

点欠陥の自己組織化的挙動を利用した 新しい微細構造形成法

谷脇雅文 新田紀子

高知工科大学工学部
〒 782-8502 高知県香美郡土佐山田町宮ノ口 185

E-mail : taniwaki.masafumi@kochi-tech.ac.jp, nitta.noriko@kochi-tech.ac.jp

要約 : この論文ではイオンビームを使った新しいナノ構造作製技術が提案され、その可能性が実験的に検証されている。この手法は二つの工程からなる。まず、精度良く制御できる FIB (集束イオンビーム) をつかって基板表面に欠陥を規則正しく配列する。半導体基板表面にイオンビームを等間隔に照射してカスケード損傷をつくり、表面下にボイドを等間隔で配列する。次に、適当な実験条件のもとで通常のイオン照射する。これによって移動度の大きい格子間原子は、ボイドを隔てる隔壁に移動しこれを成長させる。また原子空孔はボイドに吸収されやはりボイドを成長させる。このようにして規則正しいセル状構造を自己組織化的に発達させる。室温で FIB を用いて実験し、この手法の有効性を確かめている。

Abstract : In this article, a new nano-fabrication technique using ion beam is proposed and its possibility is demonstrated experimentally. This technique has two procedures. The first is to prepare a regular initial array of defects on or under the substrate surface, where FIB (Focused Ion Beam) is used because of the precision and focusing of ion beam, at present. Ion beams are irradiated on semiconductor at constant intervals, to induce cascade damages and create voids at constant intervals under the surface. Second step is to develop the cellular structure from the starting array of voids (or hollows) by ion-implantation at the appropriate experimental conditions (substrate temperature, acceleration voltage, ion mass and ion dose). The highly mobile interstitials migrate far and vacancies which escaped recombination remain there. The walls separating the voids (or hollows) develop by the interstitial atoms migrating from the surround and the remaining vacancies move to the hollowed surface during implantation. In such a manner, a cellular structure partitioned by thin walls is fabricated self-organizationally. This technique is performed by FIB at room temperature and the availability is proved.

1. はじめに

爾来、構造の微細化は機能の量的な高度化をめざしたものであった。ごく最近までの半導体デバイス分野にみられるように、配線等の微細化はトランジスタ集積度を向上させ、記憶容量、演算速度の向上をもたらした。これに対して最近の微細構造形成技術—いわゆるナノテクノロジーの潮流は、それにとどまらず新しい機能の発現をめざしている。そのため、従来技術の枠を超えた微細構造形成技術が望まれている。

伝統的なLSIテクノロジーはトップダウン技術と呼ばれ、リソグラフィ—エッチングを柱とするものであるが、これではサブミクロン程度の加工が限界である。最近になって、さらに微細な構造を形成するために、自己組織化や自己配列化といった自然現象を利用するボトムアップ技術が試みられている。代表的な例は、分子線エピタキシー (MBE: molecular beam epitaxy) を利用し、化合物半導体上に格子不整を利用して島形成を行い量子ドットを作ろうというものである。さらにトップダウンによってあらかじめ島成長のきっかけとなる構造を作ることで、ドットを規則的に成長させている。とはいえ、自己組織化現象の応用は限定的であり、より汎用的な微細構造形成法が望まれる。

筆者らは、イオン注入したGaSb表面に微細なセル状構造ができることを見出し、これが過飽和に導入された点欠陥の移動・消滅による自己組織化的現象の結果であることを示した(1-3)。ここで提案する新しい微細加工形成法は、あらかじめ人為的に規則的初期構造を与え、点欠陥挙動による自己組織化現象を利用してナノ構造を形成するものである。まずイオン注入に先立って基板表面に規

則的な初期構造を与える (トップダウン)。その方法としては、フォトリソグラフィなど伝統的な手法もあるが、ここではFIB = 集束イオンビームを利用する。その後イオン注入をおこないボトムアップにより規則正しい構造形成を試みる。

2. 提案した新しい微細構造形成法⁽⁴⁾

提案した微細構造形成法を Fig. 1 に示す。まずFIBで規則正しい初期構造—表面に浅い窪みを規則正しく配列、あるいは表面直下にボイドを規則正しく配列—を作る。この後、温度を制御したイオン注入を行って、表面微細構造を発達させる。窪みを隔てる壁に形成される格子間原子、原子空孔は合体消滅あるいは表面 sink に逃げるので、構造発達にはほとんど寄与しない。しかし、窪みの下に形成された格子間原子と原子空孔はそうならない。格子間原子は移動度が大きいので、一部は形成された場所から壁の下に移動する。ここには原子空孔が形成されないので合体消滅を免れ、壁の上方への発達に寄与

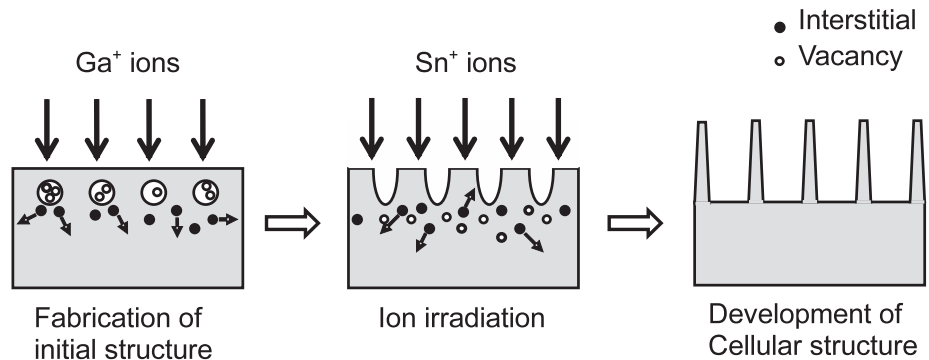


Fig. 1 Proposed nano-fabrication

する。消滅を免れ残された原子空孔は窪みに吸収されこれを深くする。このようにして初期構造を表面に垂直方向に発達させ、アスペクト比の大きいセルからなる表面微細構造をつくる。

この方法で期待できる微細化を評価する。まず現在の市販のFIBのビームの位置決め精度は0.5 nm、ビーム径は5 nmである。しかしながら、イオンが固体内に照射されると、カスケー

ド損傷が生じる。その広がりはいオン加速電圧 30 kV で 15 nm あり、通常の FIB 加工では初期構造の間隔はビーム径とあわせて結局 20 nm が限界となる。将来、セル間隔は加速電圧を 5 kV の場合のカスケード損傷の広がり 5 nm と壁厚 (5 nm) の和 10 nm に近づけられると期待される。

3. 点欠陥の移動度とボイド形成

微細構造形成法において点欠陥の移動とボイド形成は重要な要因である。以下に点欠陥の温度による振る舞いについて示す。物質における高エネルギーイオンの照射は絶え間ない原子の置き換わりによってたくさんの原子空孔、格子

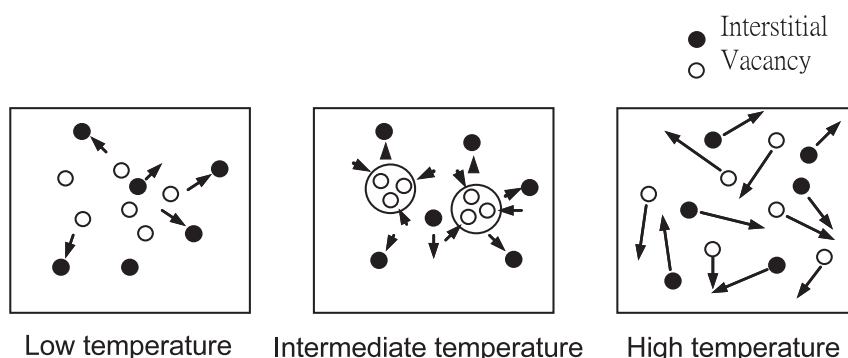


Fig. 2 Behavior of point defects induced to super-saturation.

間原子が形成される。トリムコードによれば 60 kV に加速した Sn^+ を GaSb に照射した場合約 3200 個の原子空孔と同数の格子間原子が形成される。これらの自由な点欠陥は物質中を移動し、相互作用する。形成された多くの点欠陥は再結合、2 次欠陥の形成、表面 (sink) に抜けることによって消滅する。ボイドはしばしば原子空孔と格子間原子の移動度の違いにより形成される。これらを図示したものが Fig. 2 である。十分に温度が低温でさえ格子間原子は移動し、原子空孔との再結合からのがれる。中間温度では原子空孔が移動しボイドが形成される。高温では原子空孔、格子間原子ともに移動しやすく低温と同様に再結合および表面に抜ける。

4. 微細構造形成時の最適温度

微細構造形成時の基板温度範囲について検討する。微細構造形成の実施において単結晶基板表面に規則的なナノメートルレベルの微細構造パターンの形成は、イオン注入をすることで生成する格子間原子と原子空孔の移動により成されるものである。深い窪みを成長させるには、生成される点欠陥のうち格子間原子のみが移動し、原子空孔はあまり移動せず深い窪みに吸収されるようにすればよい。原子空孔が活発に活動すると、これらが単結晶基板内部のあちこちで集合しボイドを多数作るために、既存の窪みに吸収されなくなる。つまり、イオン注入するときの温度範囲は、格子間原子が移動し、原子空孔があまり移動出来ない範囲に設定することで規則的なナノメートルレベルの微細パターンを形成することが出来る。金属では原子空孔は一般に融点 T_m (K) のおよそ 1/3 以上の温度で活発に移動するが、それ以下の温度ではほとんど移動できない。これが化合物半導体にも成り立つとすると、

規則的なナノメートルレベルの微細パターンは、融点 T_m のおよそ 1/3 以下の温度で形成し得る。たとえば、GaSb 単結晶基板のときは、 $T_m = 1001$ K なので 0 K ~ 340 K 程度の温度範囲なら原子空孔の移動を制御することが出来、規則的なナノメートルレベルの微細パターンが出来る。

5. 微細構造作製の試み

FIB で初期構造を等間隔でスポットで配置した。使用した FIB の加速電圧は 50 kV、イオン種は Ga^+ である。FIB は Micrion 9500 FIB を用いた。間隔は最小 50 nm のものまで作製することができる。またドーズ量は $10^{10} \sim 10^{15}$ ions/

cm² まで任意に制御できる。

初期構造を作製した後、FIB 内で画像観察スキャン（室温で 50 keV Ga イオンを一様に照射したことに相当する）し、スキャン前と比較した。

を行い、形成される構造の観察を行なっている。イオン注入時の基板温度、イオン加速電圧およびドーズ量の制御により微細構造の詳細を調べるとともに、微細化の限界を探っている。

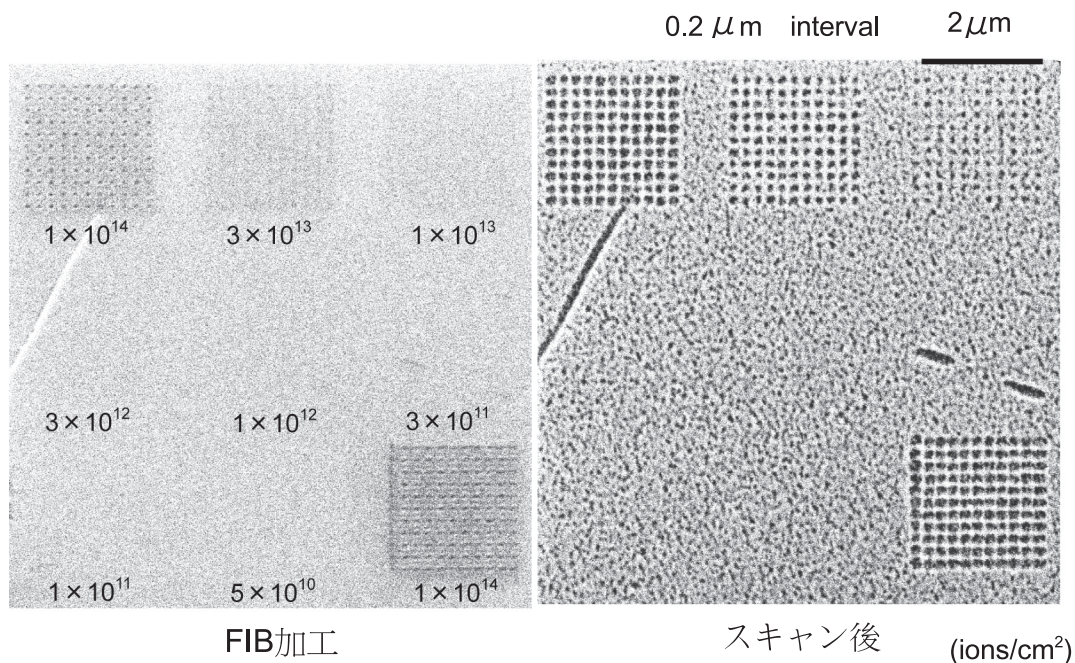


Fig. 3 An example of FIB machining.

その例を Fig. 3 に示す。初期構造が左の図、スキャンした後の画像が右図である。初期構造をつくったときのドーズ量が 1×10^{13} ions/cm² 以上のマトリックスについては、規則性はこわされず、像のコントラストから判断する限り、セル構造は深くなっているものと判断される。注入量が 3×10^{12} ions/cm² 以下のものについては、初期構造そのものがまったく観察されず、スキャン後の表面モフォロジーは初期構造なしの領域と同様である。この結果は規則的な初期構造さえ与えられれば、その後室温のイオン注入でも規則的な表面セル構造が形成されることを示している。

以上のような室温注入実験の結果より、初期構造形成後のイオン注入により窪みの成長が確認された。さらに FIB 加工後の低温イオン注入

文献

- (1) N. Nitta, M. Taniwaki, T. Suzuki, Y. Hayashi, Y. Satoh and T. Yoshiie, Materials Transactions 43, pp 674-680, 2002.
- (2) N. Nitta, M. Taniwaki, Y. Hayashi and T. Yoshiie, J. Appl. Phys. 92, pp 1799-1802, 2002.
- (3) 新田 谷脇, あたりあ第 43 巻 12 号, 1014, p200.
- (4) N. Nitta and M. Taniwaki, Nucl. Instrum. Meth. B206, pp482-485, 2003.