

200Gb/in²を超える電子ビームマスタリング

Electron beam mastering beyond 200Gb/in² density

勝村 昌広, 細田 康雄, 北原 弘昭, 小林 正規

Masahiro Katsumura, Yasuo Hosoda, Hiroaki Kitahara, Masaki Kobayashi

佐藤 恵, 加園 修, 橋本 和信

Megumi Sato, Osamu Kasono, Kazunobu Hashimoto

飯田 哲哉, 栗山 和巳, 横川 文彦

Tetsuya Iida, Kazumi Kuriyama, Fumihiko Yokogawa

要 旨 電子ビームを用いた200Gb/in²を超える高密度微細記録を実現するための阻害要因である近接効果を低減するプロセスの一つとして、炭素基板を用いた電子ビーム記録を提案する。炭素基板を用いることにより、従来基板として用いていたシリコン基板プロセスにおいて高密度記録の阻害要因であった近接効果の影響を低減し、200Gb/in²を超える電子ビームマスタリングを実現した。

Summary In an electron beam recorder that has a capability to record beyond 200Gbit/in² density, the scattering of electrons deteriorates patterning resolution. Therefore control of electron scattering is important to realize density patterning beyond 200Gbit/in². Thus we adopted a new substrate, which is made of carbon that reduces the influence of the electron back scattering, and succeeded to record over 200Gbit/in² density.

キーワード : electron beam, mastering, high-density, recording, electron beam recorder

1. ま え が き

我々は高密度記録を実現するために電子ビームを用いたマスタリング装置 (Electron Beam Recorder: EBR)を開発し、装置開発およびプロセス開発の成果を発表してきた^{(1),(2),(3)}。電子ビーム記録においては、投入した電子ビームはレジストおよび基板中で散乱する。レジストおよび基板中で散乱した電子は、レジストに不必要な露光をもたらし、その結果パターンニング分解能の低下といった高密度記録における問題が発生す

る。特に高密度記録においては、電子ビームの照射位置の間隔が狭くなることにより、電子ビーム記録固有の問題である近接効果が発生し、パターンニング分解能の大幅な低下が問題となる。近接効果のパターンニングに対する影響を低減することは、今後の電子ビームを用いた高密度記録においては重要な課題である。

今回我々は、近接効果を低減するプロセスの一つとして、炭素基板を用いた電子ビーム記録プロセスを検討し、200Gb/in²を超える高密度

記録を実現したので報告する。

2. 電子ビーム記録装置

Fig.1 に本実験で用いた電子ビーム記録装置 (Electron Beam Recorder: EBR) の概要を示す。EBR は電子ビームカラム, ワークチャンバ, そしてロードロックチャンバから構成されている。電子ビームカラムは, 加速電圧 50 kV を印加することが可能であり, 高エネルギーの電子ビームを生み出すことが可能である。ワークチャンバは, 環境磁場により電子ビームの記録位置が変動することを防止するために鉄材により作製した。ロードロックチャンバは基板の投入, 搬出およびチャッキングを自動処理する機構を備え, 約 20 分で基板の投入または搬出が可能である。

ワークチャンバには, 真空シールを施したエアスピンドルモータおよび送り機構が設置されている。送り機構は, x 方向に移動可能な x-ステージ, x-ステージを送るための DC モータ, そしてステージの位置を高精度に測長するレーザ測定機構から構成されている。スピンドルモータは, x-ステージ上に配置されている。回転軸は磁性流体シールによりシールされており, エアーベアリングから放出される空気を排

気するために金属チューブでワークチャンバ外と接続され, ワークチャンバ内の真空度を確保することが可能である。

安定な電子ビーム記録を実現するために, 我々の EBR はダイナミックフォーカスシステムを採用している。ダイナミックフォーカスシステムは, 基板の面ぶれなどで発生する高さ変動を, ワークチャンバ上に配置した光学式の高さ検出器で測定し, その高さ情報から電子ビーム内のフォーカスレンズ強度を変更することにより基板の高さ変動に追従した焦点合わせが可能である。その結果, 常に安定で広範囲の記録安定性を実現している。

3. シリコン基板での記録限界評価

シリコン基板を用いた電子ビーム記録における高密度記録の限界性能評価として, より狭いトラックピッチにおけるラインアンドスペース記録を行い, パターン形状を評価することとした。実験で用いた実験条件を Table に示す。今回の実験においてレジストの露光に用いたラインドーズは $0.81 \mu\text{C}/\text{cm}$ とし, トラックピッチ条件を 400nm から 140nm までのラインアンドスペース記録を行った。実験の結果得られたパターン形状を Fig.2 に示す。Fig.2 に示すよう

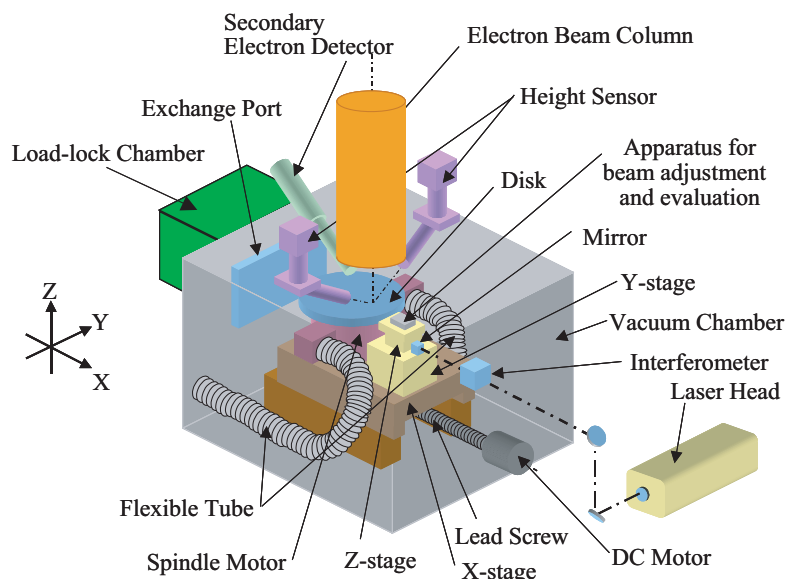


Fig. 1 Schematic picture of our electron beam recorder.

に、トラックピッチ 400nm から 160nm までのラインアンドスペースは良好にパターンニングされたものの、トラックピッチ 140nm のラインアンドスペース記録の場合には、スペースパターンの部分的な形状劣化が確認された。

スペースパターンは、記録時のオーバードーズにより劣化した可能性があるため、さらに記録時のラインドーズを $1.22 \mu\text{C}/\text{cm}$ と $0.61 \mu\text{C}/\text{cm}$ に変更し、同条件のトラックピッチにおけるラ

インアンドスペース記録を実施した。そして、パターン形状をより詳細に調査するために電子顕微鏡によるラインパターンの形状評価を行った。Fig.3 に実験結果として、トラックピッチおよびライン幅の詳細データを示す。実験の結果、ラインドーズを低下させることで、全てのトラックピッチにおいてライン幅が細くなることを確認した。トラックピッチ 400nm の場合、 $0.61 \mu\text{C}/\text{cm}$ のラインドーズにおいて 60nm 幅の

Table Experimental condition 1.

Beam energy: 50 keV	Resist: ZEP-520 (65 nm)
Beam current: 120 nA	Developer: ZED-N50
Beam diameter: 51 nm	Developing: Dipping

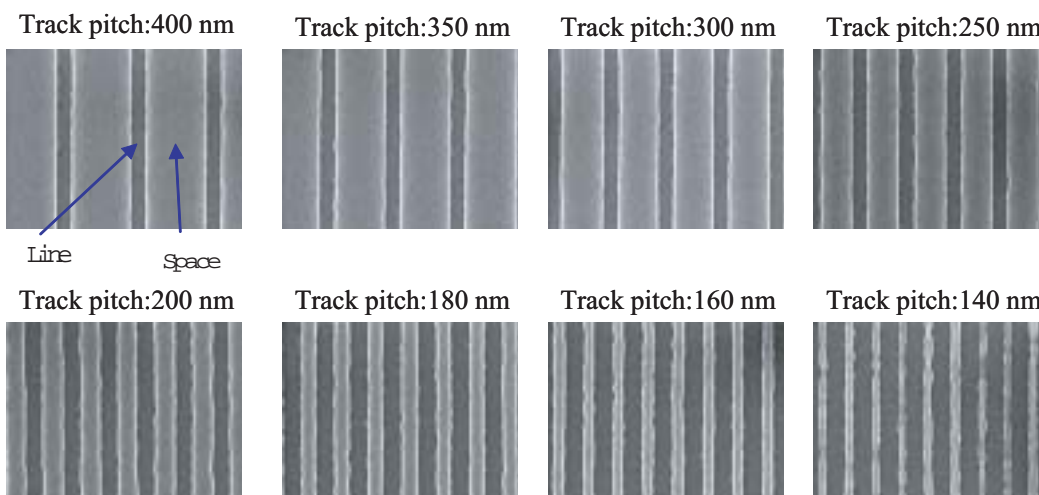


Fig.2 Experimental resolution limits at $0.81 \mu\text{mC}/\text{cm}$.

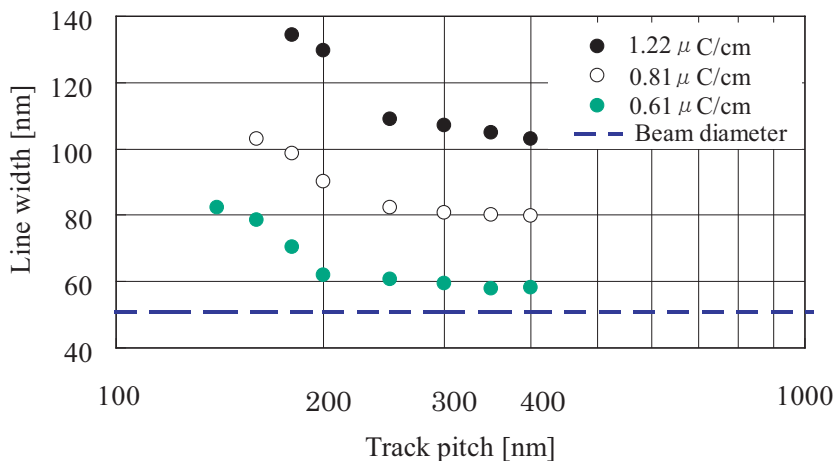


Fig.3 Relationship between line width and the line dose.

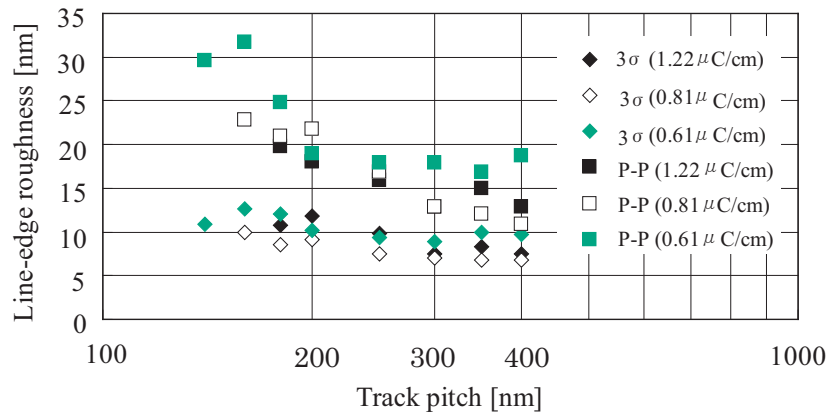


Fig. 4 Relationship between track pitch and line edge roughness.

ラインパターンが形成可能であることを確認した。

さらに詳細なパターン形状評価として、Fig. 4 に電子顕微鏡を用いたライン幅の変動 (p-p) およびライン幅の標準偏差 (3σ) を評価した結果を示す。ライン幅変動およびライン幅の標準偏差はトラックピッチが狭まるに連れてともに大きくなることが確認された。この現象は、隣接する電子ビームの照射位置が狭まることによりパターン形状が大きな変動をもたらされていることから、近接効果によりパターン形状変化が発生していると考えられる。

4. 近接効果

高密度記録を実現するためには、電子の振る

舞いを把握することが重要である。そこで、電子ビーム記録における電子の振る舞いについて述べる。Fig. 5 に電子ビームがレジストに到達した後の散乱の振る舞いを示す。電子はレジスト表面に照射された後に散乱を伴いながらレジスト中を進む。この時の電子散乱が前方散乱である。レジストは密度の低い材料で構成されており、我々の採用している 50keV のエネルギーの電子においては、前方散乱範囲は小さいと考えられる。一方、レジストを突き抜けた電子は基板表面に到達し、電子散乱を伴いながら基板中を進む。基板はレジストと比較して密度の高い材料で構成されていることから、散乱範囲は広範囲にわたり、レジストへ戻る散乱電子も発生する。この散乱を後方散乱という。

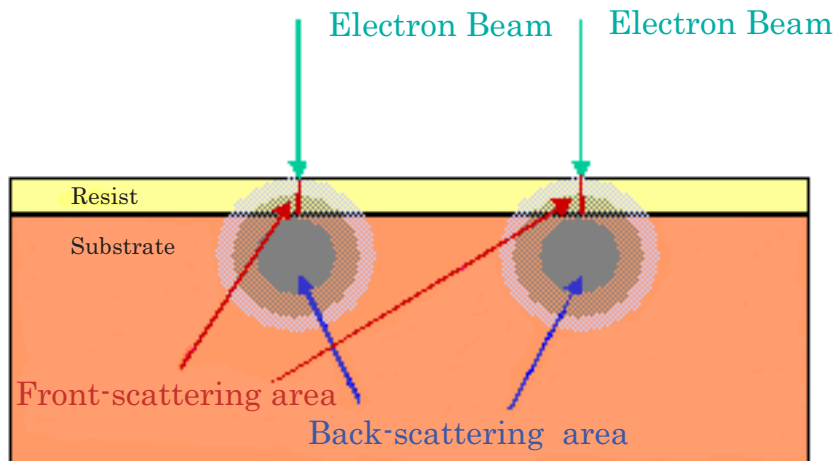


Fig. 5 Electron scattering.

つぎに近接効果について説明を行う。Fig. 6に近接効果現象を示す。高密度記録の場合は、パターン形成のために電子ビームの照射位置間隔は狭まる。その結果、隣接する電子ビーム照射により発生した後方散乱範囲内に電子ビーム記録を行っていくこととなる。ゆえに、パターンを記録するために照射された電子以外にも隣接する電子照射位置からの後方散乱電子が露光に関与することとなる。ゆえにFig. 3に示したように250nm以下の狭トラックピッチにおいて、ラインパターン幅が増加するような現象をもたらしたのである。

5. 近接効果低減プロセス

電子ビームを用いた高密度記録を実現するためには、近接効果低減を実現することが重要である。基板中での電子は、エネルギーを失いながらさまざまな方向に散乱を繰り返し、その散乱は散乱に必要なエネルギー以下となるまで続く。1回の散乱で電子が散乱する距離は平均自由工程と呼ばれ、次式(1)で表される⁽⁴⁾。

$$\lambda = k \times \frac{VA}{\rho Z^{1/3}(Z+1)} \quad \text{----- (1)}$$

ここで、kは定数であり、Vは加速電圧、Aは基板を構成する材料の原子量、 ρ は基板構成する材料の密度、そしてZは基板を構成する材料の原子番号である。

近接効果を低減する手法として、我々は平均自由行程を長くすることにより、レジストへ到達する後方散乱電子の数を低減し、高密度、高精細なパターンを実現することを検討した。式(1)より、平均自由行程は電子の加速電圧と基板を構成する材料の状態により変化する。よって、平均自由行程を長くするためには、加速電圧を高くするか基板を構成する材料を最適化することにより実現することができると考えた。今回の実験においては、加速電圧(50 kV)は固定とし、基板材料の変更のみで近接効果の低減を試みた。

基板材料の選定には、式(1)から無定形炭素基板を採用した。従来使用していたシリコン基板と無定形炭素基板における加速電圧50 kVでの平均自由行程を式(2)、(3)に示す。また双方の基板材料特性をTableに示す。

$$\lambda_{Si} = k \frac{VA}{\rho Z^{1/3}(Z+1)} = 16628 \times k \text{ [nm]} \quad \text{-- (2)}$$

$$\lambda_C = k \frac{VA}{\rho Z^{1/3}(Z+1)} = 31061 \times k \text{ [nm]} \quad \text{-- (3)}$$

Table Material conditions.

	Silicon	Carbon
Atomic number	14	6
Atomic mass	28.0855	12.011
Density	2.336 g/cm ³ (at 20°)	1.52 g/cm ³ (at 20°)

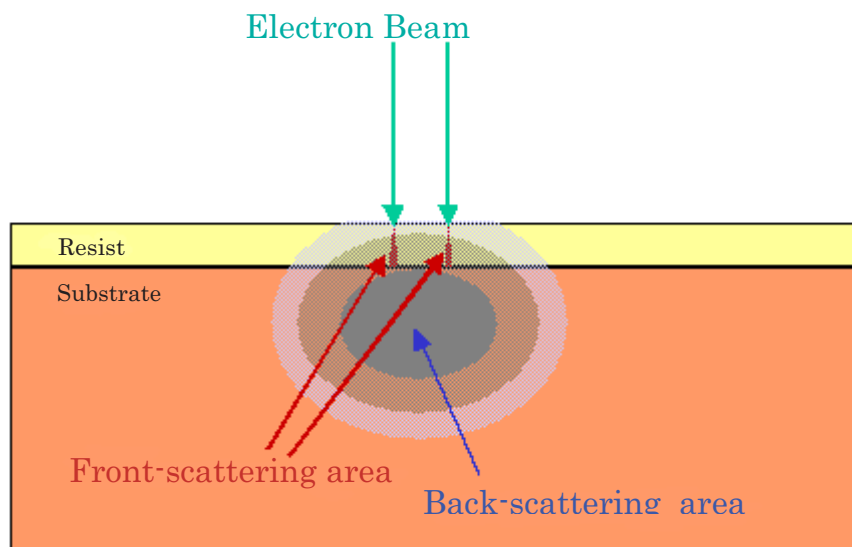


Fig. 6 Proximity effect

ここで、加速電圧は 50 kV を用いた。

式(2)、(3)に示すように、無定形炭素基板を用いることにより約 1.8 倍の平均自由工程の上昇が期待できる。

6. 炭素基板での記録限界評価

今回選定した炭素基板において、平均自由工程が長くなった効果として記録限界性能を評価した。評価実験としては、シリコン基板の実験と同様により狭いトラックピッチにおけるライ

ンアンドスペース記録を行い、記録限界を評価することとした。実験で用いた実験条件は表 1 と同様である。実験の結果得られたパターン形状を Fig. 7 に示す。トラックピッチの条件は 400nm から 100nm とし、Fig. 7 に示すように 400nm から 120nm までのラインアンドスペースのパターニングが $0.81 \mu\text{C}/\text{cm}$ のラインドーズにて実現された。より性能比較を容易にするために Fig. 8 にシリコン基板と炭素基板のライン幅比較グラフを挙げる。Fig. 8 に示すように、

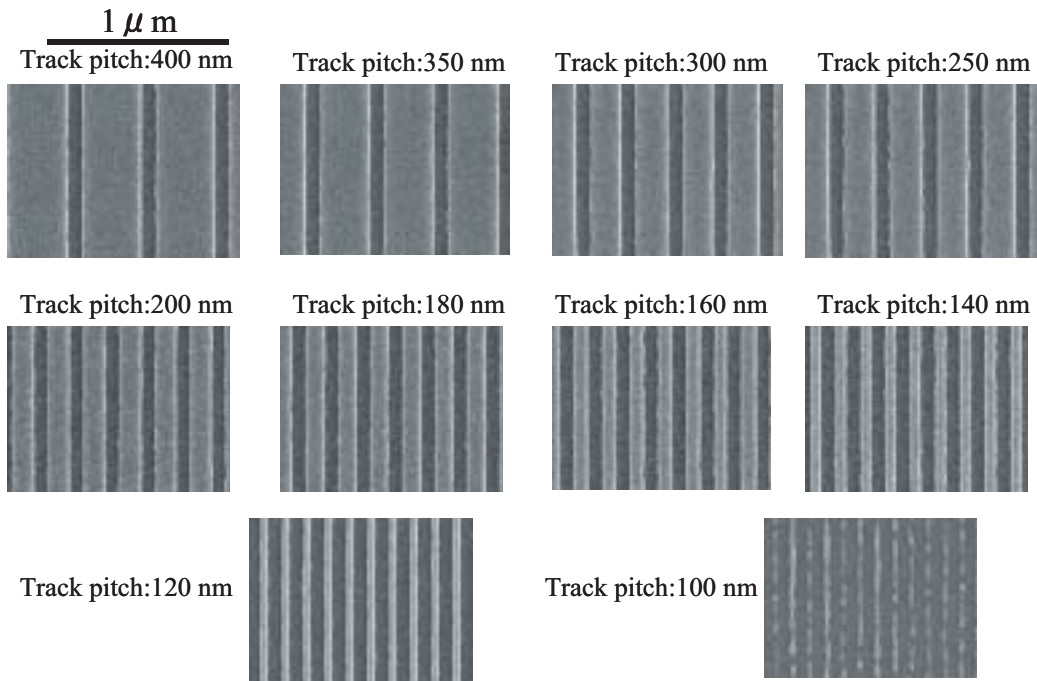


Fig. 7 Experimental resolution limit with carbon substrate.

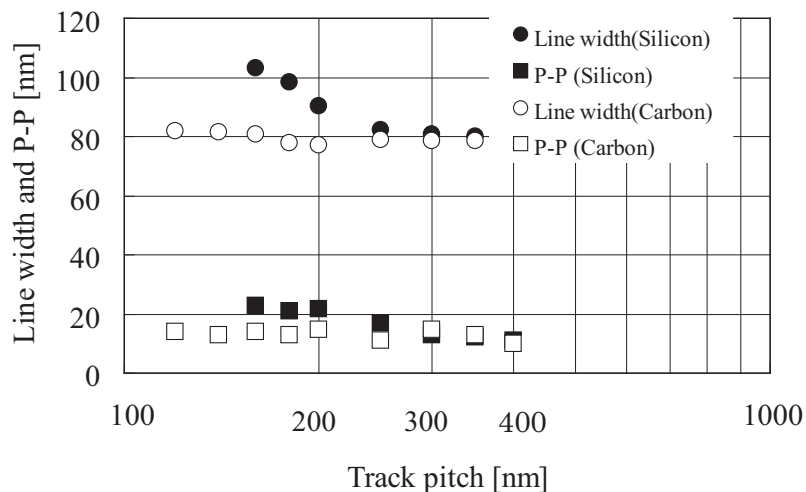


Fig. 8 Comparison between silicon substrate and carbon substrate at $0.81 \mu\text{mC}/\text{cm}$

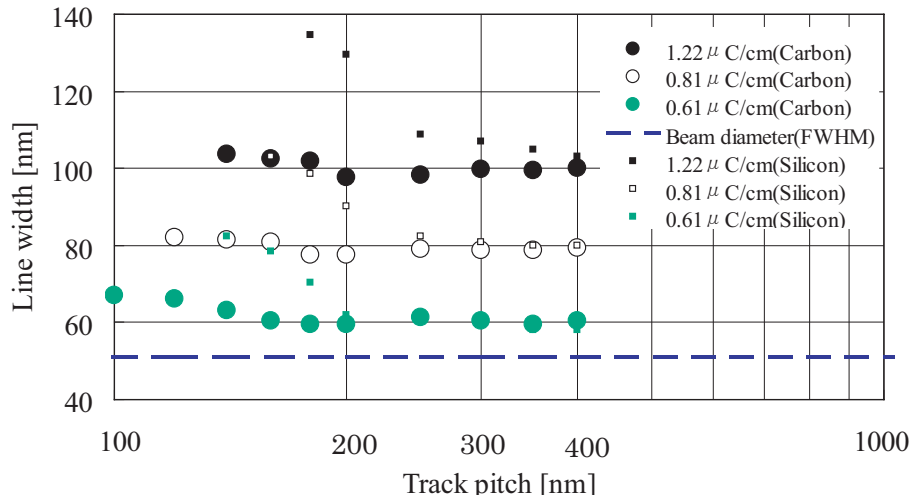


Fig. 9 Relationship between line width and line dose.

狭トラックピッチ化するにつれ、シリコン基板においてはライン幅の増大が確認されたのに対して、炭素基板の実験においては、ライン幅はほぼ変化しない結果が得られた。また Fig. 9 にラインドーズを $1.22 \mu\text{C}/\text{cm}$ と $0.61 \mu\text{C}/\text{cm}$ に変更した際の両基板におけるライン幅評価結果を示す。Fig. 9 より、異なるラインドーズにおいてもライン幅の増大は炭素基板を用いることにより低減されていることが確認され、 $0.61 \mu\text{C}/\text{cm}$ のラインドーズ条件では 100nm ピッチのラインアンドスペースを実現した。以上の結果より、平均自由工程を長くするために、プロセス基板材料として炭素を採択することにより近接効果の減少を確認した。

7. 超高密度記録

さらに炭素基板を用いたプロセスにおいて、超高密度記録実験を行った。超高密度記録を実現するために、電子ビームのビーム径を 31nm に調整し、実験を行った。Table に実験条件を示した。

Fig. 10(a) は Blu-ray タイプの ROM ディスクとして 25GB 容量のパターニングを示す。そして、超高密度記録パターンとして、Fig. 10-(b), (c), (d) に 12cm 直径、DVD 換算の光ディスク容量として 348GB , 424GB そして 510GB のパ

ターンを示す。これらの記録密度は、それぞれ $205\text{Gb}/\text{in}^2$, $250\text{Gb}/\text{in}^2$ そして $300\text{Gb}/\text{in}^2$ に相当する。以上のように電子ビーム記録において $200\text{Gb}/\text{in}^2$ 以上の記録密度を実現することが確認された。

Table Experimental condition 2.

Beam energy: 50 keV	Resist: ZEP -520 (65 nm)
Beam current: 12 nA	Developer: ZED - N50
Beam diameter: 31 nm	Developing: Dipping

8. まとめ

EBR を用いた高密度記録の可能性を検討するために、狭トラックピッチにおけるラインアンドスペース記録を行い、近接効果によりパターンニング解像度が劣化することを確認した。近接効果を低減するために、基板材料中の平均自由工程に着目した。炭素材料を基板に用いることにより高密度記録の改善を確認した。さらに超高密度記録に炭素材料基板のプロセスを適用し、 $300\text{Gb}/\text{in}^2$ までの超高密度記録を確認した。

参考文献

- (1) Y. Kojima, H. Kitahara, O. Kasano, M. Katsumura and Y. Wada: Jpn. J. Appl. Phys. 37 (1998), 2137.

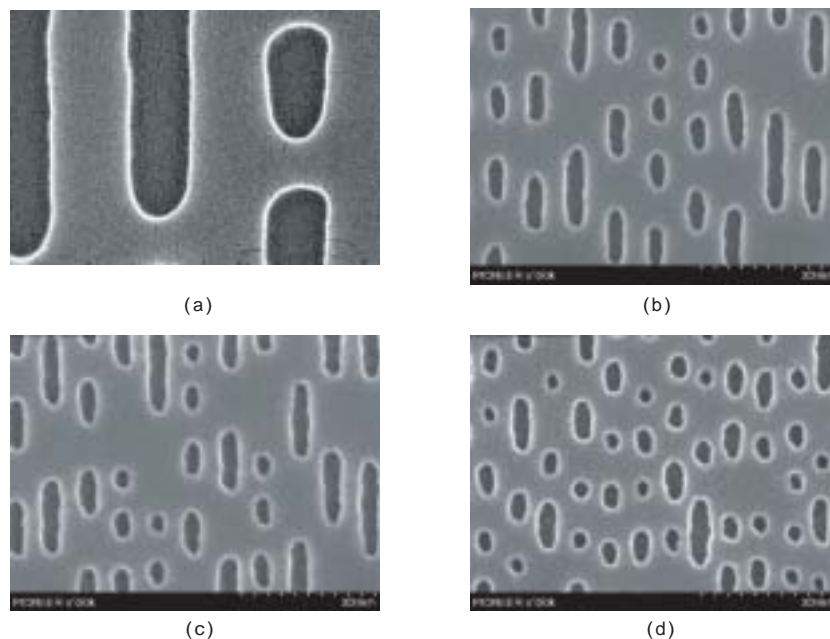


Fig.10 Ultra high-density recording, (a) 25 GB BD-RQM (Density: 15 Gbits/in² trackpitch: 320 nm, minimum pit length: 149 nm, modulation: 17PP), (b) 348 GB (Density: 205 Gbits/in², track pitch: 90 nm, minimum pit length: 45 nm, modulation: 8/16), (c) 424 GB (Density: 250 Gbits/in², track pitch: 80 nm, minimum pit length: 41 nm, modulation: 8/16), (d) 510 GB (Density: 300 Gbits/in², track pitch: 70 nm, minimum pit length: 39 nm, modulation: 8/16).

(2) O. Kasono, M. Sato, T. Sugimoto, Y. Kojima and M. Katsumura: Jpn. J. Appl. Phys. 43 (2004), 5078.
 (3) M. Katsumura, H. Nishiwaki, T. Mitsuhashi, M. Okano, T. Iida, A. Kouchiyama and H. Inoue: Jpn. J. Appl. Phys. 41, (2002), 1698.
 (4) B. P. Nigam, M. K. Sunderesen and T. -Y. Wu: Phys. Rev. 115 (1959), 491.

筆者紹介

勝村 昌広 (かつむら まさひろ)
 技術開発本部 総合研究所
 ナノプロセス研究部。
 細田 康雄 (ほそだ やすお)
 技術開発本部 総合研究所
 ナノプロセス研究部。
 北原 弘昭 (きたはら ひろあき)
 技術開発本部 総合研究所
 ナノプロセス研究部。
 小林 正規 (こばやし まさき)
 技術開発本部 総合研究所
 ナノプロセス研究部。

佐藤 恵 (さとう めぐみ)
 技術開発本部 総合研究所
 ナノプロセス研究部。
 加園 修 (かその おさむ)
 技術開発本部 総合研究所
 ナノプロセス研究部。
 橋本 和信 (はしもと かずのぶ)
 技術開発本部 総合研究所
 ナノプロセス研究部。
 飯田 哲哉 (いいだ てつや)
 技術開発本部 総合研究所
 ナノプロセス研究部 部長。
 栗山 和己 (くりやま かずみ)
 技術開発本部 総合研究所 次長。
 横川 文彦 (よこがわ ふみひこ)
 技術開発本部 総合研究所 次長。