있다. 이는 동작점 노광 에너지를 주면 aerial 形象의 變調函數의 變動에 기인

한 선폭 변화를 줄일 수 있음을 알 수 있다. 그러나 식(7)의 분모에 M_I가 있으므로 실제 다소간의 영향을 받게 된다.

2. Coherence 照明에서의 線幅調節

Coherence의 境界面도 incoherence와 비슷하게 다음과 같은 수식관계가 얻어진다.

$$\left(\frac{\Delta L}{L}\right)_C = -\frac{1}{\cos\phi} \left(\frac{E}{E_M}\right) \left(\frac{\Delta E_M}{E_M}\right) + \frac{1}{4\cos\phi} \left(\frac{\Delta E}{E}\right) - \frac{1}{4\cos\phi} \left(\frac{\Delta E_M}{E_M} - 1\right) \left(\frac{\Delta \cos\phi}{\cos\phi}\right) \quad (8)$$

여기서, ϕ는 光의 位相角이며 ϕ(Z) = πZλ/P²으로 근사화시켜 사용한다. (λ는 光의 波長, P는 格子 形象의 주기, Z는 substrate의 最適 focus 面으로부터의 거리)

Coherence 照明에서 nominal size를 얻기 위한 露光條件은 E_M=4E₀와 E(X=0)=E₀ (coherence 照明에서의 동작점 노광에너지)일때이다.¹⁷⁾ 이 조건을 식(8)에 적용하면 다음과 같다.

$$\left(\frac{\Delta L}{L}\right)_C = -\frac{1}{4\cos\phi} \left[\left(\frac{\Delta E_M}{E_M}\right) - \left(\frac{\Delta E_0}{E_0}\right) \right] \quad (9)$$

식(9)의 결과는 incoherence 경우에서 考察한 내용과 거의 같지만 단지 분모의 계수가 incoherence에 비해 2배 이다는 점에 유의할 필요가 있다.

3. 部分 Coherence 照明에서의 線幅調節

部分 Coherence에서는 線幅變化에 대한 정확한 계산은 어렵지만 heuristic approach를 사용하면 다음과 같다.¹⁷⁾

$$\left(\frac{\Delta L}{L}\right)_P = -\frac{1}{M_P} \left(\frac{E}{E_M}\right) \left(\frac{\Delta E_M}{E_M}\right) + \frac{1}{2QM_P} \left(\frac{\Delta E}{E}\right) - \frac{1}{2M_P} \left(\frac{2E}{E_M} - \frac{1}{Q}\right) \left(\frac{\Delta M_P}{M_P}\right) \quad (10)$$

여기서, M_P는 部分 coherence 照明에서의 變調函數이다. 한편 部分 coherence 照明에서의 동작점 露光에너지는 E_M=2QE₀와 E(X=0)=E₀일때이다. 이 조건을 식(10)에 적용하면 다음과 같다.

$$\left(\frac{\Delta L}{L}\right)_P = -\frac{1}{2QM_P} \left[\left(\frac{\Delta E_M}{E_M}\right) - \left(\frac{\Delta E_0}{E_0}\right) \right] \quad (11)$$

여기서, Q는 部分 coherence에서 측정된 동작점 노광에너지와 incoherence 조명에서의 동작점 노광 에너지(E_M=2E₀)와의 비로서 그 값은 1 < Q < 2 사이이다.

IV. 實驗 및 結果

지금까지 고찰한 관계식에 근거를 두고 스텝앤드 리피트 投影 露光方式에서의 광학 lithography 특성을 관찰하기 위해 表面扁平도가 ±5μm, 넓이가 5×5

inch², 두께가 90mil인 정방형 마스크상에서 행하여졌다. 마스크는 90mils의 유리판 위에 800Å의 크롬과 200Å의 크롬 옥사이드가 積層되어 있으며, 그 위에 5000Å의 陽性 포토레지스트가 塗布되어 있다.

노광 시스템은 imaging 光의 波長이 436nm (G-line), 축소 렌즈의 F-수는 1.6인 10X step and repeater 시스템을 사용하였다. (조명광은 부분 coherence 광으로서 S=0.5) 새긴 형상은 格子形象으로서 1~10μm까지의 선폭을 포함하고 있는 실험용 레티클 마스크를 이용하여 substrate인 마스크상에 형상을 새겼다.

Stepping시 focus와 노광량을 가변시켜가며 스텝 엔드 리피트 하는 과정은 그림 3 과 같다.

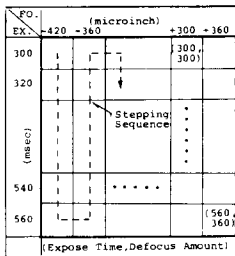


그림 3. Stepping 순서
Fig. 3. Stepping sequence.

표 1. 포토레지스트의 現象 및 크롬막의 식각 과정
Table 1. Develop of photoresist and etching process of chromium.

구분 / step	적 용 시 간 [sec]	회 전 속 도 [rpm]	적 용 용 액
Develop	35	500	AZ-Developer 100
Rinse	40	500	D·I Water
Etch	40	500	CR-7 Cr-Etchant
Rinse	40	500	D·I Water
Removal	30	500	P·R Removal
Rinse	40	500	D·I Water
Dry	30	500	**

Focus와 exposure 량의 가변은 컴퓨터에 의해 정확히 조절된다. 가변된 focus는 -460μinch 에서 +360μinch 까지 60μinch 간격으로, 노광시간은 300msec에서 560msec까지 20msec간격으로 노광하였다. 노광이된 마스크의 포토레지스트 現象 및 크롬막의 식각은 Table 1의 과정으로 진행되었다. Table 1에 나타낸 바와같이 현상 및 식각시 마스크를 회전하면서 약품을 적용하였다. 현상 및 식각이 끝난 다음

마스크상에 형성된 格子形象 2μm의 사진은 그림 4에 서와 같다.

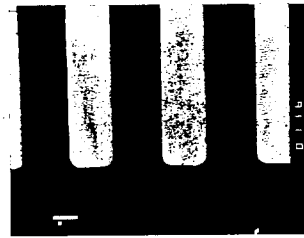


그림 4. 마스크상에 형성된 2μm格子形象의 SEM (10,000X) 사진
Fig. 4. SEM (10,000X) photograph of the grating pattern formed on mask.

표 2. 각 Focus 및 노광량에 따른 2μm와 5μm dark 선폭의 측정결과
Table 2. The measured results of 2μm and 5μm dark lines for each focus and exposure.

FO, EX	** μm	-360	-300	-240	-180	-120	-60	0	-60	-120	+180	+240	+300	+360
320	2	*	3.00	2.77	2.45	2.40	2.32	2.30	2.37	2.44	2.52	2.63	2.86	3.33
	5	6.43	5.98	5.75	5.49	5.43	5.32	5.30	5.35	5.41	5.54	5.60	5.87	6.00
360	2	*	2.63	2.57	2.30	2.25	2.24	2.16	2.19	2.24	2.30	2.44	2.60	2.90
	5	5.92	5.67	5.53	5.28	5.20	5.20	5.12	5.20	5.21	5.28	5.40	5.55	5.73
400	2	3.07	2.50	2.37	2.17	2.12	2.10	2.10	2.11	2.11	2.17	2.25	2.35	2.59
	5	5.69	5.54	5.32	5.18	5.13	5.08	5.08	5.05	5.09	5.14	5.21	5.32	5.45
420	2	2.85	2.38	2.21	2.12	2.07	2.07	2.08	2.08	2.07	2.10	2.15	2.25	2.49
	5	5.54	5.34	5.20	5.10	5.08	5.07	5.07	5.07	5.07	5.08	5.12	5.22	5.33
440	2	2.59	2.27	2.15	2.10	2.05	2.05	2.04	2.02	2.02	2.05	2.10	2.17	2.35
	5	5.35	5.22	5.13	5.07	5.04	5.04	5.01	4.99	4.99	5.03	5.08	5.19	5.25
460	2	2.24	2.15	2.08	2.02	2.00	1.99	1.98	1.96	1.94	1.98	2.06	2.11	2.27
	5	5.20	5.10	5.05	5.00	4.98	4.97	4.97	4.95	4.93	4.96	5.03	5.10	5.15
480	2	2.15	2.04	1.93	1.91	1.86	1.86	1.85	1.83	1.90	1.92	1.96	2.03	2.10
	5	5.10	5.01	4.95	4.91	4.86	4.85	4.85	4.84	4.90	4.90	5.02	5.02	5.08
520	2	1.93	1.86	1.84	1.80	1.80	1.79	1.79	1.83	1.86	1.87	1.89	1.92	1.99
	5	4.90	4.89	4.86	4.84	4.81	4.80	4.80	4.82	4.84	4.85	4.87	4.88	4.93
560	2	1.80	1.78	1.75	1.75	1.73	1.76	1.78	1.79	1.80	1.81	1.82	1.82	1.83
	5	4.82	4.80	4.76	4.74	4.73	4.76	4.80	4.80	4.81	4.82	4.82	4.84	4.84

* : Defocus로 인해 mask 상에 형상이 새겨져 있지 않아 선폭을 측정할 수 없었던 현상.
** : Nominal linewidth.

형성된 형상의 線幅測定은 metallogical 顯微鏡의 헤드위에 측정 정밀도가 ±0.02μm인 vickers사 image shering 장치를 설치하여 현미경 배율 500배에서 측정하였다.

측정 위치는 露光時間 320, 360, 400, 420, 440, 460, 480, 520, 560, msec에 대해 focus -360부터 +360 μ inch까지 각각 측정하였으며 측정 형상은 2 μ m와 5 μ m 호형상을 측하였다. 이들의 측정 결과는 Table 2에 나타난 바와 같다.

V. 結果의 考察

1. Defocus量과 線幅偏差와의 관계

그림 5는 2 μ m 호형상의 각 露光量에 대해서 Defocus에 따른 線幅偏差의 관계를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 substrate가 最適 focus面(그림5에서 defocus量이 0인점)으로부터 ±방향으로 점점 증가해감에 따라 더욱 심한 線幅偏差가 일어나고 있음을 알 수 있다.

그리고 defocus에 따른 선폭편차의 依存性은 노광량에 의해서도 크게 영향을 받음을 볼 수 있다. 즉 노광량이 적은 境遇가 큰 경우보다 더 심한 영향을 받음을 볼 수 있다. 특히 II절에서 考察 식(7), (9), (11)에서 해석된 結果에 의하면 動作點 노광에너지를 주면 선폭조절이 좀더 유리함을 예측했었다. 실험결과에 의하면 이는 동작점 노광에너지 혹은 이보다 큰 경우에서 선폭 변화가 상당히 적음을 볼 수 있다. 이는 스텝 앤드 리피트 投影露光方式의 한 독특한 特性이 아닌가 사려된다.

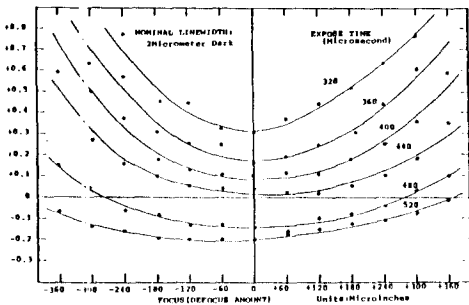


그림 5. Defocus에 따른 선폭 편차
Fig. 5. Defocus VS linewidth deviation

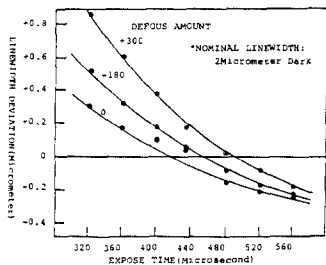


그림 6. 露光量에 따른 線幅偏差
Fig. 6. Exposure VS linewidth deviation.

2. 露光量과 線幅偏差와의 관계

그림 5는 露光時間對 線幅偏差의 관계를 나타내고 있다. 그림에서는 스텝 앤드 리피트 投影露光方式의 光學特性중 두가지 중요한 사실을 관찰할 수 있다.

첫째 defocus가 많이되면 露光量에 따른 線幅偏差는 더 많이 일어난다. 둘째 動作點 露光에너지중 중심 노광에너지가 더 적은 쪽이 더 큰 쪽보다 노광 에너지 變動에 따른 선폭편차는 더 심하게 일어나고 있고, 특히 노광 에너지가 더 큰 쪽으로 점점 증가함에 따라 선폭편차는 어느 한점으로 포화하고 있음을 볼 수 있다. 이는 stepping시 露光에너지의 時間에 따른 變化가 存在할 경우, 線幅偏差는 노광에너지가 동작점 노광에너지보다 높은 쪽이 낮은 쪽보다 선폭편차의 발생율은 더 적음을 말해준다.

VI. 結 論

스텝 앤드 리피트 投影露光方式에서의 微細形象 線幅調節은 지금까지 考察한 內容을 두고 볼때 다음 몇 가지 條件을 적용하면 보다 좋은 再現性으로 微細形象의 形成을 할 수 있을 것이다. 즉 substrate는 항상 最適 focus面에 유지시켜 주어야 한다. 실제 substrate面위에 새겨진 形象의 topology, substrate 표면의 굴곡, 기타 imaging 시스템의 autofocus 精度 등으로 최적 focus면을 유지 하기 어려운 경우, 노광에너지를 동작점 노광에너지보다 다소 더 큰 에너지를 加하므로서 defocus에 따른 선폭 편차를 줄일 수 있다. 그리고 露光量 變化에 따른 線幅變化도 줄여 주기 위해서는 노광에너지는 動作點 노광에너지 혹은 이보다 다소 더 큰 에너지를 적용해 줄 필요가 있다. 앞의 두 경우 모두에서 과잉 노광량에 따라서 유발되는 선폭편차는 사전에 線幅을 설계할 때 보상해 줄 필요가 있다.

參 考 文 獻

[1] Gerald M. Henrikson, S.P.I.E, vol. 100, pp. 86-95, April 1977.
 [2] T.L. Carpentier, S.P.I.E, vol. 100, pp. 96-103 April 1977.
 [3] S.M. SZE, VLSI TECHNOLOGY, McGraw-Hill Book Company, pp. 267-301.
 [4] Pieter S. Burgroaf, Semiconductor International, pp. 41-60, September 1982.
 [5] James S. Greencich, IEEE, vol. ED-22, no. 7, pp. 434-439, July 1975.
 [6] W.L. Brown et al, Solid State Technology, pp. 60-67, August 1981.
 [7] Michael C. King, Kodak Seminar, pp. 33-43, 1980. *