

微細加工用ビーム技術の現在と将来展望

石川 順三¹

京都大学 工学研究科 電子工学専攻
〒606-8501 京都市左京区吉田本町

概要

集積回路の微細加工の最小線幅は現在0.13 μ m程度であるが、この数年で0.05 μ mまで狭くなると言われている。このような微細加工を三次元的に実現するためには、深さ方向には極浅pn接合の形成や極薄ゲート絶縁膜形成技術が、横方向には0.05 μ m解像の微細パターン露光技術が必要になってくる。極浅pn接合形成にはデカボロンのような多原子分子イオンを用いた等価的超低エネルギーイオン注入法が、極薄ゲート絶縁膜実現には無帯電負イオン注入法が期待されている。一方、微細パターン形成のためには従来用いられてきた光露光技術ではもはや対応できないため、マルチ電子ビームを用いた直接描画技術やイオンビーム投影露光技術が利用されると考えられている。

1. はじめに

イオンや電子ビームは、精度の高い軌道制御を駆使すれば、数nm以下のビーム径に集束させることができる。このことは、イオンや電子ビームは、ナノメータオーダーの加工を行うために非常に適した道具であることを示している。さらに、イオンビームの場合は、100keV程度に加速したイオンはシリコンのような固体中に深さ数十~百数十nm侵入することから、固体中の深さ方向に対しても、ナノメータオーダーの加工を行うことができる。

現在、半導体集積回路の生産工程では、電子ビーム技術は光マスクの作製においてのみ利用され、回路上のレジスト膜の微細パターンの直接露光は、依然として光学的な露光に頼っている。一方、イオンビーム技術は半導体への不純物導入手法として広く利用されている。

しかし、将来、微細加工の最小線幅が数十nm程度になってくると、もはや現在の微細加工法の延長法では対応できなくなり、新しい微細加工用ビーム技術の導入が必須である言われている。

本論文では、特に半導体集積回路の作製を例にとり、まず現在用いられている微細加工ビーム技術の現状と将来に対する問題点について述べ、次に将来利用されるであろういくつかのビーム技術について記述する。

2. 微細加工ビーム技術の現状と問題点

2.1 半導体集積回路用ビーム技術の現状

シリコン半導体集積回路の作製を例にとると、現在用いられているイオンビーム技術（イオン注入：深さ方向制御）におけるイオンビーム条件の概略は次のようである。

イオンの種類：正イオン、
B, P, As等の単原子イオン
イオンのエネルギー：10 ~ 200 keV
イオンのドーズ量： $10^{11} \sim 10^{16}/\text{cm}^2$

イオンとして正イオンを用いる理由は、従来開発されてきたイオン源は正イオン源が大多数であり、大電流正イオンの発生法が伝統的に確立されていることが大きい。また、伝統的に単原子イオンを利用することが多い。利用するイオンのエネルギーの範囲が比較的広いが、種々の工程においてイオン注入を利用するので、それぞれ注入深さが異なることによる。特にドーズ量には数桁の幅があるが、不純物として利用する少量の場合と、ソース、ドレイン、ゲート電極のように半導体を金属的に変化させる大量のイオンの注入が必要な場合があるからである。

このようなイオンビーム技術に対して、数mAのイオン電流が得られる加速電圧200kV級の中電流イオン注入装置が使われている。

一方、微細パターン形成に有効な電子ビーム加工技術は、現在は光マスクの作製のみで使用されている。その理由は、現在要求されている最小線幅のパターンを露光するのであれば、短波長の紫外光（あるいはKrFやArFなどの紫外光レーザー）を用いれば何とか露光できるためであり、従来の延長線上の技術を少しずつ改良しながら何とか延命を図っているというのが現状である。さらなる理由としては、もし一本の電子ビームでパターンを描こうとすれば、パターンが微細になればなるほど図を完成するために要する時間が長くなり、大量生産に適さない技術となるためである。描画速度を少しでも早くするために、可変成形ビームや部分一括による比較的高速の描画方法が用いられるようになってきている。

2.2 ビーム技術の問題点

半導体集積回路においては、微細パターンの最小線幅が数十nmになってくると、深さ方向にはそれ以上の最小深さ精度が要求される。

¹ E-mail: ishikawa@kuee.kyoto-u.ac.jp

イオン注入により要求されるpn接合の深さは10 nm以下となってくる。注入するイオンのエネルギーを下げれば(1 keV 以下)注入深さは浅くなるので、一見対応できるように見えるが、低エネルギーの大電流イオンビーム輸送は非常に難しく、大量生産に適さない技術となってしまう。この問題を解決するための一つの技術として、多原子分子よりなるイオン注入技術が提案されている。

半導体集積回路にはMOSFETが数多く集積されることが多いが、MOSFETのゲート絶縁膜は最も絶縁破壊に弱い。正イオン注入では、ゲート電極に正イオンの電荷が溜まりゲート絶縁膜間に高電圧が発生して絶縁破壊するので、それを避けるため注入領域に中和のための電子シャワー源を設置し、試料の帯電を防ぐ方法が採られている。しかし、集積回路のパターンの微細化に伴い、MOSFETのゲート酸化膜の厚みが数nm以下に薄くなると、その絶縁耐電圧は数V程度と非常に低くなる。このような場合には、電子シャワーによる電荷の中和むらや、電子による帯電により、ゲート絶縁膜が破壊する可能性がある。このような問題を解決するための技術の一つとして、帯電がほとんど生じない負イオン注入技術が提案されている。

最小線幅が数十nm以下の微細パターンを光露光で転写することは、光源の実現およびそれに付随する技術的な問題が数多く存在し、実現が非常に難しくなってきた。この問題を解決するために、高速で電子ビーム直接描画を行うマルチ電子ビーム描画方式が提案されている。高速度ビーム直接描画方式として欧州では、軽イオンを用いたイオンビーム投影露光方式も提案されている。

3. 微細加工ビーム技術の将来展望

3.1 多原子分子イオン注入技術

同じ原子が複数個集まった分子をイオンとして利用できれば、一個の電荷を持つイオンで多数の原子を輸送することができると同時に、イオンの加速エネルギーに対して、それぞれの原子がもつエネルギーは構成原子数分の一となるので、低エネルギーの粒子を大量に輸送する手法として非常に有効である[1]。構成原子数の数が20~30程度までであれば、イオン注入の際に個々の原子が

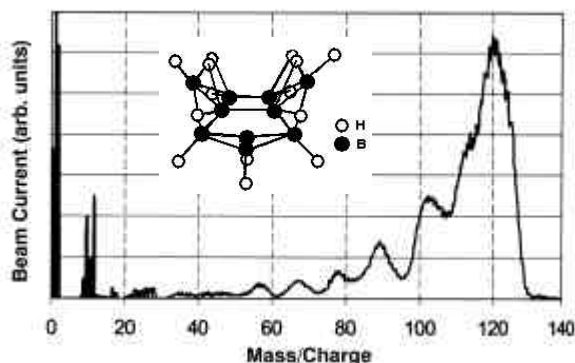


図1. デカボロンイオンの質量スペクトル

離散して注入されるので、低エネルギー注入の手法として利用できる。構成原子数が数十個以上になると、原子が集団となって衝突する特有の現象も現れる。

例えば、ボロンBが10個集まった分子として、図1中に示すデカボロン($B_{10}H_{14}$)がある。この分子はボロンだけでなく水素も混じった分子であるが、半導体へのイオン注入の際には水素による影響は少ないので、この多原子分子を、低エネルギーボロン注入の目的のために用いることができる。

Perelらは、図1の質量スペクトルに示すようにデカボロンイオンを数百 μA 得ている[2]。また、同程度の電流の二分子状デカボロンイオンも得ている。

3.2 負イオン注入技術

負イオンを絶縁された電極表面へのイオン注入に利用すると、負イオンによる入射負電荷量と二次電子による放出負電荷量のバランスがとれやすいため、表面の帯電がほとんど生じない。図2に示すように帯電電位は+数V程度以内である。注入対象が絶縁物の場合には、絶縁物中に電荷が保持される影響により、帯電電位の極性が負となるが、やはり-数V程度以内である。つまり、絶縁性材料への負イオン注入では表面の帯電電位は \pm 数V程度以内に収まるという特長がある[3]。

負イオンを集積回路のゲート絶縁膜部分の形状を模擬したTEGデバイスに注入し、その歩留まりを測定した結果では、電子シャワーによる空間電荷中和のない正イオン注入では100%破壊される注入量においても、負イオン注入ではデバイスの破壊はない。

このようにデバイスが微細構造になることにより生じる絶縁薄膜の破壊を、負イオン注入法を導入することにより防ぐことができる。この負イオン注入技術[4]は、筆者らが高電流負イオン源および負イオン注入装置の開発を行うとともに、これからの新技術として提案してきた技術である。

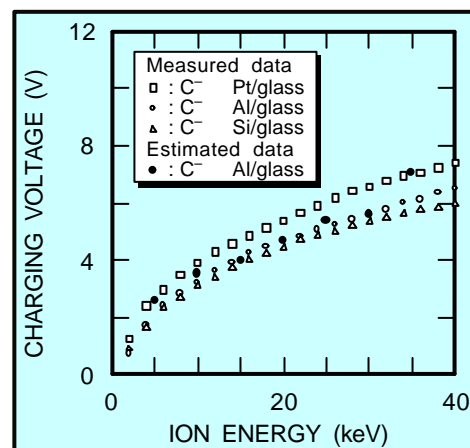


図2. 負イオン注入されたときの絶縁された電極の帯電電位

3.3 電子ビーム直接描画技術

微細加工の最小線幅の実現が光の短波長化によっても対応できなくなってくると、現在要求されている最小線幅より格段に微細なパターンを描くことができる電子ビームを、デバイス作製工程におけるレジストの露光に直接使用したいという要求が出てきた。ただ、この電子ビーム描画法における問題は、光露光に比べるとその生産性が格段に悪いことである。描画速度を速めるために、部分一括露光法や大きな転写用マスクを使用した縮小転写露光法なども開発されている。しかし、たとえそのような方法を用いても、電子源からの電子の供給量によって描画速度が律速されてしまう。電子の供給量を増すために一個の電子源から大電流を引き出すと、空間電荷効果によって電子ビームの質が劣化し、微細なパターンを描くことができなくなってしまう。空間電荷効果による悪影響を避けながら、描画速度を向上させるには、数多くの電子源を用いてマルチ電子ビームを形成し、それによるマルチ電子ビーム描画を行うのが最も良いと考えられている。

この技術における最大の課題は、電子ビーム描画に適するマルチ電子源の開発である。図3に示すような、一個の電子源の大きさがミクロンメートル寸法の微小電子源のレイが、真空マイクロエレクトロニクス分野で開発されつつある。この微小電子源レイを適用して、マルチ電子ビーム描画装置を開発しようとする動きがある。電子ビーム描画用の電子源としては、各電子源の動作の安定性、均一性が求められている。そのためには、エミッタ材料の材質や構造に対する研究が進められる必要がある。

3.4 イオンビーム投影露光技術

イオンは電子よりレジストの露光感度が1~2桁高い。また、レジスト膜内での横方向への拡がりがないため、解像度が高い。このような理由から、水素やヘリウムなどの軽イオンビームを使用

したイオンビーム投影露光技術が、欧州連合の研究機関であるIMSにおいて開発されている。装置は図4に示すように、低イオン温度の軽イオン源から比較的低エネルギーで引き出したイオンビームをマスクに当て、その像をイオンのエネルギーを加速しながら静電レンズ系でレジスト膜に縮小転写する方式である。

この方式は日本では研究開発されていないが、欧州および米国で研究が進められている。

4 . おわりに

次世代の微細加工の道具としてビーム技術が大きくクローズアップされてきている。ビーム技術に携わる多くの研究者が、これからの日本の産業において重要な基盤技術となる微細加工ビーム技術の開発研究に対して、大いに関心を持ち、かつ協力を戴けることがこの技術の完成への近道である。

参考文献

- [1] J.Ishikawa, et al., "Molecular ion implantation technique for obtaining the same depth profile for the component atoms", Ion Implantation Technology - 96. Proceedings of the Eleventh International Conference on Ion Implantation Technology, Austin, pp.776-779, 1997.
- [2] A.S.Perel, et al, "A decaborane ion source for high current implantation," Rev. Sci. Instrum., 73, 2, 877-879, 2002.
- [3] J.Ishikawa, "Charging free negative-ion implantation", AIP Conf. Proc., no.392, pt.2, pp.915-918, 1997, Application of Accelerators in Research and Industry, Fourteenth International Conference.
- [4] J.Ishikawa, et al., "Negative-ion implantation technique", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, B96,1-2,7-12,1995.

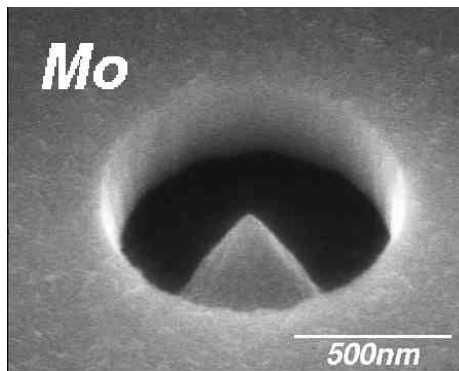


図3 . ミクロンメートル寸法の微小電子源の例

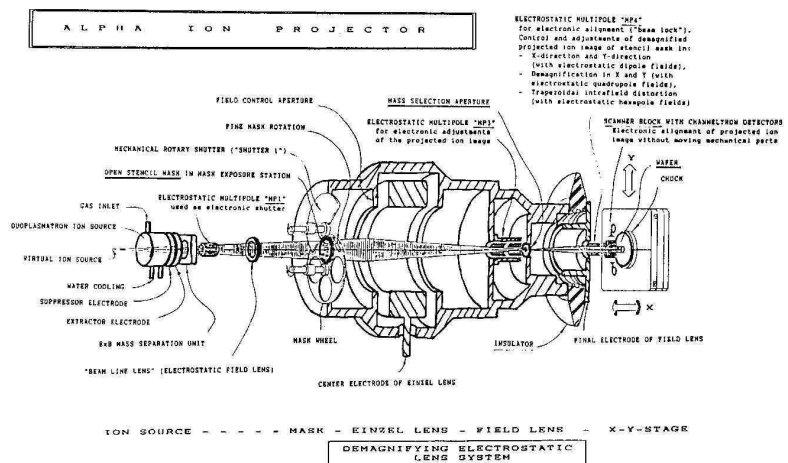


図4 . イオンビーム投影露光装置の構造