

(リソグラフィー規制) kファクターの謎

1. 要旨

《貨物等省令》6条十七号の細目へ(一)2とヲ(今春新設)に繋がりがあさうなことは、条文のたたずまいからもうかがえるかと思ひます。

へ リソグラフィ装置であつて、次のいづれかに該当するもの

(一) ウエハの処理のためのステップアンドリピート方式又はステップアンドスキャン方式の露光装置であつて、光学方式のもの又はエックス線を用いたものうち、次のいづれかに該当するもの

- 1 光源の波長が193ナノメートル未満のもの
- 2 ナノメートルで表した光源の波長に0.35を乗じて得た数値を開口数の値で除して得た数値が45以下のもの

省令6条十七号ヲ(4月3日公布版)

ウエハの処理のためのステップアンドリピート方式又はステップアンドスキャン方式の露光装置であつて、光学方式のものであり、かつ、光源の波長が193ナノメートル以上のものうち、次の(一)及び(二)に該当するもの(へ(一)2に該当するものを除く。)

- (一) ナノメートルで表した光源の波長に0.25を乗じて得た数値を開口数の値で除して得た数値が45以下のもの
- (二) 同一装置による重ね合わせ精度の最大値が2.4ナノメートル以下のもの

本稿で注目するのは下線部「XXを乗じて」の係数(kファクター)の違いです。

kファクターとは、微細加工能力の指標である最小解像度(Minimum Resolvable Feature size)の算出式における係数(定数)です。

$$\text{MRF} = \lambda (\text{波長}) \times \text{係数 (kファクター)} \div \text{開口数 (Numerical Aperture = NA)}$$

液浸リソグラフィーでは、レンズとウエハの間に液体(屈折率が空気より大きい)を満たすことにより開口数NAの値を大きくし高MRF(小さい数値の)を実現しています。へ(一)2とヲはこれを規制しようとする規定です。

ではなぜへ(一)2とヲでkファクターが異なるのか?

簡単に言えば、両細目の典拠の違いです。へ(一)に対応するWA(ワッセナーアレンジメント)の3.B.1.f.1の値0.35に対して、ヲの典拠である米国CCLの3B993.f.1の値が0.25というのが直接の理由です。(2節) 3節では、そこに至る過程に触れます。

もちろん、WAとCCLとで差があつてよいのか、という問題はあります。4節でこの問題を考えます。

2. 係数の英文典拠

へ (一) に対応するWAの 3.B.f.1 (2024年版)

3. B. 1. f. Lithography equipment as follows:

1. Align and expose step and repeat (direct step on wafer) or step and scan (scanner) equipment for wafer processing using photo-optical or X-ray methods and having any of the following:
 - a. A light source wavelength shorter than 193 nm; or
 - b. Capable of producing a pattern with a 'Minimum Resolvable Feature size' (MRF) of 45 nm or less;

Technical Note
 For the purposes of 3.B.1.f.1.b., the 'Minimum Resolvable Feature size' (MRF) is calculated by the following formula:

$$MRF = \frac{(an\ exposure\ light\ source\ wavelength\ in\ nm)\ x\ (K\ factor)}{numerical\ aperture}$$

where the K factor = 0.35. 

ヲに対応するCCLの 3B993.f.1 (同項は 2024.12.5 版で新設され現在に至る)

f. Lithography commodities as follows:

- f.1. Align and expose step and repeat (direct step on wafer) or step and scan (scanner) lithography equipment for wafer processing using photo-optical or X-ray methods and having all of the following:
 - f.1.a. [Reserved]
 - f.1.b. A light source wavelength equal to or longer than 193 nm and having all of the following:
 - f.1.b.1 The capability to produce a pattern with a 'Minimum Resolvable Feature size' ('MRF') of 45 nm or less; *and*
 - f.1.b.2. A maximum 'dedicated chuck overlay' value greater than 1.50 nm and less than or equal to 2.40 nm.

テクニカルノート

Technical Notes for paragraph 3B993.f.1: 1. The 'Minimum Resolvable Feature size' ('MRF') is calculated by the following formula:

$$'MRF' = \frac{(an\ exposure\ light\ source\ wavelength\ in\ nm)\ x\ (K\ factor)}{maximum\ numerical\ aperture}$$

where, for the purposes of 3B993.f.1, the K factor = 0.25. 

'MRF' is also known as resolution.

2. 'Dedicated chuck overlay' is the alignment accuracy of a new pattern to an existing pattern printed on a wafer by the same lithographic system. 'Dedicated chuck overlay' is also known as single machine overlay.

へ (一) 2とヲ、どちらのkファクターにもしかるべき典拠があることはわかりました。しかし本来同じ式の筈なのに、係数の値が2つあるというのはどうしたことでしょう？

3. WA からの CCL の分化・乖離

実は、2023 年 10 月までは、WA と CCL の規制内容は完全に一致していました。(なお当時は CCL に 3B993.f.1 はまだ存在せず、WA の 3.B.1.f.1 に対応する米国規定は 3B001.f.1。3B001.f.1 における k ファクターも当時は WA と同じ 0.35 でした)

WA (2023 年版) の 3.B.1.f.1	CCL (2023.10.25 版) の 3001.f.1
<p>Align and expose step and repeat (direct step on wafer) or step and scan (scanner) equipment for wafer processing using photo-optical or X-ray methods and having any of the following:</p> <p>a. A light source wavelength shorter than 193 nm; or</p> <p>b. Capable of producing a pattern with a 'Minimum Resolvable Feature size' (MRF) of 45 nm or less:</p> <p><i>Technical Note</i> For the purposes of 3.B.1.f.1.b., the 'Minimum Resolvable Feature size' (MRF) is calculated by the following formula:</p> $MRF = \frac{(an\ exposure\ light\ source\ wavelength\ in\ nm) \times (K\ factor)}{numerical\ aperture}$ <p>where the K factor = 0.35.</p>	<p>Align and expose step and repeat (direct step on wafer) or step and scan (scanner) equipment for wafer processing using photo-optical or X-ray methods and having any of the following:</p> <p>a. A light source wavelength shorter than 193 nm; or</p> <p>b. Capable of producing a pattern with a "Minimum Resolvable Feature size" (MRF) of 45 nm or less:</p> <p>Technical Note: For the purposes of 3B001.f.1.b, the 'Minimum Resolvable Feature size' (MRF) is calculated by the following formula: MRF = (an exposure light source wavelength in nm) × (K factor)/numerical aperture where the K factor = 0.35</p>

それが 2023 年 11 月 17 日版の 3B001.f.1 では、リスト本文は従来と同じながらテクニカルノート の k ファクター数値が 0.25 に変化しています。(WA の方は、ウクライナ戦争の影響からかその後変わっていません。)

CCL (2023.11.17 版) の 3001.f.1 抜粋

Technical Notes: For the purposes of 3B001.f.1.b:
1. The 'Minimum Resolvable Feature size' (MRF), i.e., resolution, is calculated by the following formula:

Expand Table	(an exposure light source wavelength in nm) × (K factor)
MRF	-----
	maximum numerical aperture

where, for the purposes of 3.B.1.f.1.b, the K factor = 0.25 'MRF' is also known as resolution.

更に2024年の12月には、3B001.f.1.2に細目2が追加され、それよりやや下のクラス（重ね合わせ精度が1.5nmより悪いが2.4nm以下のもの）も新たに3B993.f.1で規制されることになりました。（どちらもkファクター値は0.25）今般省令に新設された $\bar{\lambda}$ は、この3B993.f.1と同じ内容です。

CCL (2024.12.5 版) の 3001.f.1	CCL (2024.12.5 版) の 3993.f.1
Align and expose step and repeat (direct step on wafer) or step and scan (scanner) equipment for wafer processing using photo-optical or X-ray methods and having any of the following: a. A light source wavelength shorter than 193 nm; or b. A light source wavelength equal to or longer than 193 nm and having all of the following: b.1. The capability to produce a pattern with a “Minimum Resolvable Feature size” (MRF) of 45 nm or less; and b.2. A maximum ‘dedicated chuck overlay’ value of less than or equal to 1.50 nm;	f.1. Align and expose step and repeat (direct step on wafer) or step and scan (scanner) lithography equipment for wafer processing using photo-optical or X-ray methods and having all of the following: a. [Reserved] b. A light source wavelength equal to or longer than 193 nm and having all of the following: b.1 The capability to produce a pattern with a ‘Minimum Resolvable Feature size’ (‘MRF’) of 45 nm or less; and b.2. A maximum ‘dedicated chuck overlay’ value greater than 1.50 nm and less than or equal to 2.40 nm.

4. へ(一)2とCCLの3B001.f.1.bの乖離をどう見るか

相違点は2つあります。

第1は、kファクターの値。へ(一)2は0.35。3B001.f.1.bは0.25) この点では米国の方が規制が厳しい(規制範囲が広い)といえます。

第2は、へ(一)2には、重ね合わせ精度が規制の必要条件になっていないこと。この点では日本の方が規制が厳しい(規制範囲が広い)といえます。

なぜへ(一)2では重ね合わせ制度に言及しなかったのか? 理由は新設ヲの存在ではないかと思ひます。すなわちヲで重ね合わせ精度2.4nm以下を規制しているのだから敢えてへ(一)2で触れなくてもいいでしょ、ということかと。

そのことを図で確認しておきましょう。縦軸は解像度の実力、横軸は重ね合わせ精度です。k=0.35でMRF45以下を実現できる装置は、k=0.25でそれができる装置より「実力」ありということになるので、図では上側に配置しています。

k=0.35の条件でMRF45以下を実現	甲	乙	丙
	へ(一)2 該当 ヲ 該当 3B001.f.1.b 該当 3B993.f.1 非該当 WAの3.B.1.f.1 該当	へ(一)2 該当 ヲ 該当 3B001.f.1.b 非該当 3B993.f.1 該当 WAの3.B.1.f.1 該当	へ(一)2 該当 ヲ 非該当 3B001.f.1.b 非該当 3B993.f.1 非該当 WAの3.B.1.f.1 該当
k=0.25の条件でMRF45以下を実現	丁	戊	己
	へ(一)2 非該当 ヲ 該当 3B001.f.1.b 該当 3B993.f.1 非該当 WAの3.B.1.f.1 非該当	へ(一)2 非該当 ヲ 該当 3B001.f.1.b 非該当 3B993.f.1 該当 WAの3.B.1.f.1 非該当	へ(一)2 非該当 ヲ 非該当 3B001.f.1.b 非該当 3B993.f.1 非該当 WAの3.B.1.f.1 非該当
	精度 1.5nm	精度 2.4nm	

こうして見ると、問題が2つあると私は考えます。

- 1) 図の丙部分のズレをどうするのか? (とりあえずWAを尊重し、このまま放置しておく?)
- 2) 省令の条文がわかりにくい。(上図を見て初めて理解できたという人も多いのでは?)

追記) 「米国の輸出規制」サイトの運営人である鈴木さんから

昔の CCL では、k ファクターも MRF 閾値も今より大きな値だった

との御教示をいただきました。そこで調べてみると、WA も同様の動きをしていることがわかりました。

CCL			WA		
変更年	k ファクター	MRF 閾値	日付	k ファクター	MRF 閾値
			03.12.12	0.7	0.35 μ m
2005 年	0.7→0.45	350→180	04.12.9	0.45	180nm
2011 年	0.45→0.35	180→95	10.12.22	0.35	95nm
2015 年	0.35 据え置き	95→45	15.3.25	0.35	45nm
2023 年	0.35→0.25	45 据え置き	現在に至る		

また、『東芝レビュー』の下記記事も御紹介いただきました。併せて御礼申し上げます。

(この記事は、k ファクターが小さくなる限界を現行の 0.25 と述べているように、私は理解しましたが、どんなものでしょうか?)

レジストプロセスが最大のコントラストを出したと仮定しても、K1 ファクタが光の波長の 1/4 では解像することができないため、 $K1=1/4=0.25$ という値を光の解像限界と呼ぶ。(<https://www.global.toshiba/jp/technology/corporate/review/2012/04.html>)

自分でも記事をさがしてみました。下記の記事は「0.25 は原理上の限界」とまで言い切っているように思います。

高 NA 化、短波長化とともに、k1 ファクターも当初 0.8 以上の値であったものが、どんどん小さくなっていった。原理的に 0.25 が 1 回の露光で解像可能な限界とされるが、0.6 以下となるとパターンが歪んでくる。

(『光学』2012 年 41 巻 3 号

<https://annex.jsap.or.jp/photonics/kogaku/public/41-03-sougouhoukoku.pdf>)