低エネルギー集束イオンビーム直接蒸着装置の開発*

長町 信治**・山蔭 康弘**・丸野 浩昌**

上田 雅弘**・杉本 征治**・浅利 正敏**

石川 順三***

(受付1993年7月9日, 掲載決定1993年9月24日)

Development of Low Energy Focused Ion Beam System
for Direct DepositionShinji NAGAMACHI**, Yasuhiro YAMAKAGE**, Hiromasa MARUNO**,
Masahiro UEDA**, Seiji SUGIMOTO**,
Masatoshi ASARI** and Junzo ISHIKAWA***

**(Keihanna Research Laboratory, Shimadzu Corporation, Seika-cho, Kyoto 619-02, Japan)

*** (Department of Electronics, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto 606-01, Japan)

(Received July 7, 1993, Accepted September 24, 1993)

1. はじめに

集束イオンビーム技術は, 1970年代末に始まり¹⁾, 現在までに, イオン注入, レジスト露光, スパッタエッチング, イオンアシストエッチング, イオンアシスト蒸着, 走査イオン顕微鏡, 2次イオン質量分析といった利用方法で用いられてきた。集束イオンビームはビーム径そのものが微細であり, ビーム位置を電氣的に任意にコントロールできるために, マスクレスあるいはレジストレスで微細加工を行うことが出来る。通常エネルギーとしては数10 keVのイオンビームを用いるが, 加工時の照射損傷を誘起しやすいという問題点があり, 低エネルギー化により照射損傷導入率を低減させる研究も行われている^{2,3)}。低エネルギーイオンビームの別の利用方法として化成蒸着法によりGaAsの成膜を試みている例も

ある⁴⁾。我々は, 先駆的な試み^{5,6)}に引続き, 蒸着領域まで低エネルギー化を押し進めることにより集束イオンビームでイオンビーム蒸着を行うことを考案し, それを実現するための装置を開発し, 新たな成膜方法として確立した⁷⁾。この集束イオンビーム直接蒸着法は, アシスト蒸着法⁸⁾と比較して, 高純度でバルク並の電氣的特性を持つこと, 低エネルギーなので照射損傷が少ないこと, およびガスを用いないで超高真空中で成膜するためにガスに由来する汚染がないといった特徴を持つことが期待される。

2. 低エネルギー集束イオンビーム装置の概要

我々は, 合金イオン源から引き出した金属イオンビームを質量分離した後, 50~100 eV程度のエネルギーまで減速し, かつサブミクロンに集束することができる低エネルギー集束イオンビーム装置を設計製作した。

設計に当たってまず光学系の集束特性を計算し, 最適な光学部品の形状と配置を決定した。Fig. 1に球面収差

* 平成5年3月29日, 30日 第40回応用物理学関係連合講演会において講演

** 島津製作所けいはんな研究所 (〒619-02 京都府相楽郡精華町)

*** 京都大学工学部 (〒606-01 京都市左京区)

Fig. 1 The calculated beam diameter of decelerated beam as a function of ion energy. The spherical aberration and the chromatic aberration are taken account.

と色収差の評価より求めたビームエネルギーとビーム径の関係を示す。対物レンズを出るまで20 kVで加速したビームを基板直前で減速したときの計算結果である。評価手法は、光学部品の電界を有限要素法により計算し、その電界により軌道方程式を解き、最後に積分公式を用いて収差係数を得るものである。発表されているプログラム⁹⁾にいくつか改良を加えたものを用いた。この計算では、50 eVまで減速しても減速しないときと比べ、ビーム径はおおよそ2倍程度であり、100 pAのビーム電流に対して0.1 μm程度という結果が得られている。

我々の設計した光学系の特徴は、8極のデフレクターを2段構成にして対物レンズの上部に配置したことと、対物レンズ直後の基板に減速電位を印加し基板直前でビームを減速することである。装置の概念図をFig. 2に示す。液体金属イオン源には、含浸電極型チップ¹⁰⁾を抵抗発熱体のブロックで固定したものを用い、Au-Si合金、Nb-Au-Cu合金、Al-Au-Ge合金等を充填してAu⁺、Cu⁺、Nb²⁺、Al⁺、等のイオンを発生させた。引き出されたイオンは、質量分離器により必要なもののみ選別され、デフレクター、対物レンズにより偏向、集束されながらステージ上の基板に入射する。基板に減速電位をかけることにより、20 keVで入射したAu⁺イオンは、0~20 keVの範囲で連続的にエネルギーを変えることが出来る。

真空系は3台のイオンポンプと補助的に用いる2台のターボポンプから構成されている。運転中はステージ周辺は、 $3 \sim 5 \times 10^{-7}$ Pa程度の真真空度に保たれている。搬

Fig. 2 Schematic view of the low energy focused ion beam direct deposition apparatus.

Fig. 3 Photograph of the low energy focused ion beam direct deposition apparatus.

送機室を経由してサンプル交換と真空引きにかかる時間は、おおよそ1時間程度である。

Fig. 3に装置の写真を示す。

3. 金属薄膜の直接蒸着とその評価

上記装置により、エネルギー30~200 eVの領域におけるAu⁺ビームについて最小ビーム径0.5 μm~最大ビーム径8 μmが得られている⁷⁾。ビーム電流値はビーム径に対応して40 pA~10 nAである。ビーム電流密度は

Fig. 4 The sticking probability of Cu^+ ion as a function of Cu^+ ion energy.

Fig. 6 Resistivity of deposited gold film as a function of Au^+ ion energy.

Fig. 5 Auger electron spectroscopy of gold thin film deposited on silicon substrate as a function of sputtering time. One minute sputtering time is corresponding to 10 nm depth.

Fig. 7 Resistivity of deposited copper film as a function of Cu^+ ion energy.

ビーム径によらず、およそ 20 mA/cm^2 であり、これは付着確率を 1 と仮定すると、ビームスポット内での蒸着速度は、およそ 20 nm/s に相当する。

照射したイオン数と成膜した原子数との比を付着確率と定義し、ビームエネルギーとの関係を Cu^+ について測定した結果を Fig. 4 に示す。200 eV を超えたあたりに蒸着領域とスパッタエッチング領域の境界がある。50 eV 程度で入射したイオンはほぼすべて成膜に寄与していることがわかる。これらは、 Au^+ の場合⁷⁾ とほぼ同じ結果である。なお、低エネルギー側で付着確率が 1 を超えている点があるが、成膜した原子数の算出においてバルクの原子密度を用いたため生じた誤差であろうと思われる。 Au^+ に関しては、54 eV のエネルギーで成膜し

たパターンの密度がバルクよりも 7% 程度小さいことを確認している。

シリコン基板上に Au^+ を蒸着し、AES で分析した結果を Fig. 5 に示す。表面以外では、酸素と炭素の混入は検出限界以下であり、高純度の膜形成が可能であるという予想に違わない結果となっている。

次に、抵抗率を測定した結果を示す。Fig. 6 が Au^+ を蒸着した場合、Fig. 7 が Cu^+ を蒸着した場合のエネルギーと抵抗率の関係を示す。測定は、半絶縁性の GaAs 基板上に測定用のラインを蒸着し、引続き 4 探針測定用のパッドも同じビームを用いて蒸着した⁷⁾。金、銅ともバルク抵抗率に近い値 (1.5 倍程度) となっている。金にはエネルギー依存性が認められないが、銅には

エネルギー依存性が認められる。これらが何に起因するものかは現在のところ明らかではないが、原子間の結合状態がイオン種、入射エネルギーに深くかかわっていることを示唆しており、集束イオンビーム直接蒸着法がその解明に向けての重要なツールとなり得ることを示している。

最後に、超伝導体を成膜した結果を示す。Nb²⁺を用いて成膜したパターンの臨界温度の測定を行った。その結果、270 eV のエネルギーのビームを用いて成膜した 58 nm 膜厚のパターンに関し、8.9 K の臨界温度（バルク値は9.3 K）が得られた。

4. おわりに

低エネルギー集束イオンビームでイオンビーム蒸着を行う集束イオンビーム直接蒸着法の概念をあきらかにし、それを実現するための、低エネルギー集束イオンビーム直接蒸着装置の概要を述べた後、現在までに得られているイオンビームの性能、および蒸着した金属膜の電気的な特性を中心とした評価結果を述べてきた。それらの結果は、この手法が、予想した通り、高純度、ダメージレス、クリーンというきわだった特徴を持つことを証明しつつある。そのような特徴から可能となる新しい成膜手法を確立すると共に、その応用に関しても探索していく予定である。

謝 辞

イオン光学系の評価に当たってご指導いただいた京都府立大学春山洋一助教授に深く感謝致します。

〔文 献〕

- 1) R. L. Seliger, J. W. Ward, V. Wang and R. L. Kubana, Appl. Phys. Lett. 34 (1979) 310.
- 2) D. H. Narum and R. F. W. Pease, J. Vac. Sci. Technol. B6 (1988) 966.
- 3) H. Kasahara, H. Sawaragi, R. Aihara, K. Gamo, S. Namba and M. Hassel Shearer, J. Vac. Sci. Technol. B6 (1988) 974.
- 4) K. Pak, T. Shimomura, I. Saitoh and H. Yonezu, J. Vac. Sci. Jpn. 35 (1992) 899.
- 5) D. H. Narum and R. F. W. Pease, J. Vac. Sci. Technol. B6 (1988) 2115.
- 6) J. Ishikawa, H. Tsuji, T. Kashiwagi, Y. Aoyama and T. Takagi, Nucl. Instrum. Methods B37/38 (1989) 151.
- 7) S. Nagamachi, Y. Yamakage, H. Maruno, M. Ueda, S. Sugimoto, M. Asari and J. Ishikawa, Appl. Phys. Lett. 62 (1993) 2143.
- 8) J. Melngailis and P. G. Blauner, Mater. Res. Soc. Proc. 147 (1989) 127.
- 9) E. Munro, Cambridge Univ. Engineering Dept. Report CUED/B-ELECT/TR 45 (1975).
- 10) J. Ishikawa and T. Takagi, J. Appl. Phys. 56 (1984) 3050.