

電子線露光による光子の軌道角運動量重ね合わせ状態 検出用ホログラムの作製

宮本研究室 亀井 健

1. はじめに

本研究室では、光子の軌道角運動量重ね合わせ状態の検出方法の1つとして経路干渉計法を提案している[1]。ホログラムを固定して検出を行うので余分な方位各成分の混入が少ないのが特徴である。

本研究の目的は、ホログラム作製に使用する電子線レジスト gL1000 シリーズの特性を明らかにすることである。また、特性の1つであるドーズ量と加工の深さの関係を用いて、位相の変調幅を調節することで、回折効率を制御し検出用ホログラムを作製することができるか調べる。

この他、基板の歪み評価や、新しい電子線露光装置でホログラム作製に必要な 2×2 mm の範囲で露光を行うための加速電圧等の検討を行った。

2. 光子の軌道角運動量重ね合わせ状態検出用ホログラム

検出用ホログラムの役割は2つある。1つは s 次回折光に $\exp(im_H s)$ の位相変化を与えることである。もう1つは、測定対象の光を0次回折光と1次回折光の回折効率が1:1になるように分配することである。

回折効率に影響を与えるパラメーターに位相変調幅がある。位相変調幅を t 、ホログラムを階段構造で近似した際のステップ数を N とすると、反射型ホログラムの加工深さ h は次式で与えられる。

$$h = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{N-1}{N} \frac{t}{2} \quad (1)$$

また、 N 次回折光の回折効率 $\eta_N(s)$ は式(2)で表される。

$$\eta_N(s) = \left| \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} \exp\left(-i \frac{2\pi s - t}{N} l\right) \right|^2 \text{sinc}^2\left(\frac{s}{N}\right) \quad (2)$$

(2)式より、 $\text{sinc}^2(s/N)$ を考慮しない $t = \pi$ のとき、0 次回折光と1 次回折光の回折効率が1:1 である。

さらに、検出対象の光の波長を 800 nm、ホログラムのステップ数を4 とすると、(1)式より $h = 1500$ Å である。このとき、1 段目 500 Å、2 段目 1000 Å、3 段目 1500 Å の加工をレジスト膜に行う。

3. 電子線レジストの加工特性

本研究でホログラム作製に使用する電子線レジストは gL1000 シリーズ (グルーオンラボ社製) である。この電子線レジストは粘性が高いため、スピコン

トによって形成される膜厚が厚く光学素子の作製に向いている。しかし、比較的新しいレジストのため、加工特性のデータが少ない。そのため、レジストの調査を行った。gL1000-7 と gL1000-5 について検討し、より良好な膜が得られる gL1000-5 で電子線ドーズ量と加工の深さについて検討を行った。

電子線露光装置(日本電子社製 JSM-7100F)を用いて段階的な露光量変化をもつパターンを電子ビームで照射し、これによって生じた凹凸の高さ分布を Dektak150(アルバック社製)によって測定する。

面積の異なる露光パターンを 8 枚多重露光することによって、8 段階の高さ変化をもつ凹凸の加工を行う。1 段目のドーズ量は $10 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ (ドーズ量 A)、 $4 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ (ドーズ量 B および初期ドーズ 4)、 $2 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ (初期ドーズ 2)、 $6 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ (初期ドーズ 6)、 $8 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ (初期ドーズ 8)の 5 種類である。2 段目から 8 段目の露光量は全て $2 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ である。

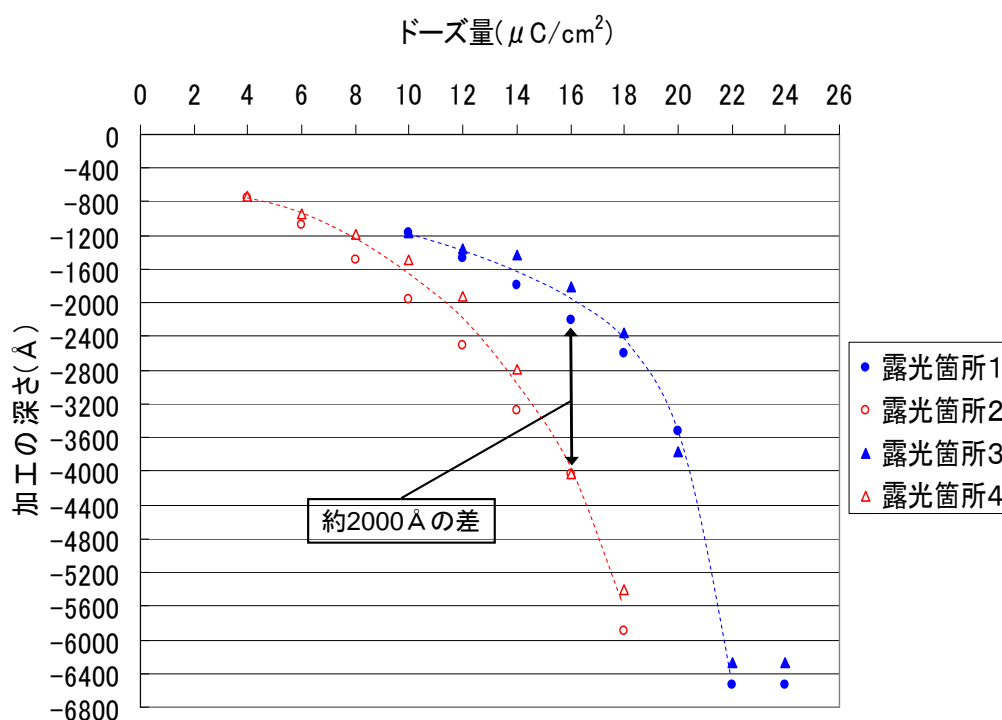


図1 ドーズ量と加工深さ

まず、ドーズ量 A(塗潰), B(白抜)を用いた実験を行った。その結果を図 1 に示す。結果として、同一露光箇所では一貫した傾向があること、同一試料内でも初期ドーズ量が異なると同一の露光量に対して加工の深さが異なる可能性があ

ることがわかった。

次に、初期ドーズ量によって加工の深さの傾向が異なるのかを確かめるために、

初期ドーズ量の異なる初期ドーズ 2 から初期ドーズ 8 を同一の基板に露光し、その傾向を調べた結果を図 2 に示す。

図 2 から合計ドーズ量が同じとき、初期ドーズ量が低いほうが深い加工の深さが得られる傾向があることがわかった。ただし、初期ドーズ量が同じでも加工深さには 2000 Å ほどのばらつきがあった。

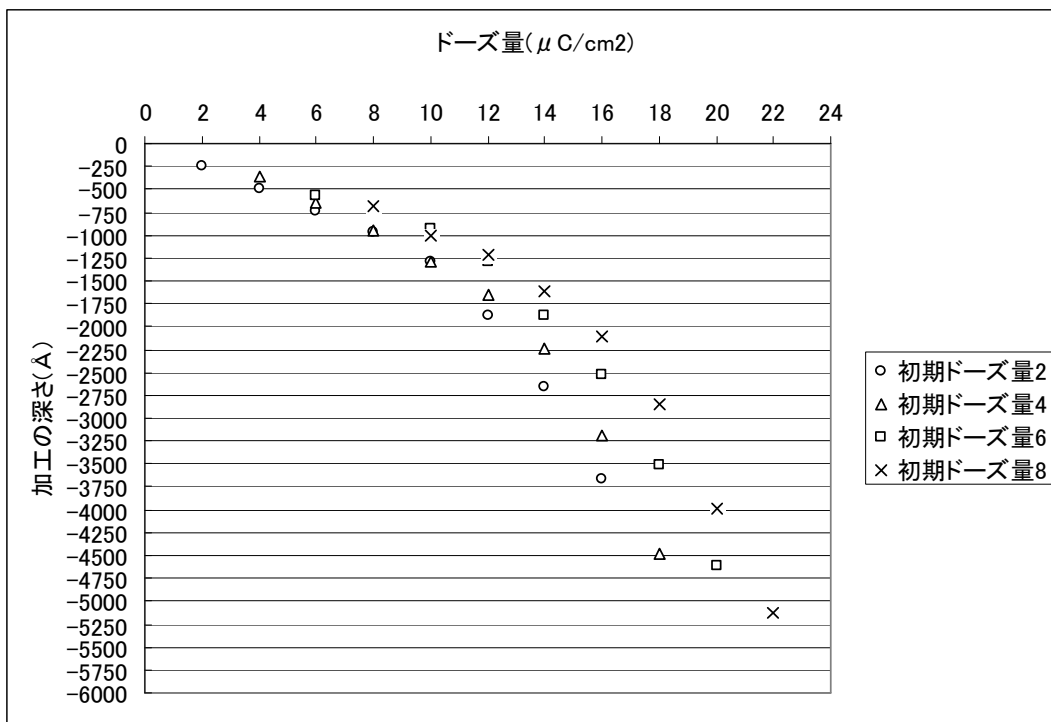


図 2 ドーズ量と加工深さ

4. ドーズ量の決定方法

ホログラムは 3 回の重ね露光によって作製する。そのため、1 回目の露光による加工の深さは、初期ドーズ量のみを露光した領域の対する加工の深さに当たると考えた。そのため、上述領域に対する加工の深さを図 3 にプロットした。さらに、このグラフの各データ点と不確かさを用いて、一次関数でフィッティングを行った。得られたパラメターを使って 1 回目の露光で 500 Å 加工する場合、ドーズ量は $5.6 \pm 1.8 \text{ C/cm}^2$ と求めた。

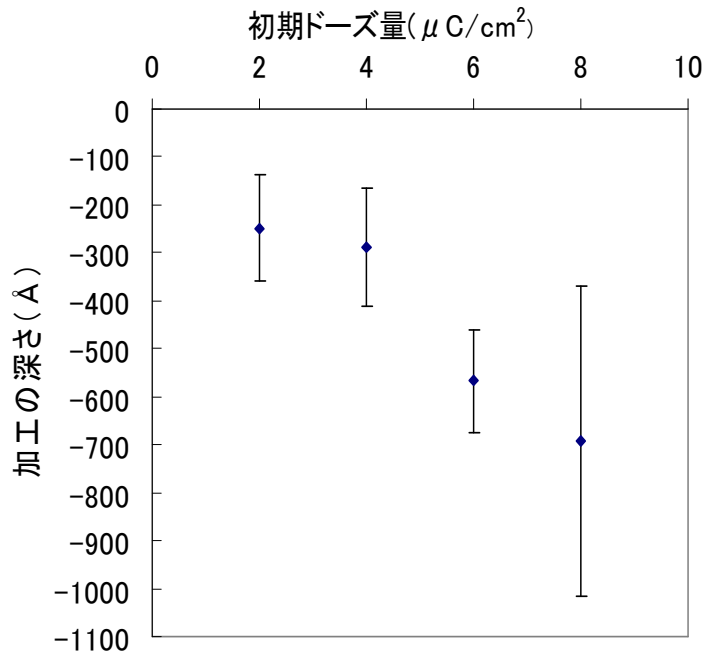


図3 初期ドーズ量のみを露光した領域の加工深さ

さらに、上で決めた 1 回目のドーズ量を初期ドーズ量とした場合の総ドーズ量に対する加工の深さを、初期ドーズ量(2、4、6、8)での同じ総ドーズ量に対する加工深さのデータを線形補完することによって求めた。

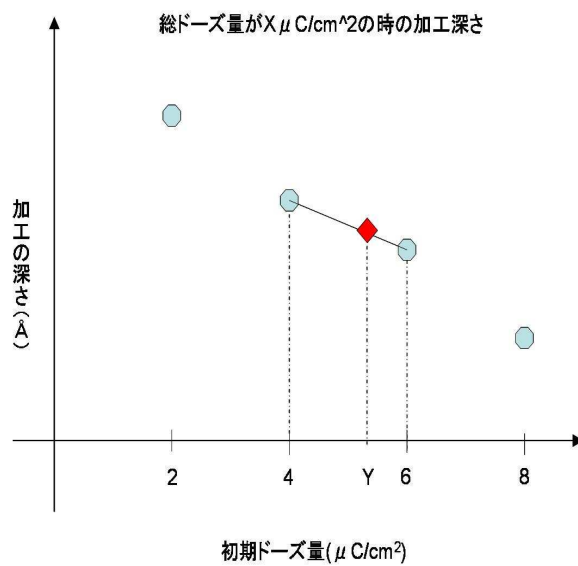


図4 線形補完

初期ドーズ量 Y のときの総ドーズ量 X に対する加工深さの求め方を図 4 に、作製したグラフを図 5 に示す。

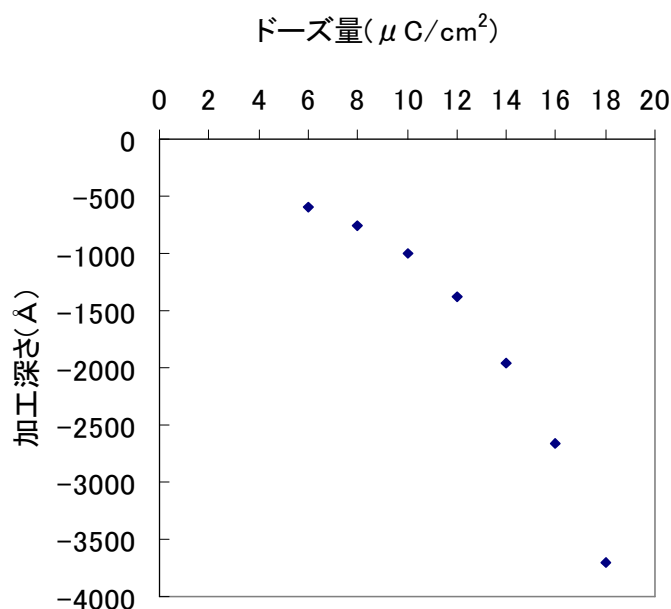


図 5 初期ドーズ量 $5.6 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 総ドーズ量と加工深さ

そして、上記によって得られた各点(図 5)をつなぐ曲線を引く。Y 軸上のホログラムの階段構造の 2 段目(2 回の重ね露光を行う)に必要な加工の深さの点から水平に引いた直線とこの曲線の交点を求め、この交点から鉛直方向に直線を引き、x 軸と交わるところを 2 段目の設計ドーズ量とする。3 回目の設計ドーズ量の決定も同様に行う。上記の手順にそって設計を行った結果、2 段目(1000\AA)のドーズ量は $10 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、3 段目(1500\AA)のドーズ量は $12.5 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ であると設計した。よってホログラムに作成に必要な設計ドーズ量は、1 回目は $5.6 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、2 回目は $4.4 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、3 回目は $2.5 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ と決まった。上記の条件でホログラムを作製した。

5. 作製したホログラムの回折効率測定

前節で求めたドーズ量を用いてホログラムを作製し、回折効率を測定した。ホログラムパターンは 1 つの基板に 2 箇所作製した。反射型ホログラムとするため金を蒸着する予定だが、蒸着前に透過型ホログラムとして測定した。用いたレーザーは 830 nm NIR Diode Laser(Shanghai Dream Lasers Technology 社)であり、波長は 830 nm である。またパワーメータは受光部が ILXLightwave 社の OMH6722、回路部が ILXLightwave 社 OMH-6810 を使用した。

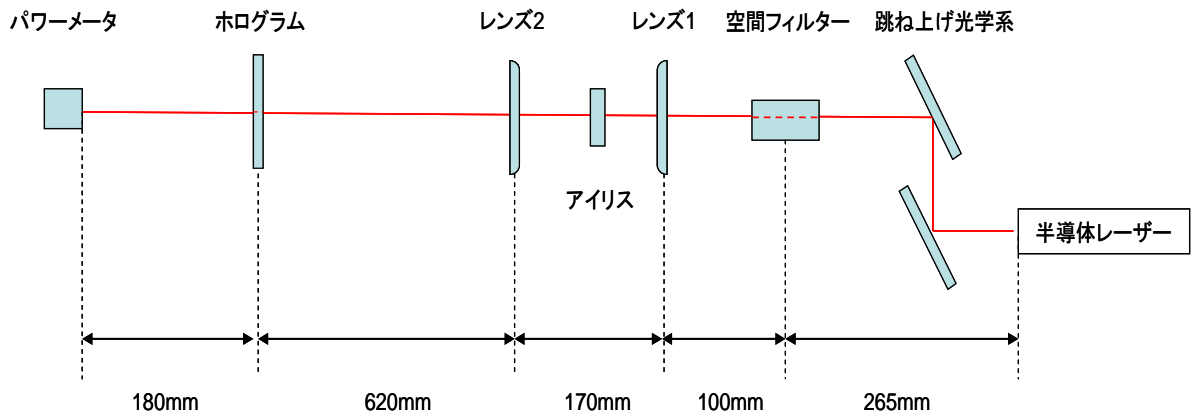


図 6 回折効率測定系

5.1 実験結果

パワーメータで測定した各回折光のパワーを基板のホログラム構造のない部分の透過パワーで割って回折効率を求めた。

理想的な反射型ホログラムの回折効率と、反射型ホログラムを透過型ホログラムとして考えた場合の回折効率(波長 800nm として計算した)を測定結果から得られる回折効率と比べる。表 2 にその結果を示す。加工の深さが 1020 Å だとした場合の透過型ホログラムの理論値(波長 830nm)と実験結果と比べると、ほぼ同じ値が得られた。そのため、目標の加工深さに比べて 500 Å ほど足りない可能性があることがわかった。

	反射型	透過型	実験結果	透過型
加工深さ(Å)	1500	1500		1020
位相変調幅	π	0.25π		0.164π
1次回折光回折効率	0.35	0.018	0.0076	0.0075
0次回折光回折効率	0.43	0.95	0.80	0.98

表 1 回折効率と位相変調幅

6. 結論

電子線レジスト gL1000-5 の特性調査を行い、ドーズ量と加工深さの関係は初期ドーズ量の影響を受けることが分かった。試作したホログラムは加工深さが設計値より小さいと考えられ、ドーズ量決定方法の見直しが必要である。

参考文献

[1] Yoko Miyamoto, Daisuke Kawase, Mitsuo Takeda, Keiji Sasaki, and Shigeki Takeuchi, Journal of Optics **13**, 064027 (2011).