



Title	湿潤オゾンによるイオン注入レジストの除去に関する研究
Author(s)	堀邊, 英夫; 山本, 雅史
Citation	電気材料技術雑誌. 2012, 21, p. 31-45
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/76894
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

湿潤オゾンによるイオン注入レジストの除去に関する研究

堀邊 英夫^{1) 2)} ・ 山本 雅史¹⁾

¹⁾ 金沢工業大学 バイオ・化学部 応用化学科 (〒924-0838 石川県白山市八東穂 3-1)

²⁾ 大阪大学 産業科学研究所 (〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1)

従来の薬液を使用したレジスト除去方法に代わり、環境負荷の少ない湿潤オゾン法を用いて、B、P、Asイオンが70KeVの加速エネルギーで 5×10^{12} から 5×10^{15} 個/cm²注入されたノボラック系ポジ型レジストの除去を行った。イオン注入量が 5×10^{13} 個/cm²以下のレジストはすべて除去でき、 5×10^{15} 個/cm²のレジストはどのイオン種でも除去できなかった。 5×10^{14} 個/cm²のイオン注入量において、Bイオン注入レジストのみ低速ながらも除去でき、P、Asイオン注入レジストは除去できなかった。この注入量において、Bイオン注入レジストの硬さは未注入レジストの約1.8倍、Pイオンでは約8倍、Asイオンでは約5倍であった。湿潤オゾンによる除去が可能な硬さの閾値は、未注入レジストの約2倍程度と予測される。注入イオンからレジストに与えられるエネルギーはB、P、Asイオンの順で表面側に集中し分布していた。レジストはイオン注入によって、OH基、CH基およびO1sが減少し、C=CやC1s、 π 共役系が増加する炭化または架橋により硬化したと推測される。

キーワード：湿潤オゾン、レジスト除去、イオン注入レジスト、ナノインデンテーション、塑性変形硬さ

Study on the Removal of Ion-implanted Resist Using Wet Ozone

Hideo Horibe^{1),2)} and Masashi Yamamoto¹⁾

¹⁾Department of Applied Chemistry, College of Bioscience and Chemistry, Kanazawa Institute of Technology,

3-1 Yatsukaho, Hakusan, Ishikawa 924-0838, Japan

²⁾ The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University,

8-1Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047, Japan

We removed B-, P-, and As-ion-implanted positive-tone novolak resists with an implantation dose of 5×10^{12} to 5×10^{15} atoms/cm² at 70keV, using wet ozone. Ion-implanted resists with 5×10^{15} atoms/cm² could not be removed, but resists implanted below 5×10^{13} atoms/cm² could be removed. Resist implanted with B ions at 5×10^{14} atoms/cm² was removed slowly, but resists implanted with P and As ions were not removed. The peak hardness of resist with B ions implanted at 5×10^{14} atoms/cm² was 1.8 times greater than that of the non-implanted resist (AZ6112), that of the P-ion-implanted resist was eight times greater, and that of As-ion-implanted resist was five times greater. We determined that the hardness threshold of the resist that could be removed using wet ozone was almost 2 times higher than that of AZ6112. The ion-implanted resists were hardened by cross-linkage.

Keywords: wet ozone, resist removal, ion-implanted resist, nanoindentation, plastic deformation hardness

1. はじめに

電子デバイス製造工程は、大きく分けて、成膜、リソグラフィー（レジスト塗布、露光／現像）、エッチング、イオン注入、レジスト除去、洗浄で構成されている。とりわけ、イオン注入工程は、p/n 型半導体を製造するために不可欠である。イオン注入工程では、リソグラフィー工程にて Si 基板上に形成したレジストの微細パターンをマスクとして 13/15 族の元素（B、P、As など）を Si 基板全面に加速して照射する。このとき、マスクとなったレジストにもイオンが注入されることになり、イオン注入によってレジストが変性して除去が困難となる。現状では、酸素プラズマによるアッシングと、硫酸・過酸化水素水（SPM）やアンモニア・過酸化水素水（APM）を用いた薬液方式とを組み合わせることで、困難ながらも除去している。ただし、酸素プラズマアッシングでは、基板や金属配線の酸化が危惧されている。一方、薬液方式の SPM は硫酸と過酸化水素水を混合した瞬間に最も活性となるため、基板接触の直前に混合タイミングを制御することが重要となる。そのため、薬液は常にフレッシュな状態が要求されるほか、混合した薬液の分離・再利用には膨大なコストと労力が必要となる。APM では、寿命が短い、金属不純物が堆積する、表面を劣化させるなどの問題がある。また、APM は、数 Å/min のエッチング速度で Si や SiO₂ をエッチングしてしまうため^{1), 2)}、45nm 世代以降の極薄膜（1nm 程度）の SiO₂ 絶縁膜がエッチングされてしまうことも危惧されている。

今回、我々は、薬液フリーな湿潤オゾン方式によるイオン注入レジストの除去とイオン注入によるレジストの硬化との関係について検討を行った。湿潤オゾン方式は、オゾンとレジストとの反応中に少量の水を加えることでレジストを水溶性のカルボン酸に加水分解する³⁻⁵⁾。オゾンは洗浄効果に加え、反応後は酸素に戻るため残留性がなく、薬液方式に比べて非常に環境に優しいレジスト除去方式である。また、薬液を用いないので、薬液のコストをカットすることができる。オゾンによる金属酸化に関しては、水の代わりに

100%溶剤を用いてカルボン酸の電離を抑えることで酸化を防止することができる⁶⁾。ノボラック系ポジ型レジストに B、P、As を 70keV で $5 \times 10^{12} \sim 5 \times 10^{15}$ 個/cm² 注入したレジストについて、湿潤オゾンによる除去を行った。一般的に、イオン注入レジストは、イオン注入によりレジスト表面が硬化していると言われている⁷⁻¹¹⁾。しかしながら、イオン注入レジストの硬さは定量的に評価されていない。今回、我々はイオン注入レジストの硬さに関して、微小押し込み硬さ試験¹²⁻¹⁵⁾により硬さを計測し、湿潤オゾンによる除去性と硬さとの関係を明らかにした。また、イオン注入レジストの硬化について、SRIM2008¹⁶⁾による数値シミュレーションに加え、赤外／紫外分光計測（FT-IR、UV）および X 線光電子分光分析（XPS : X-ray Photoelectron Spectroscopy）により化学的に検討した。

2. 実験

2. 1 湿潤オゾンによるイオン注入レジスト除去

湿潤オゾンによるレジスト除去装置（Mitsubishi Electric Corp. and SPC Electronics Corp.）の模式図を図 1 に示す。オゾンガスはオゾンナイザー（OP-300C-S; Mitsubishi Electric Corp.）により生成した。オゾンガスの濃度および流量は、それぞれ 230g/m³（10.2vol%）、12.5L/min である。オゾンガスを温水にバブリングさせ、蒸気と混合させることで湿潤オゾンを生成し、これをシャワーヘッドノズルからレジスト表面に照射した。レジストを

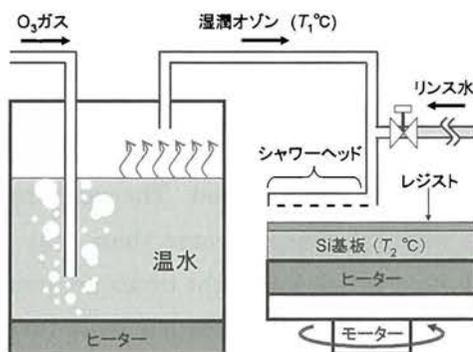


図 1 湿潤オゾン装置の模式図

Fig. 1 Schematic diagram of the experiment apparatus.

表 1 湿潤オゾンによるレジスト除去条件

Table 1 Experiment conditions for resist removal by wet ozone.

湿潤オゾン温度 (T_1)	60°C
基板温度 (T_2)	50°C
1 サイクルごとの湿潤オゾン照射時間	10 秒
リンス水温度	70°C
1 サイクルごとのリンス時間	5 秒
1 サイクルごとの乾燥時間	10 秒
1 サイクルごとの湿潤オゾンプロセス時間	25 秒
基板回転数	2000rpm
オゾン濃度	230g/m ³ (10.2vol%)
オゾン流量	12.5L/min

塗布した基板を 2000rpm で回転させ、基板全面に均一に湿潤オゾンを照射した。レジストの加水分解に必要な微量の水の調整は、湿潤オゾン温度 ($T_1=60^\circ\text{C}$) と基板温度 ($T_2=50^\circ\text{C}$) との温度差により生じる結露量を制御することで行った。

レジスト除去の実験条件を表 1 に示す。湿潤オゾン方式では、レジスト表面層をカルボン酸に変化させて、これを純水で洗い流すことでレジストを表面から徐々に分解・除去する。そのため、湿

潤オゾンによるレジスト除去では、湿潤オゾン照射、純水洗浄、乾燥を 1 サイクルとして、これを繰り返す。1 サイクルでの湿潤オゾン照射時間、純水洗浄時間、乾燥時間は、それぞれ 10、5、10 秒とした。実際のレジスト除去プロセスに要する時間は、これらの時間の足し合わせとなる。本実験では、数サイクルごとのレジスト膜厚の変化を計測することで、湿潤オゾン照射時間に対するイオン注入レジストの除去性を評価した。

表 2 イオン注入レジストのサンプル条件

Table 2 Film thickness, ion current, and implantation time for the ion-implanted resist.

注入イオン (70keV)	イオン注入量 [個/cm ²]	膜厚 [μm]	ビーム電流 [μA]	注入時間 [秒]
-	Non-implantation	0.9-1.0	-	-
B	5×10 ¹²	0.84	4.5	33
B	5×10 ¹³	0.85	29.3	51
B	5×10 ¹⁴	0.85	46.9	320
B	5×10 ¹⁵	0.73	616	2410
P	5×10 ¹²	0.99	4.9	38
P	5×10 ¹³	0.99	31.0	48
P	5×10 ¹⁴	0.95	52.8	282
P	5×10 ¹⁵	0.93	63.5	2325
As	5×10 ¹²	0.98	5.0	30
As	5×10 ¹³	0.93	30.9	49
As	5×10 ¹⁴	0.86	53.6	278
As	5×10 ¹⁵	0.78	615	2435

レジストにはノボラック系ポジ型レジスト (AZ6112; AZ-Electronic Materials) を用いた。Si ウェハ上にレジストをスピニング (ACT-300A;

Active) により 2000rpm で 20 秒間スピニングし、ホットプレート (PMC 720 Series; Dataplate) により 100°C で 1 分間プリベークした。レジスト膜厚

は触針式表面形状測定器 (DekTak 6M; ULVAC) で計測した。レジストの初期膜厚は 0.9-1.0 μm である。このレジストに、B、P、As をそれぞれ 70keV の加速エネルギーで $5 \times 10^{12} \sim 5 \times 10^{15}$ 個/cm² 注入した。イオン注入時の真空度は 10^{-6} Pa のオーダーである。基板の初期温度は 23°C (室温) としているが、イオン注入時に基板の冷却は行っていないため、基板温度は数 100°C 程度にまで上昇していると考えられる¹⁷⁾。イオン注入レジストの膜厚と、各イオン注入時の電流値、注入時間を表 2 に示す。これらのイオン注入レジストに関して、湿潤オゾンによる除去性と硬さとの関係を調べた。

2. 2 イオン注入レジストの硬さ評価

微小押し込み硬さ試験 (ENT-1040; ELIONIX) によるイオン注入レジストの硬さ評価の模式図を図 2 に示す。微小押し込み硬さ試験では、設定した最大荷重まで荷重を増加させていき、そこで荷重を一時的に保持した後、除荷していくことで負荷-除荷曲線 (図 2 の I-II) を得る。 P_{max} および h_1 はそれぞれ図 2 に示す最大荷重と押し込み深さである。微小押し込み硬さ試験の条件を表 3 に示す。最大荷重は 1-320mgf の間で設定した。荷重ステップは、荷重が 1-8mgf までは 0.004mgf/s と

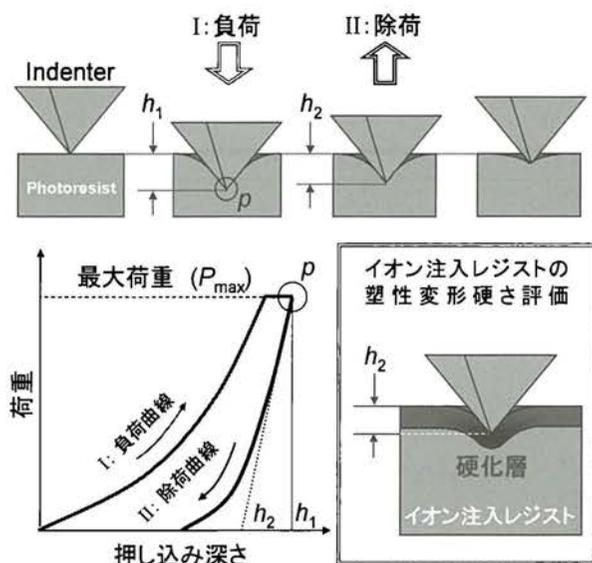


図 2 微小押し込み方試験の模式図
 Fig. 2 Schematic diagram of the nanoindentation experiment apparatus.

した。8mgf 以上では荷重の 2000 分の 1 とした。保持時間は 2 秒である。稜角 115° のバーコピッチ型ダイヤモンド圧子を使用し、異なる荷重における除荷曲線 (図 2 の II) から得られる塑性変形硬

表 3 微小押し込み硬さ試験の実験条件
 Table 3 Experiment conditions for evaluating ion-implanted resist hardness by nanoindentation.

最大荷重 (P_{max})	1-320mgf
負荷-除荷速度 ($P_{\text{max}}=1-8\text{mgf}$)	0.004mgf/ms
負荷-除荷速度 ($P_{\text{max}} \geq 8\text{mgf}$)	$(P_{\text{max}}/2000)$ mgf/ms
荷重保持時間	2 秒
圧子材質	ダイヤモンド
圧子形状	バーコピッチ (先端部稜角 115°)

さによりイオン注入レジストの硬さを評価した。塑性変形硬さは、除荷曲線における接線と x 軸との交点 h_2 (塑性変形深さ) から求められ、試料の塑性を表す。塑性変形硬さ (H_2) は次式で定義される。

$$H_2 = K \cdot \frac{P_{\text{max}} [\text{mgf}]}{h_2^2 [\mu\text{m}^2]} \quad (1)$$

ここで、K は圧子形状に起因する係数で、今回用いたバーコピッチ型の圧子の場合 37.926 である。荷重を変化させることで様々な押し込み深さでの塑性変形硬さを計測し、イオン注入レジスト膜内の硬さ分布を得た。イオン注入レジストの硬さを、イオン注入していないレジスト (AZ6112) の塑性変形硬さで規格化 (規格化した H_2) して評価した。

2. 3 イオン注入レジストの硬化メカニズムの検討

イオン注入レジストの湿潤オゾンによる除去性と硬化のメカニズムとの関係について、計算と化学的手法により検討した。イオン注入レジストは、イオン注入時に与えられるエネルギーにより

硬化しており⁷⁻¹¹⁾、除去が困難と考えられる。そこで、まず、注入イオンのレジスト内での分布および注入イオンからレジスト（レジストを構成する元素：H、C、O）に与えられるエネルギーを、SRIM2008を用いて求めた。SRIM2008では、ベンゼン環のような共鳴安定化効果を盛り込むことが困難であるため、構造が容易なPMMAをレジストの模擬として計算を行った。

赤外分光光度計（7000 FT-IR; varian, Ge prism ATR）およびラマン分光光度計（Ramanar T-64000; Jobin Yvon）を用いて、イオン注入によるレジスト内の分子振動の変化を調べた。赤外分光光度の計測は、波数領域を $670\sim 4000\text{cm}^{-1}$ 、波数分解能を 4cm^{-1} とした。ラマン分光光度の計測は、出力 1mW の Ar⁺レーザー（波長 514.5nm 、ビーム径 $1\mu\text{m}$ ）を励起光源として、波数領域を $600\sim 2000\text{cm}^{-1}$ とした。回折格子には 600gr/mm を用い、スリット幅を $100\mu\text{m}$ とした。検出器には 1024 channel CCD（Charge Coupled Device）を用いた。紫外分光光度計（UV-2450; Shimadzu）によりイオン注入レジスト内の $\pi\text{-}\pi^*$ 吸収に起因する共役系の変化を調べた。 $\pi\text{-}\pi^*$ 吸収は $190\sim 280\text{nm}$ の波長領域に見られることから、この領域における吸収スペクトルを 8° 入射積分球（ISR-2200; Shimadzu, 反射モード）を用いて計測した。波長分解能は 0.5nm とした。

加えて、XPS 測定（ESCA-3400, Shimadzu）によりイオン注入レジスト表面の元素分析を行った。極表面は空気中の C、O、H などによる影響が考えられるため、分析前に Ar で表面をエッチングした。このとき、Ar エッチングによるレジスト表面の改質を抑えるために、加速電圧を 1kV 、電流を 10mA として 1 分間エッチングした。Ar ガス圧は $5\times 10^{-4}\text{Pa}$ とした。また、X 線照射によるレジストの変性を抑えるために、X 線照射時間を 15 分程度とした。X 線には Mg-K α を用い、電圧を 10kV 、電流を 10mA とした。X 線照射時の真空度は 10^{-6}Pa 以下である。スキャンステップは 0.2eV で結合エネルギー 1000eV までのワイドスキャンを行った。

3. 結果と考察

3.1 湿潤オゾンによるイオン注入レジスト除去

図3に、Bイオンが注入されたレジストの湿潤オゾンによる除去過程を示す。Bイオンが 5×10^{12} 、 5×10^{13} 個/ cm^2 注入されたレジストは、AZ6112（未注入レジスト）と同様に、湿潤オゾンの照射とともに膜厚が減少した。レジスト除去速度は、 5×10^{13} 個/ cm^2 の方が 5×10^{12} 個/ cm^2 に比べて若干遅く、 5×10^{12} 個/ cm^2 のとき $1.26\mu\text{m}/\text{min}$ 、 5×10^{13} 個/ cm^2 のとき $0.83\mu\text{m}/\text{min}$ であった。一方、Bイオンが 5×10^{14} 個/ cm^2 になると、オゾン照射時間が 120 秒までは膜厚の減少がほとんど見られなかったが、それ以降は通常のレジストと同様に除去することができた。最終的に、 $0.28\mu\text{m}/\text{min}$ の速度でレジストを除去することができた。 5×10^{15} 個/ cm^2 のイオン注

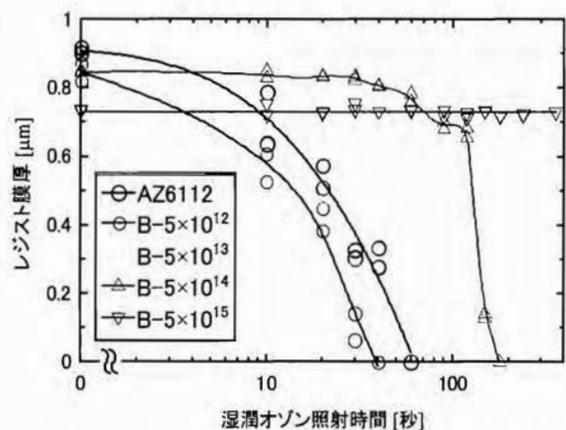


図3 Bイオン注入レジストの湿潤オゾン照射時間に対する膜厚の変化

Fig.3 Dependence of B-ion-implanted resist film thickness on wet-ozon irradiation time. AZ6112 was a positive-tone novolak resist without ion implantation. B-ion implantation doses were 5×10^{12} to 5×10^{15} atoms/ cm^2 .

入レジストに関しては、照射時間を増やしても膜厚に変化は見られず、レジストを除去することができなかった。イオン注入量の増加とともに除去速度が低下しており、高ドーズ量のイオン注入レジストになるほど除去が困難になった。

図4に、Pイオンが注入されたレジストの湿潤

オゾンによる除去過程を示す。B イオンのときと同様に、P イオンが 5×10^{12} 、 5×10^{13} 個/cm² 注入されたレジストは除去された。レジスト除去速度は、 5×10^{12} 個/cm² のとき 1.19 μ m/min、 5×10^{13} 個/cm² のとき 0.99 μ m/min であった。一方、 5×10^{14} 個/cm² の注入量においては、B イオン注入レジストは低速ながらも除去されたが、P イオン注入レジストは除去できなかった。注入量が 5×10^{15} 個/cm² では、B イオンの場合と同様に除去されなかった。

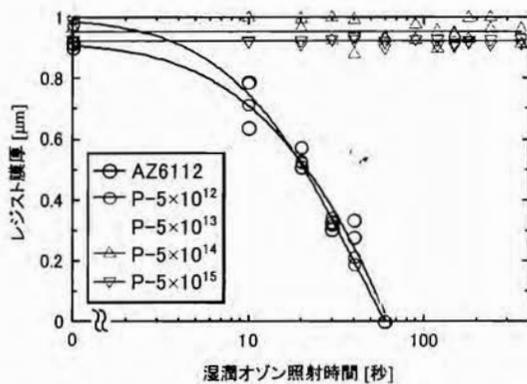


図 4 P イオン注入レジストの湿潤オゾン照射時間に対する膜厚の変化

Fig.4 Dependence of the P-ion-implanted resist film thickness on wet-ozone irradiation time. AZ6112 was a positive-tone novolak resist without ion implantation. P-ion implantation doses were 5×10^{12} to 5×10^{15} atoms/cm².

図 5 に、As イオンが注入されたレジストの湿潤オゾンによる除去過程を示す。As イオン注入レジストでは、 5×10^{12} 個/cm² のときのレジスト除去速度は 1.28 μ m/min、 5×10^{13} 個/cm² のときのレジスト除去速度は 0.90 μ m/min であった。一方、 5×10^{14} 個/cm² 以上の注入量においては、P イオンの場合と同様に、As イオン注入レジストも除去できなかった。

以上の結果から、各イオン種に関して、 5×10^{13} 個/cm² 以下のイオン注入レジストは、AZ6112 (未注入レジスト) と同様に、湿潤オゾンにより除去された。除去速度はイオン注入量が 5×10^{13} 個/cm² の方が、 5×10^{12} 個/cm² に比べて若干遅くなった。イオン注入量が 5×10^{14} 個/cm² になると、B イオン

注入レジストのみ低速ながらも除去され、P、As イオン注入レジストは除去されなかった。 5×10^{15} 個/cm² のイオン注入レジストに関しては、どのイオン種でも除去されなかった。このことから、 5×10^{14} 個/cm² 以上の注入量になると、イオン注入によってレジスト表面に硬化層が形成され始めると考えられる。ただし、B イオンが 5×10^{14} 個/cm² 注入されたレジストは、その他のイオン注入レジストに比べて表面の硬化層が柔らかいためオゾン照射時間を増やすことで除去されたと推測される。そこで、次に、イオン種、イオン注入量による除去性の違いを検討するために、イオン注入レジストの表面硬化層の硬さを調べた。

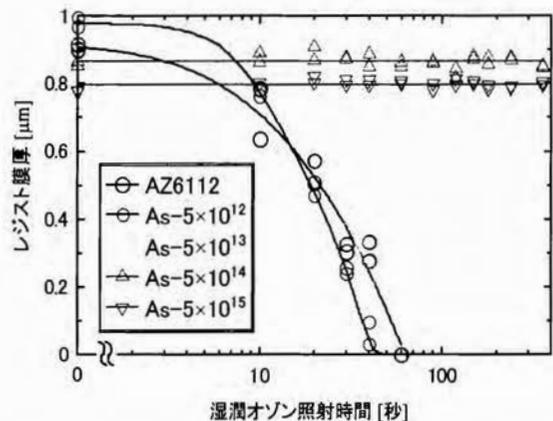


図 5 As イオン注入レジストの湿潤オゾン照射時間に対する膜厚の変化

Fig. 5 Dependence of the As-ion-implanted resist film thickness on wet-ozone irradiation time. AZ6112 was a positive-tone novolak resist without ion implantation. As-ion implantation doses were 5×10^{12} to 5×10^{15} atoms/cm².

3.2 イオン注入レジストの硬さ

図 6 に、B イオン注入レジストの微小押し込み硬さ試験の測定結果を示す。これは、AZ6112 の塑性変形硬さで規格化したイオン注入レジストの硬さの深さ分布を示している。 5×10^{13} 個/cm² 以下のイオン注入量では、硬さは AZ6112 と同様であった。注入量が 5×10^{14} 個/cm² 以上になると、注入量が増加するに従って硬さが増加した。イオン

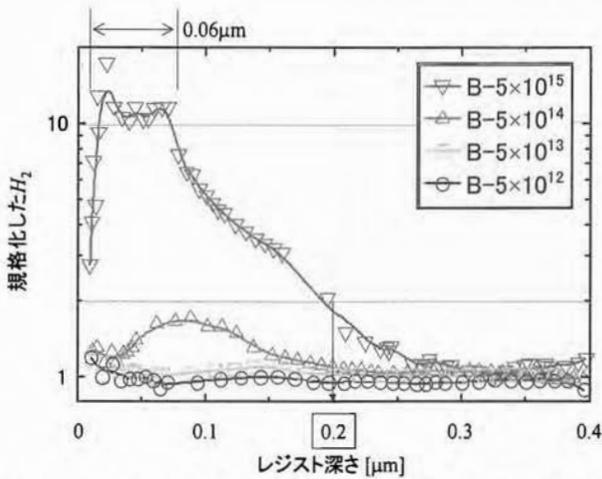


図6 Bイオン注入レジストの規格化した H_2 の深さ分布

Fig.6 Depth profiles of normalized plastic deformation hardness (normalized H_2) of the B-ion-implanted resists. Normalized H_2 was obtained by dividing H_2 of ion-implanted resist by H_2 of AZ6112. The B-ion implantation doses were 5×10^{12} to 5×10^{15} atoms/cm².

注入量が 5×10^{14} 個/cm² のとき、深さ $0.09 \mu\text{m}$ 付近をピークにして約 $\pm 0.05 \mu\text{m}$ の幅の硬化領域が見られた。一方、 5×10^{15} 個/cm² の注入量において、硬さが 10 以上 (規格化した $H_2=10$) の領域が約 $0.06 \mu\text{m}$ 、2 以上 (規格化した $H_2=2$) の領域が約 $0.20 \mu\text{m}$ と、幅広い領域が硬化していた。硬さのピークは、注入量が 5×10^{14} 個/cm² のとき 1.8、 5×10^{15} 個/cm² のとき 19 であった。

図7に、Pイオン注入レジストの微小押し込み硬さ試験の測定結果を示す。 5×10^{13} 個/cm² 以下のイオン注入量では、Bイオン注入レジストと同様に、硬さはAZ6112とほぼ同じであった。また、イオン注入量が 5×10^{14} 個/cm² 以上になると、注入量が増加するに従って硬さが増加した。注入量が 5×10^{14} 個/cm² において、表面から約 $0.08 \mu\text{m}$ の深さまでで、硬さが2以上の硬化領域が見られた。注入量が 5×10^{15} 個/cm² においては、規格化した $H_2=10$ の領域が約 $0.04 \mu\text{m}$ 、規格化した $H_2=2$ 以上の領域が約 $0.16 \mu\text{m}$ と、Bイオン注入レジストに比べて硬化領域が表面側にシフトしていた。硬さのピークは、注入量が 5×10^{14} 個/cm² のとき 6.3、 5×10^{15} 個/cm² のとき 17 であった。

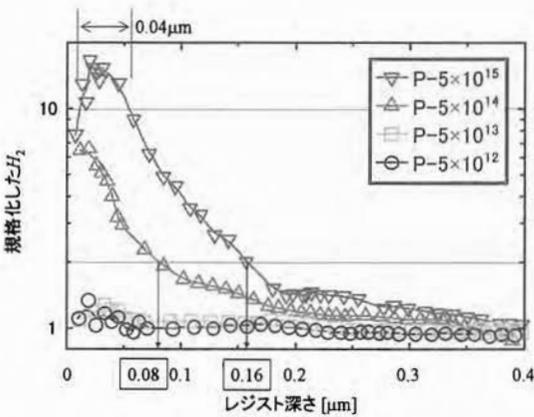


図7 Pイオン注入レジストの規格化した H_2 の深さ分布

Fig.7 Depth profiles of normalized plastic deformation hardness (normalized H_2) of the P-ion-implanted resists. Normalized H_2 was obtained by dividing H_2 of the ion-implanted resist by H_2 of AZ6112. The P-ion implantation doses were 5×10^{12} to 5×10^{15} atoms/cm².

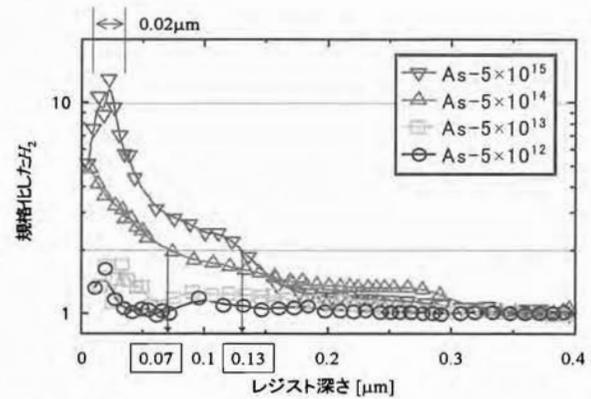


図8 Asイオン注入レジストの規格化した H_2 の深さ分布

Fig.8 Depth profiles of normalized plastic deformation hardness (normalized H_2) of As-ion-implanted resists. Normalized H_2 was obtained by dividing H_2 of ion-implanted resists by H_2 of AZ6112. The As-ion implantation doses were 5×10^{12} to 5×10^{15} atoms/cm².

表4 各イオン注入レジストの塑性変形硬さが10以上のときと2以上のときの硬化層の厚み

Table 4 Surface-hardened layer for each ion-implanted resist obtained from the nanoindentation results of Fig. 6, 7, and 8.

イオン注入量 [atoms/cm ²]	硬さ	B イオン [μm]	P イオン [μm]	As イオン [μm]
5×10 ¹⁴	規格化した H ₂ ≥2	-	0.08	0.07
5×10 ¹⁴	規格化した H ₂ ≥10	-	-	-
5×10 ¹⁵	規格化した H ₂ ≥2	0.20	0.16	0.13
5×10 ¹⁵	規格化した H ₂ ≥10	0.06	0.04	0.02

：図8に、As イオン注入レジストの微小押し込み硬さ試験の測定結果を示す。5×10¹³個/cm²以下のイオン注入量では、B、P イオン注入レジストと同様に、硬さはAZ6112 とほぼ同じであった。また、イオン注入量が5×10¹⁴個/cm²以上になると、注入量が増加するに従って硬さが増加した。注入量が5×10¹⁴個/cm²において、表面から約0.07μmの深さまで、硬さが2以上の硬化領域が見られた。注入量が5×10¹⁵個/cm²においては、規格化したH₂=10の領域が約0.02μm、規格化したH₂=2以上の領域が約0.13μmと、P イオン注入レジストに比

べて硬化領域が表面側にシフトしていた。硬さのピークは、注入量が5×10¹⁴個/cm²のとき5、5×10¹⁵個/cm²のとき13であった。図6、7、8に示したように、イオン注入量が増加するに従って硬さが増加した。硬さの増加は5×10¹⁴個/cm²の注入量を境に増加する傾向があった。イオン注入量が5×10¹⁵個/cm²になると注入量による硬さの違いは見られなかった。これは、イオン注入によるレジストの硬化が飽和しているためと考えられる。加えて、5×10¹⁴個/cm²以上の注入量において、注入イオン種の原子番号が増加するほど硬化領域が表面側にシフトしていた。表4に、イオン注入量が5×10¹⁴個/cm²以上のイオン注入レジストの塑性変形硬さが10以上のとき（規格化したH₂≥10）と2以上のとき（規格化したH₂≥2）の硬化領域の結果を示す。注入イオン種の原子番号が増加するほど硬化領域の幅が狭くなった。以上のことから、注入イオン種の原子番号が増加するとともに、硬化領域が表面側に集中していることがわかる。これは、注入イオンのレジスト中での分布や注入イオンからレジストに与えられるエネルギーが、硬化領域や硬化層の硬さに影響していると考えられる。次に、湿潤オゾンによる除去性および硬さの変化の閾値と考えられる5×10¹⁴個/cm²のイオン注入レジストに注目し、検討した。

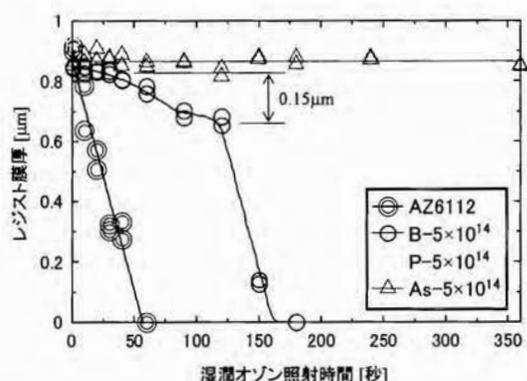


図9 B、P、As が5×10¹⁴個/cm²注入されたレジストの湿潤オゾン照射時間に対する膜厚の変化

Fig.9 Dependence of the B-, P-, and As-ion-implanted resist film thickness on wet-ozone irradiation time. AZ6112 was a positive-tone novolak resist without ion implantation. The ion implantation dose was 5×10¹⁴ atoms/cm².

図9に、図3、4、5で示した、各イオンが5×10¹⁴個/cm²注入されたレジストの湿潤オゾンによる除去性を示す。AZ6112（未注入レジスト）では、湿潤オゾン照射時間に比例して膜厚が減少した。一方、イオン注入レジストでは、湿潤オゾン照射に伴う膜厚の減少が見られなかった。ただし、B

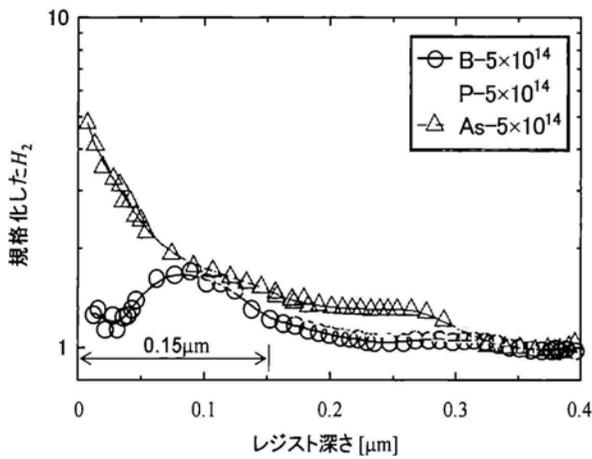


図 10 B、P、As が 5×10^{14} 個/cm² 注入されたレジストの規格化した H_2 の深さ分布

Fig.10 Depth profiles of normalized plastic deformation hardness (normalized H_2) of the B-, P-, and As-ion-implanted resists with an ion-implantation dose of 5×10^{14} atoms/cm².

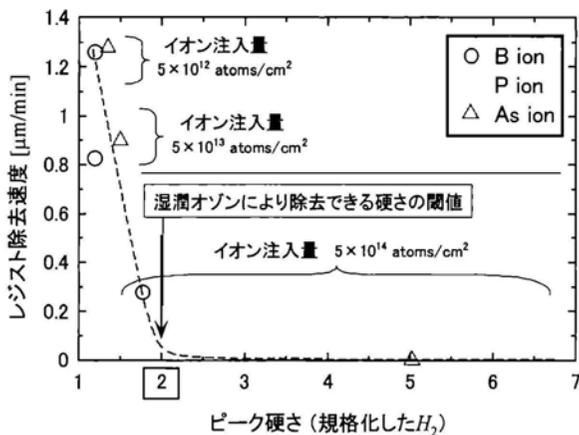


図 11 注入量が 5×10^{14} 個/cm² 以下のイオン注入レジストのピーク硬さとレジスト除去速度との関係

Fig.11 Relationship between the resist removal rate and the peak hardness of the resist with an ion-implantation dose of below 5×10^{14} atoms/cm².

イオン注入レジスト (5×10^{14} 個/cm²) では、表面から約 $0.15 \mu\text{m}$ の層が除去されるまでは徐々に膜厚が減少していき、その後は AZ6112 と同様にオ

ゾン照射時間に比例して膜厚が減少した。

図 10 に、図 6、7、8 で示した、各イオンが 5×10^{14} 個/cm² 注入されたレジストの AZ6112 で規格化した塑性変形硬さを示す。B イオン注入レジストの硬さは、P や As イオン注入レジストに比べて硬さの増加が少なく、柔らかいと言える。また、注入イオンの原子番号が大きくなるにつれて、硬さのピーク位置が表面側にシフトした。B イオン注入レジストは、深さ $0.09 \mu\text{m}$ 付近をピークにして約 $\pm 0.05 \mu\text{m}$ の幅の硬化領域が見られ、AZ6112 に比べて約 1.8 倍の硬さを示している。P、As イオンの場合、表面側ほど硬くなっている。P イオン注入レジストの表面側の硬さは AZ6112 の約 8 倍、As イオンでは約 5 倍となっている。

さらに、図 11 に、 5×10^{14} 個/cm² 以下のイオン注入量におけるレジスト除去速度とピーク硬さ（規格化した H_2 ）との関係を示す。規格化した H_2 が約 2 以上になると、レジスト除去速度は $0 \mu\text{m}/\text{min}$ となり除去されなかった。すなわち、湿潤オゾンによるレジスト除去における除去可能な硬さの閾値が、AZ6112 の 2 倍程度であると推測される。イオン種による硬化領域や硬さの違いを検討するために、SRIM2008 を用いてレジストへのイオン注入の数値シミュレーションを行い、注入イオンのレジスト内での分布と注入イオンからレジストに与えられるエネルギーを求めた。

3.3 イオン注入レジストの硬化のメカニズム

注入イオン種による硬化領域や硬さの違いを検討するために、SRIM2008 を用いてレジストへのイオン注入の数値シミュレーションを行い、注入イオンのレジスト内での分布と注入イオンからレジストに与えられるエネルギーを求めた。

図 12 に、各注入イオンのレジスト内での分布を示す。B イオンが最も深い領域に広く分布し、P、As の順で表面側に集中して分布している。すなわち、原子番号が大きい重いイオンほど、レジストに注入されたイオンの分布は表面側にシフトした。図 6、7、8 に示した微小押し込み硬さ試験の結果より、重いイオンほど硬化領域が表面側にシフトしている。したがって、注入イオンのレ

ジスト内での分布は、イオン注入レジストの硬化領域の傾向とよく一致していると考えられる。ただし、SRIMにより求められたイオンの分布は、硬さ計測で得られた硬化領域より深い領域に広がっている。これは、まず、レジストとしてベンゼン環を有さない PMMA を用いたことで、実際のノボラック系レジストに比べて炭素含有率が低く阻止能も小さいため、イオンが深くまで進入するようにシミュレーションされたと考えられ

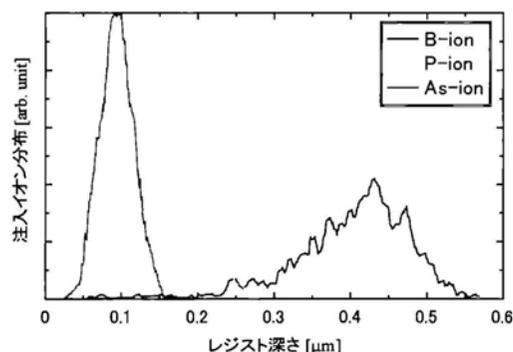


図 12 各注入イオンのレジスト深さ分布 (SRIM シミュレーション)

Fig.12 Distributions of B, P and As ions implanted into resist (PMMA) were calculated by SRIM. The ion-acceleration energy was 70keV.

る。また、実際のレジストでは、イオン注入時に硬化が起こるため、徐々に表面側が硬くなり、イオンが進入しにくくなると考えられる。加えて、イオン注入量が多くなると、表2に示したように、膜厚が減少 (スパッタリングもしくは収縮) するため、硬化層の厚みが薄くなると考えられる。イオン注入によるレジストの硬化は、イオンとレジ

ストとの相互作用における核阻止能や電子阻止能によるエネルギー付与によって引き起こされると推測される。そこで、各イオン種に関して、注入イオンからレジストに与えられる核的・電子的エネルギーを計算した。

図 13 に、注入イオン 1 個からレジストに与えられる核的・電子的エネルギー (E_N , E_e) のレジスト内分布を示す。核的エネルギーは、注入イオンからレジストを構成している元素 (C, O, H など) に与えられる核の衝突に関するエネルギーであり、レジストへのダメージを表す指標である。電子的エネルギーは、注入イオンからレジスト中の電子に与えられる電子励起に関するエネルギーであり、レジスト中でのイオン化やラジカル生成などにもなう新しい結合の形成に寄与する。重いイオンほど、レジストに与えられる核的エネルギーが電子的エネルギーに比べ大きく、表面側に集中している。イオン注入によってレジストに与えられる総エネルギー量は、注入量の増加とともに増加する。そのため、図 6、7、8 で示したように、イオン注入量が多くなるほど硬化したと考えられる。表 5 に、注入イオンからレジストに与えられる核的エネルギー (E_N)、電子的エネルギー (E_e)、エネルギーの分布深さ (D) および深さ方向に対する各エネルギー密度 (E_N/D , E_e/D) をそれぞれ示す。ここで、核的・電子的エネルギーおよび各エネルギー密度は、B イオンのものを 1 として規格化している。各注入イオン 1 個からレジストに与えられる核的 (電子的) エネルギーの比は、B イオンで 1 (1)、P イオンで 2.5 (0.42)、As イオンで 3.3 (0.14) である。各イオンからレ

表 5 注入イオン 1 個からレジストに与えられる核・電子的エネルギー (E_N , E_e)、エネルギー分布深さ (D) およびエネルギー密度 (E_N/D , E_e/D)

Table 5 Nuclear and electronic energy (E_N , E_e), energy distribution depth (D), and energy density (E_N/D , E_e/D) given to the resist from each implanted ion.

注入イオン	E_N [arb.unit]	E_e [arb.unit]	D [μm]	E_N/D [arb.unit]	E_e/D [arb.unit]
B イオン	1	1	0.50	1	1
P イオン	2.5	0.42	0.25	5	0.8
As イオン	3.3	0.14	0.08	21	0.9

レジストに与えられるエネルギーの分布深さがそれぞれ異なっていたため、深さ方向に対する各エネルギー密度で比較した。分布深さは、B イオンで 0.50 μm 、P イオンで 0.25 μm 、As イオンで 0.08 μm であった。 E_N/D は、B イオンで 1、P イオンで 5、As イオンで 21 と高くなっており、重いイオンほどレジストにダメージを与えやすいと考えられる。一方、 E_e/D は B、P、As イオンでほぼ同じであり、新しい結合の形成に関わるエネルギーは同程度と考えられる。ただし、ダメージが与えられたレジストほど原子間の結合が切断するため、その部分に新しい結合が形成されやすいと推測される。このため、図 6、7、8 で示したように、B、

および C-H 変角振動 (1400-1500 cm^{-1}) による吸収が減少し、C=C (1600-1700 cm^{-1}) の吸収が増加した。ただし、O-H 伸縮振動の吸収は、その他の吸収に比べてあまり変化していなかった。イオン

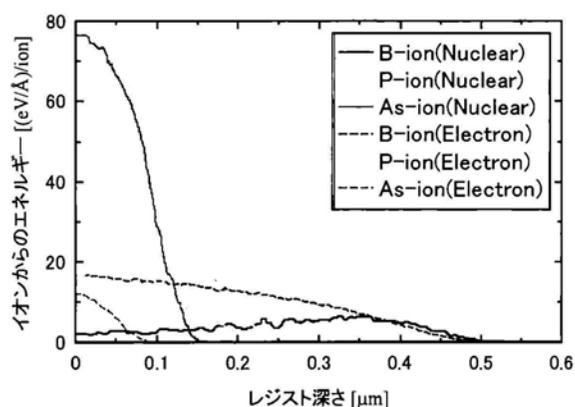


図 13 各注入イオン 1 個からレジストに与えられる核・電子のエネルギーの深さ分布

Fig.13 Distributions of the energies from B, P and As ions to C, O and H elements that compose PMMA were calculated by SRIM. The ion-acceleration energy was 70keV.

P イオンを注入したレジストでは、注入量が 5×10^{14} 個/ cm^2 で硬化がはじまったのに対し、As イオンを注入したレジストでは、 5×10^{13} 個/ cm^2 で硬化しはじめたと考えられる。

次に、イオン注入レジストの組成について、分光学的分析手法 (FT-IR、UV、ラマンおよび XPS) により検討した。図 14 に、B イオンを注入したレジストの各イオン注入量における FT-IR、UV スペクトルを示す。FT-IR スペクトルの結果から、イオン注入量の増加とともに、O-H 伸縮振動 (3400 cm^{-1} 付近)、C-H 伸縮振動 (2900 cm^{-1} 付近)

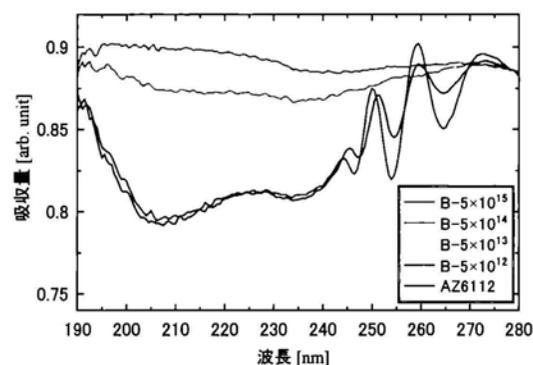
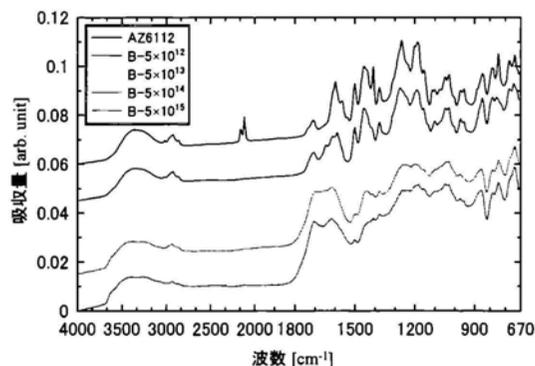


図 14 B イオン注入レジストの FT-IR (上図) および UV スペクトル (下図)

Fig.14 Dependence of FT-IR spectra (upper) and UV spectra (lower) of B ion-implanted resist.

注入力量の増加に対して、C-O-C (1100-1250 cm^{-1}) の吸収量の増加は見られなかった。イオン注入レジストの化学構造に関して、ノボラック樹脂間にイオン種が介在した架橋モデル (イオン-樹脂間の共有結合) が提唱されている⁷⁾。また、B イオンが注入されたレジストの化学構造について、B-O (1300-1500 cm^{-1})^{18, 19)} および B-C (1100-1200、-1500-1700 cm^{-1})^{18, 20)} の吸収が、イオン注入量の増加とともに増加するということが報告されている²¹⁾。しかしながら、今回の結果では、B イオンが介在した吸収は観測されなかった。

UV スペクトルの結果から、B イオン注入量の増加とともに 190~280nm の幅広い波長域で π - π^*

吸収に起因する吸収が増加した。このことから、イオン注入によって多彩な π 共役系が形成されていると考えられる。

図15に、Pイオンを注入したレジストの各イオン注入量におけるFT-IR、UVスペクトルを示す。FT-IRスペクトルの結果から、Bイオンを注入したレジストの場合と同様に、イオン注入量の増加とともに、OHおよびCHに帰属する吸収が減少し、C=Cに帰属する吸収が増加した。ただし、Pイオンを注入したレジストにおけるOHの吸収量の変化は、Bイオンの場合に比べて大きくなった。イオン注入量の増加に対するC-O-Cの吸収量の増加は見られなかった。また、P-C ($1290-1330$ 、 $1400-1480\text{cm}^{-1}$)、P-O ($850-1040$ 、 $1160-1260\text{cm}^{-1}$)などのイオン種が介在するような吸収も観測されなかった。

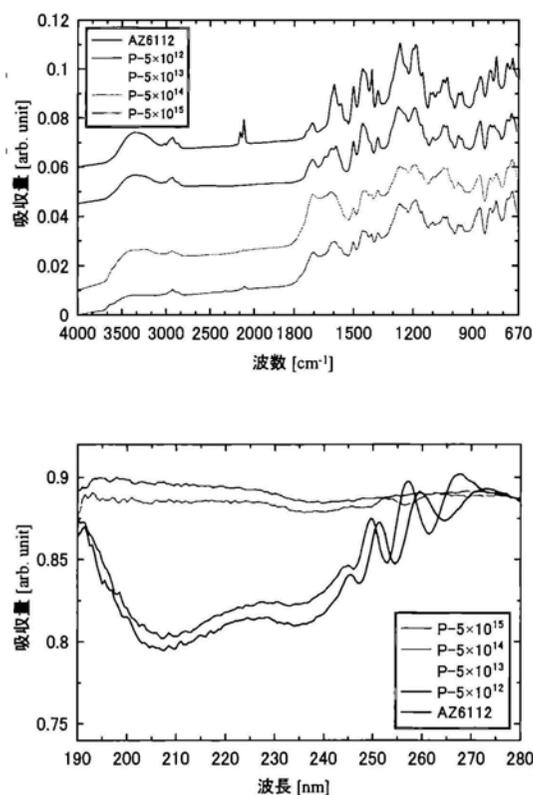


図15 Pイオン注入レジストのFT-IR (上図) およびUVスペクトル (下図)

Fig.15 Dependence of FT-IR spectra (upper) and UV spectra (lower) of P ion-implanted resist.

UVスペクトルの結果は、Bイオンを注入したレジストと同様に、イオン注入量が増加するほど190~280nm ($\pi-\pi^*$)の吸収量が増加する傾向が得られた。ただし、B、Pイオンを注入したレジストの吸収量を同じ注入量で比較すると、Pイオンを注入したレジストの方がBイオンを注入したレジストに比べて大きかった。Pイオンを注入したレジストの方が、Bイオンの場合に比べてより多くの多彩な π 共役系が形成されていると考えられる。Pイオンを注入したレジストの方がBイオンを注入したレジストよりもエネルギーが表面側に集中していることから(図13)、PイオンがBイオンよりもレジストを変質させると推測される。

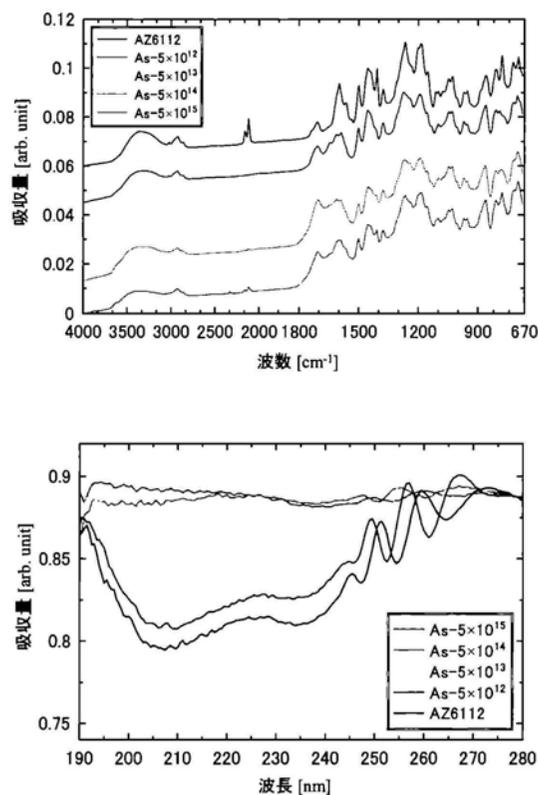


図16 Asイオン注入レジストのFT-IR (上図) およびUVスペクトル (下図)

Fig.16 Dependence of FT-IR spectra (upper) and UV spectra (lower) of As ion-implanted resist.

図16に、Asイオンを注入したレジストの各イオン注入量におけるFT-IR、UVスペクトルを示す。FT-IRスペクトルの結果から、B、Pイオンを注入

したレジストの場合と同様に、イオン注入量の増加とともに、OH および CH に帰属する吸収が減少し、C=C に帰属する吸収が増加した。As イオンを注入したレジストにおいても、P イオンの場合と同様に、OH の吸収量の変化が B イオンの場合に比べて大きかった。イオン注入量の増加に対する C-O-C の吸収量の増加は見られなかった。加えて、As-C (600-700, 800-1000 cm^{-1}) や As-O (500 付近, 800-900 cm^{-1}) などのイオン種が介在するような吸収も観測されなかった。

UV スペクトルの結果は、P イオンを注入したレジストと同様の傾向が見られた。ただし、P、As イオンを注入したレジストの 190~280nm (π - π^*) の吸収量を同じ注入量で比較すると、As イオンを注入したレジストの方が P イオンを注入したレジストに比べて大きかった。As イオンの方が P イオンよりも多くの多彩な・共役系が形成されていると考えられる。As イオンを注入したレジストの方が P イオンを注入したレジストよりもエネルギーが表面側に集中していることから (図 13)、As イオンが P イオンよりもレジストを変質させると推測される。

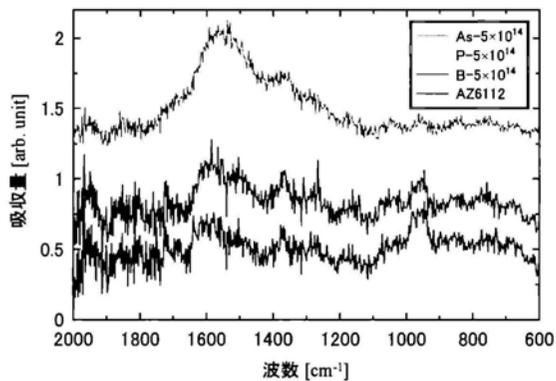


図 17 B、P、As が 5×10^{14} 個/ cm^2 注入されたレジストのラマンスペクトル

Fig.17 Raman spectra of resist B, P, As ion-implanted resist. The implantation doses was 5×10^{14} atoms/ cm^2 .

図 17 に、イオン注入量が 5×10^{14} 個/ cm^2 の B、P、As イオンを注入したレジストのラマンスペクトルを示す。970 cm^{-1} 付近のピークは基板である。Si の 2 次光である 1390 cm^{-1} 付近の D バンドおよ

び 1580 cm^{-1} 付近の G バンドが、B→P→As の順で増加していることがわかる。原子番号が大きく重いイオンほど、イオン注入によるレジストの炭化または架橋が進んでいると推測される。このため、図 6、7、8 で示したように、 5×10^{14} 個/ cm^2 の注入量において、P、As イオンを注入したレジストの方が B イオンよりも硬くなったと推測される。また、B、P イオンを注入したレジストでは注入量が 5×10^{14} 個/ cm^2 以上で硬化層が見られたが、As イオンでは 5×10^{13} 個/ cm^2 で硬化層が見られたことも、このことが関係していると考えられる。

XPS スペクトルより、各イオン注入レジストにおけるイオン注入によるレジスト中の O および C の信号量を比較した。ここで、各イオン注入レジストにおいて注入イオンに基づくピークは見られなかったため、XPS スペクトルから O1s および C1s 以外の信号をバックグラウンドとして除外した。図 18、19、20 に B、P、As イオンを注入したレジストの XPS スペクトルを示す。

図 18 の B イオンを注入したレジストでは、O1s のピークは注入量に対してほぼ一定であったが、C1s のピークは注入量の増加とともに増加した。B イオンを注入したレジストでは、炭素結合の増加にともなう炭化または架橋により硬化したと考えられる。

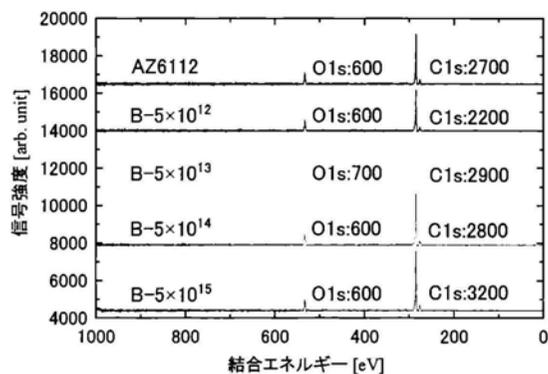


図 18 B イオン注入レジストの XPS スペクトル
Fig.18 XPS wide scan spectra of B ion-implanted resist.

P、As イオンを注入したレジストでも、C1s のピークは注入量の増加とともに増加する傾向を得た。但し、B イオンを注入したレジストと異な

り、P、As イオンの場合では、O1s のピークが注入量に対して減少した。とりわけ、イオン注入量が 5×10^{15} 個/cm² になると、O1s のピークが大きく減少した。同様の傾向が、図 15、16 に示す OH 吸収においても見られる。図 13 に示すように、B イオンに比べ、P、As イオンではレジストに与えられるエネルギーが表面側に集中している。また、

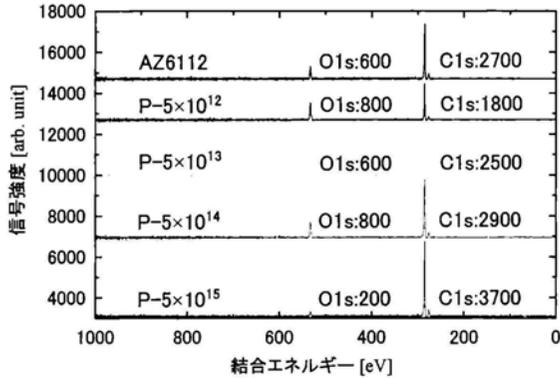


図 19 P イオン注入レジストの XPS スペクトル
 Fig.19 XPS wide scan spectra of P ion-implanted resist.

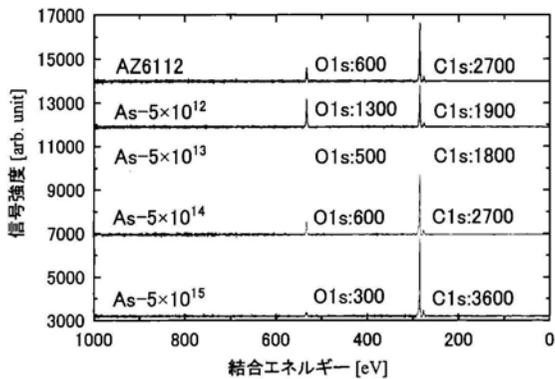


図 20 As イオン注入レジストの XPS スペクトル
 Fig.20 XPS wide scan spectra of As ion-implanted resist.

新たな結合に寄与する電子的エネルギー密度は各イオン種で同程度であるが、レジストへのダメージの指標である核的エネルギー密度は重いイオンほど大きい。重いイオンほどレジスト中の化学結合を切断しやすいため、P、As イオンを注入したレジストは、結合エネルギーの低い OH 基の脱離が起こったと考えられる。この脱離にともない、XPS スペクトルにおいて O1s のピークの減少

が観測されたと考察する。P、As イオン注入レジストでは、B イオンを注入したレジストとは異なり、O の減少および炭素結合の増加にともなう炭化または架橋により硬化したと推測される。

4. おわりに

湿潤オゾンによるイオン注入レジストの除去性と硬さとの相関について明らかにした。また、イオン注入によるレジストの硬化のメカニズムについて、数値シミュレーションおよび化学的分析により検討した。

湿潤オゾンを用いて、B、P、As イオンが 5×10^{12} から 5×10^{15} 個/cm² 注入されたレジストの除去を行った。 5×10^{13} 個/cm² 以下のイオン注入レジストは、未注入のレジストとほぼ同じ硬さであり、どのイオン種でも除去できた。 5×10^{15} 個/cm² 以上の注入量のイオン注入レジストは、未注入のレジストに比べて 10 倍以上の硬さであり、どのイオン種でも除去できなかった。 5×10^{14} 個/cm² では、B イオン注入レジストのみ低速ながらも除去できたが、P、As イオンイオン注入レジストは除去できなかった。この注入量において、B イオン注入レジストの硬さは未注入レジストの約 1.8 倍、P イオンでは約 8 倍、As イオンでは約 5 倍であった。湿潤オゾンにより除去可能な硬さの閾値として、未注入レジストの硬さの約 2 倍程度であると言える。

イオン注入レジストの硬化は、レジストがイオンからエネルギーを得ることで引き起こされる。軽い B イオンでは核的エネルギーよりも電子的エネルギーの方が大きいため、イオンはレジストの奥深くまで入り込み、硬化層は厚いが軟らかくなる。一方、重い As イオンでは電子的エネルギーよりも核的エネルギーの方が大きいため、イオンはレジストの表面側に分布し、硬化層が薄いけど硬くなる。新たな結合に寄与する電子的エネルギー密度は各イオン種で同程度であるが、レジストへのダメージの指標である核的エネルギー密度は重いイオンほど大きい。重いイオンは、軽いイオンに比べてレジスト表面側に集中して注入される。UV、Raman スペクトル分析より、イオン注入レジストは、表面側の OH 基、CH 基および

O1s が減少し、C=C や C1s、 π 共役系が増加して炭化または架橋により硬化したと推測される。

謝辞

本研究は、平成 16 年度 NEDO 産業技術研究助成事業によって行われた。また、支援頂いた三菱電機 (株)、島田理化工業 (株) に、心より感謝いたします。

参考文献

- 1) M. Itano, F. W. Jr. Kern, M. Miyashita, and T. Ohmi, *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, 6, 258 (1993).
- 2) K. Yamamoto, A. Nakamura, and U. Hase, *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, 12, 288 (1999).
- 3) H. Horibe, M. Yamamoto, T. Ichikawa, T. Kamimura and S. Tagawa, *J. Photopolym. Sci. Tech.*, 20, 315-318 (2007).
- 4) S. Noda, M. Miyamoto, H. Horibe, I. Oya, M. Kuzumoto, and T. Kataoka, *J. Electrochem. Soc.*, 150, G537 (2003).
- 5) S. Noda, H. Horibe, K. Kawase, M. Miyamoto, M. Kuzumoto, and T. Kataoka, *J. Adv. Oxid. Technol.*, 6, 132 (2003).
- 6) S. Noda, K. Kawase, H. Horibe, I. Oya, M. Kuzumoto, and T. Kataoka, *J. Electrochem. Soc.*, 152, G73 (2005).
- 7) S. Fujimura, J. Konno, K. Hikazutani and H. Yano, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 28, 2130-2136 (1989).
- 8) P. M. Visintin, M. B. Korzenshi and T. H. Baum, *J. Electrochem. Soc.*, 153, G591-G597 (2006).
- 9) K. K. Ong, M. H. Liang, L. H. Chan and C. P. Soo, *J. Vac. Sci. Technol. A*, 17, 1479-1482 (1999).
- 10) M. N. Kawaguchi, J. S. Papanu and E. G. Pavel, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 24, 651-656 (2006).
- 11) M. N. Kawaguchi, J. S. Papanu, B. Su, M. Castle and A. Al-Bayati, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 24, 657-663 (2006).
- 12) A. Nakaue and N. Kawakami, *Kobe Steel Engineering Reports*, 52, 74-77 (2002).
- 13) M. Lichinchi, C. Lenardi, J. Haupt and R. Vitali, *Thin Solid Films*, 312, 240-248 (1998).
- 14) X. Chen and J. J. Vlassaka, *J. Mater. Res*, 16, 2974-2982 (2001).
- 15) B. D. Beake, G. J. Leggett and M. R. Alexander, *J. Mater. Sci.*, 37, 4919-4927 (2002).
- 16) J. F. Ziegler, J. P. Biersack, and M. D. Ziegler, "SRIM, The Stopping and Range of Ions in Matter", Lulu Press Co., Morrisville, NC, USA, 2008. (<http://www.srim.org>).
- 17) T. C. Smith, "Photoresist and Particulate Problems," in *Handbook of Ion Implantation Technology*, Ed. J. F. Ziegler, Elsevier Science Publishers B. V., (1992).
- 18) Y. J. Zou, X. W. Zhang, Y. L. Li, B. Wang, H. Yan, J. Z. Cui, L. M. Liu, and D. A. Da, *J. Mater. Sci.*, 37, 1043-1047 (2002).
- 19) G. D. Soraru, N. Dallabona, C. Gervais, and F. Babonneau, *Chem. Mater*, 11, 910-919 (1999).
- 20) A. Annen, M. Sass, R. Beckmann, A. Von Keudell, and W. Jacob, *Thin Solid Films*, 312, 147 (1998).

(2012 年 3 月 16 日受理)



堀邊 英夫

1985 年京都大学工学部合成化学科卒。1985 年三菱電機 (株) 材料研究所 (現先端技術総合研究所) 入社、研究員、主任研究員、主席研究員、2001、02 年島田理化工業 (株) 島田製作所オゾン事業化プロジェクト副部長 (兼)。2003 年高知工業高等専門学校校助教授、2007 年金沢工業大学バイオ・化学部教授、2007 年より大阪大学招聘教授 (兼)。博士 (工学) (大阪大学)。専門は高分子材料化学。第 46 回化学技術賞、第 14 回平賀源内大賞等受賞。高分子学会、応用物理学会、日本放射線化学会会員。



山本 雅史

2007 年大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻修了。2010 年金沢工業大学大学院工学研究科材料設計工学専攻博士後期課程修了。博士 (工学) (金沢工業大学)。現在、(株) 明電舎に勤務。2005 年電気学会 100 周年記念基金学術振興助成優秀論文賞、H19 年度応物北陸・信越支部発表奨励賞受賞。