集束イオンビーム化学気相成長法における成長高さ補正に関する研究

Growth height correction on focused-ion-beam chemical vapor deposition

○ 村尾 裕規 米谷 玲皇 正 割澤 伸一 正 石原 直 (東京大学)

Yuki Murao, Reo Kometani, Shin'ichi Warisawa, Sunao Ishihara
The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

Focused-ion-beam chemical vapor deposition (FIB-CVD) is a key technology to fabricate the three-dimensional (3-D) nano- and microstructures. However, FIB-CVD has a problem on the faithfulness of the 3-D structure growth. Therefore, vertical growth characteristics of a quadrangular prism as an evaluation model were evaluated in this study. As a result, the growth height of a quadrangular prism structure depended on the number of the irradiation point, and the correction method of a growth error was also examined to achieve the arbitrary 3-D structures. And, we found that the vertical growth rates follow the sigmoid function and the vertical growth error can be corrected by controlling the irradiation time of Ga^+ FIB.

Key Words: *focused-ion-beam chemical vapor deposition (FIB-CVD), three-dimensional nanostructure fabrication, form correction, deposition property, computer aided manufacturing*

1. 研究の背景

近年の微細加工技術の発達により, MEMS / NEMS (Micro / Nano Electro Mechanical Systems) といった微小な機能デバイスの研究が盛んに行われている。これらの加工には二次元微細加工技術が用いられているが, 原子サイズを考慮すると限界に近い微細化が達成されている。機能デバイスのさらなる高性能化のためにはデバイス構造の三次元化が必要であり, 加工自由度の高い三次元微細加工技術が求められている。

本研究では, 集束イオンビーム励起表面反応を用いた化学気相成長法 (Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition: FIB-CVD^[1]) に着目した。FIB-CVD は数 10 nm ~ 数 10 μm の三次元構造体を形成可能な技術である。また, 原料ガスを選択することにより様々な材料で三次元構造体を形成できる。FIB-CVD による三次元ナノ構造作製原理の模式図を図 1 に示す。原料ガス雰囲気下で FIB を基板や構造物に照射すると, FIB 照射により発生した二次電子や反跳原子により, 基板や構造物の表面に吸着した原料ガス分子が解離され, 原料ガス分子の不揮発性成分が堆積する。 Ga^+ FIB の位置を変えずに照射し続けると構造物は垂直に, FIB を少しずつ走査しながら照射すると構造物は横方向に成長する。FIB の照射位置, 照射時間を精密に制御し, 上記プロセスを連続的に行うことにより, 任意形状の三次元構造を形成できる。

しかし FIB-CVD には作製精度に関する課題がある。通常の, 三次元構造の作製は 3D-CAM (Computer Aided Manufacturing) を用いて設計モデルを図 2 のように X, Y, Z 方向に一定の間隔のボクセルデータに分割し, 各ボクセルに対し FIB 照射を行い構造を作製する^[2]。このように等間隔で FIB を照射する場合, XY 方向の FIB 照射点数に依存し垂直方向の堆積レートが変化することが報告されている^[3]。例え

ば, 図 2 に示すように, 同じ高さに設計された構造体であっても, 断面積の違いにより, 実際には異なった高さの構造体が形成されることがある。このように FIB-CVD には設計形状に対する精度に関し課題が残されている。そこで本研究ではより高い精度での三次元ナノ構造形成に必要な形状補正技術の確立を目的とし, 上記の FIB 照射点数に起因する構造成長高さについての誤差の補正について検討した。

2. 研究方法

本研究では最も基本的な構造体である四角柱を対象とし, その成長高さの補正法を検討した。

上記の FIB 照射点数に依存する堆積レート変化は, 照射された FIB の重ね合わせにより, 以下のように説明できる。FIB のビームプロファイルは式(1)のガウス分布で表わされることが知られている^[4]。

$$I(r, \sigma) = \frac{I_0}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

ここで I_0 は照射される電流の総量, σ はビームの標準偏差, r はビーム中心からの距離である。ビーム径は分布の半値幅 d が用いられ, 標準偏差 σ を用いて式(2)のように表される。

$$d = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma \quad (2)$$

三次元描画の際の描画ピッチは数 nm であるのに対し本研究で用いたビーム径 d は 10 nm 程度であるため, 図 3 に示すように構造作製において多くのビームが重なり合う。その重ね合わせにより堆積レートは照射点数が増えるに従い増加し, 照射点数がある値に達すると飽和する。本研究では, この飽和堆積レートでの形成高さを基準とし, 任意の照射点数でその高さになるよう補正を行うこととした。

Fig. 1 Schematic of the 3-D nanostructure fabrication by FIB-CVD.

Fig. 2 Schematic of the voxel data generation and the 3-D nanostructure fabrication using the 3D-CAM system.

Fig. 3 Irradiation number dependency of the deposition rate.

Fig. 4 Voxel data model of a quadrangular prism structure as an evaluation structure.

堆積レートの補正を行うためのパラメータとしてビーム電流や原料ガス密度、基板温度等があるが、これらは高速制御が困難である。一方ビーム照射時間は μsec 単位での制御が可能であるため、本研究ではビームの照射時間を制御することによる形状補正を試みた。ここで本研究の四角柱構造体作製に関わるパラメータについて説明する。図4は作製する四角柱構造の設計データモデルであり、青線で囲まれた部分がボクセルを、赤点がビーム照射点を表している。四角柱構造体の底面の一边の長さを w_x , w_y (nm), 水平方向のビーム照射間隔を照射ピッチ p (nm), 垂直方向の積層数を n , 各照射点へのビーム照射時間を t (μsec), ビーム照射前の原料ガス吸着待機時間を b (μsec) と定義した。

3. 照射点数ごとの堆積レート算出

本研究では、ピッチ p を2 nm, 積層数 n を50層, 照射時間 t を15 μsec , 吸着待機時間 b を30 μsec とし、角柱の一边の長さ w_x , w_y をそれぞれ50 nmから450 nmまで50 nmずつ変化させ、四角柱構造を作製した。なお、この四角柱構造の作製では、加速電圧30 kV, ビーム電流1 pAのGa⁺ FIBを用いた。また、原料ガスはフェナントレン(C₁₄H₁₀)を用いた。そのため形成された構造体は、ダイヤモンドライクカーボン製である。走査型イオン顕微鏡を用いて構造を真横から観察することにより、形成された高さ h を計測した。この h から式(3)を用いて、四角柱構造形成における堆積レートを求めた。

$$r = h / (n \cdot t) \quad (3)$$

その結果を図5(a)および(b)に示す。図5(a)に示すように、堆積レートは一边の長さ、すなわち照射点数に依存して変化した。また図5(b)に示すように、 $w_x = w_y$ の場合 $w_x = 350$ nm付近で、堆積レートが約0.48 nm/ μsec に飽和することがわかった。

Fig. 5 Relationship between the side length (w_x , w_y) and the deposition rate, (a) side length dependency, (b) deposition rate when $w_x = w_y$.

Table 1 Fitting parameters of the 3-D sigmoid function.

Z_0	B	C	D	E	F
0.04079	0.5551	120.58	1.25	54.19	1.62

Fig. 6 SIM images of quadrangular prism structure fabricated (a) without and (b) with growth height correction.

Fig. 7 Difference from a designed height of 730 nm.

た。この堆積レートを式(4)の三次元シグモイド関数でフィッティングしたところ図5(a)に示すようになった。

$$Z = Z_0 + \frac{B}{1 + \left(\frac{w_x}{C} \right)^{-D}} \left[1 + \left(\frac{w_y}{E} \right)^{-F} \right] \quad (4)$$

ここで Z_0 , B, C, D, E, Fは表1に示す値のフィッティングパラメータである。三次元シグモイド関数は累積正規分布関数であるため、FIBの重ね合わせの表現に適しており、図5(a)のようによく一致している。

次に形成高さが一定となる照射時間算出のための補正関数を求めた。これは飽和堆積レートをフィッティング関数で割ることにより導出した。こうして求めた補正関数を用いて各 w_x , w_y における照射時間を算出し、その補正照射時間を用いて四角柱構造の作製を行った。なお、飽和堆積レートで形成される四角柱の高さ730 nmを、本実験の形成目標高さとした。その結果、図6(b)のように w_x , w_y に依らず一定の高さで四角柱が形成できることを確認した。また、補正効果を評価するため目標高さとの誤差をプロットしたところ、図7のようになった。補正した場合の作製誤差について標準偏差をとると目標高さの約1.2%であった。これは各構造の作製時にビームや原料ガスの状態が完全に同一でないために起こるものであり、本研究で導出した補正関数は成長高さの補正に十分効果的であると言える。

4. 結論

本研究では、FIB-CVD構造作製の高精度化を目的として、照射点数に対し照射時間を制御することによる照射時間制御による成長高さの補正法を提案しその評価を行った。また、四角柱構造における照射点数と堆積レートの関係式を示した。結果としてこれまで同じ高さで形成できる構造サイズが400 nm以上であったのに対し、本研究で導出した照射時間補正関数を用いることで任意の加工サイズで正確に構造形成できることを確認した。しかし、この補正関数は四角柱構造体のみに適用可能な関数である。より複雑な三次元ナノ構造形成に適用するには、複雑な形状を四角柱構造体に分割する等、補正関数の適用法について検討する必要がある。

引用文献

- [1] S. Matsui, *et al.*: J.Vac.Sci.Technol. B18,3181(2000).
- [2] T. Hoshino, *et al.*: J. Vac. Sci. Technol. B 21, 2732 (2003).
- [3] R. Kometani, *et al.*: Microelectron. Eng. 86, 552 (2009).
- [4] I.Utke, *et al.*: J.Vac.Sci.Technol. B 26, 1197 (2008).