

S-PLUS, VMStudioを用いた交差確認法による推定精度検討

キヤノン（株） 製品技術研究所 鈴木 武彦

1. 背景

半導体デバイスは常に微細化の道を歩んでおり、2003年現在では線幅100nmのパターン形成が量産として行われている。この微細化要求に対応する為に、StepperやScannerと呼ばれている半導体露光装置の投影光学系を高NA化、短波長化する装置開発が行われている。

この高NA化する弊害として、パターン形成するウエハ上での焦点深度DOF (Depth of Focus)が現状では300nm以下の値となっており、リソグラフィーにおいてはナノメートルオーダーのフォーカス管理が必要とされている。

しかしながら、プロセスウエハのフォーカス深度劣化要因の解析はほとんど行われていない。それは量産時のプロセスウエハを使用して、一条件の露光結果のみから、最適フォーカス、及び最適露光量からのズレ量を求める手法が確立されていない為である。そこで我々は、半導体製造の量産ラインの中で、最適フォーカス、及び最適露光量からのズレ量を求めることができる新規計測方法FDLN(Focus & Dose Line Navigator)法¹⁾を提案し、その効果の確認を行い、量産適用への検討を実施中である。

その中で、S-PLUS及びにVMStudioを用いた統計解析として回帰を用い、最適フォーカス、及び最適露光量からのズレ量を推定する検討を行ったのでその報告をする。

2. 交差確認法について

Cross Validation の和訳である交差確認法は推定条件を最適化する上では大変有効かつ簡便な手法である。

今回は全データ数 (M 個) の中の 1 個を外し、残りのデータ (M-1 個) で 1 個を推定する交差確認法の一つである Leave-One-Out 法とも呼ばれている手法を採用した。1個の外すデータを全データで順に行い、推定値と外した値との差分の二乗の和を全データ数で割って正規化した評価量CVの値で推定条件を評価する方法である。

次に我々の提案した FDLN に関して紹介する。FDLN は、以下の 4 つの手順を行うことで可能となる。

- 1) FEM (Focus Exposure Matrix) ウエハ (フォーカス、露光量を変えて露光、現像を行なったレジストパターン) を作製。
- 2) 形状計測器を用いて、各パターンから得られる形状情報 (高さ、線幅、側壁角度) を求め、パターンが露光された時のフォーカス、露光量と関連付けてライブラリーを作成。
- 3) 実際に計測したいパターンを露光。
- 4) 露光したパターンの形状を測定し、ライブラリーと比較を行ない、露光したパターンのフォーカス、露光量を求め、最適フォーカス、及び最適露光量からのズレ量を算出。

2)のライブラリーとして、S-PLUS及びにVMStudioを用いて求めた多項式近似やNeural Networkを使用する。この多項式近似やNeural Networkの条件の評価を交差確認法で行った。

S-PLUSの「subset」なるコマンドを使用することで大変便利に交差確認法を実施できる。このコマンドにより全データ数 (M個) の中から順に1個を外すことをLoop化して使用することが可能となる。今回、M個の中から1個を外して、M-1個で予測し、M回ループを回して各回でモデルとの残差を求めていく方法を以下に示す。(Yを目的変数、X1~X5を説明変数とし一次近似した場合)

```
for(i in 1:M){  
    lm.fit <- lm(Y ~ X1 + X2 + X3 + X4 + X5 ,data =  
    TestData, subset = -i, singular.ok=T))  
    lm.pred <- predict(lm.fit,new=TestData[i,])  
    e[i] <- (TestData$Y[i] - lm.pred)  
}
```

ここで、Mは全データ数、TestDataはデータファイル名。
subset = -i :はi番目のデータを抜くコマンドで、e[i]は、
i番目のデータの近似式から値lm.predとの差分値である。
このような少ない記述で表現できる場所はS-PLUSを
使用するメリットを感じる場所である。多項式の次数
は増やし過ぎるとオーバーフィッティングと呼ばれる現象
となる。これを避けるために最適な次数を求めることが
できる交差確認法が有効である。データ量が膨大の場合
は計算時間を考慮してデータ範囲の設定等の工夫が必要
である。

3. 検討結果について

FDLNの推定精度検討として今回、

- 1) S-PLUSを用いた多項式近似
- 2) VMStudioを用いたNeural Network

を使用して、Simulation及びに実験検討を行った。

この実際の検討結果に関しては三、四頁に示すとし、
本コンファレンスの趣旨として、S-PLUSでの多項式近似
及びにVMStudioでのNeural Networkで検討した時に気に
していたことに関して以下に記載する。

我々は最終的には、一条件の露光結果のみの実際のデ
ータを使用して、最適フォーカス、及び最適露光量からの
ズレ量を求める推定をより高精度に行うために Semi-
Parametric な Neural Network の使用を考えた。しかしなが
ら Neural Network では説明変数のべき乗（例えば二乗や
三乗項）は自動発生できないが、今回検討対象の様な物
理現象の場合はそれなりの対応が必要と考えた。その対
応として最初の Simulation 結果に対して、N 次多項式近
似の検討を行った。三頁の最後のシートに示す様に、今
回の目的変数である Focus, Dose 量とも三次の近似式で、
評価量 CV（このシートの場合は M が掛かっている）が
最小となる。この様に交差確認法を使用することで、推
定条件、（今回は次数）を最適化することができる。

次に実データに対して最初にS-PLUSを用いた多項式
近似での検討、最後にVMStudioのNeural Networkを使用し
て推定精度検討を行った。

Neural Networkの検討の時はSimulationデータでの検討
結果を参照とし、説明変数として三乗項も考慮できる様、
手動により設定し検討を行った。

VMStudioを用いたNeural Networkの検討においては、
GUIにて、線を結ぶだけで実行できるマクロプログラミング
を作成する事で、Neural Networkと聞く敷居の高い
技術と言う認識を打破し多くのUserの使用を可能とした。

更なる高精度化のために、同時に複数のNeural Network
の計算等が可能となるアンサンブル学習の環境も作製し、
現在検討を実施中である。

4. まとめ

今後の半導体デバイスの微細化トレンドに対応する為
にナノメートルオーダーのフォーカス管理が必要である。

それに対応する為、我々の提案するFDLNの機能は有効
かつ必要な技術となるであろう。

それを支えるS-PLUS及びにVMStudioは、ユーザーにと
って敷居の低くかつ大変有効なPowerfulなToolとの認識
であり、今後も有効活用をしていきたい。

尚、筆者は半導体露光装置の研究・開発者であり、統
計解析等の技術に対してはユーザーの立場であり、薄識
なのが、偽らざるものである。最新の技術等を知らぬま
までの記載の可能性もあるので、その場合はご容赦頂き、
更にご指導頂けましたら幸いである。

5. 謝辞

今回の本発表を行えたのは、社内外に渡る多くの関係
者のご協力の賜物であります。特に数理システム（株）
の徐 良為さんには、多大なご検討およびに有意義なご助
言等を頂きました。この場を借りて感謝申し上げます。

6. 参考文献

- 1) 稲 秀樹、千徳 孝一、第64回応用物理学会学術講演
会予稿 1p-R-2 P641 (2003)