

堆積量や表面荒れの増加が抑制されることから、Si 表面と比較して $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ や Ge 表面では WF_6 が反応しにくく、 WF_6 による基板のエッチングが少ないことを見いだした。また、W の吸着および成膜温度を 200°C まで低温化することにより、 WF_6 による基板のエッチングを 11\AA 以下に抑制した。さらに、 SiH_4 - WF_6 系で成膜した W 薄膜の結晶性と比抵抗は(図 3)、Ge 比率によらず SiH_4 と WF_6 の分圧比に大きく依存しており、 $P_{\text{SiH}_4}/P_{\text{WF}_6}$ が 1 以下の場合には比抵抗が低い α -W($40\text{--}70\ \mu\Omega\cdot\text{cm}$)、1.6 以上の場合には比抵抗が高い β -W あるいはアモルファス($260\text{--}320\ \mu\Omega\cdot\text{cm}$)、1 から 1.6 の間では α -W と β -W が混合している結晶性となる。また、W 薄膜と基板との密着性は分圧比が高い方が優れる一方、 SiO_2 マスクを用いた場合の選択成長性は分圧比が低い方が優れている。

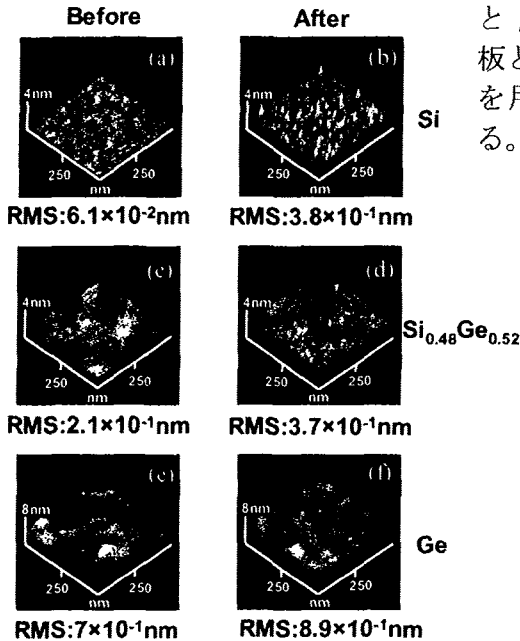


図 2 Si、 $\text{Si}_{0.48}\text{Ge}_{0.52}$ 、Ge 表面へ 200°C で WF_6 のみを 3 分間供給した前後の表面の AFM 像; 測定誤差 (a) $\pm 0.15 \times 10^{-2}\text{nm}$ (b) $\pm 0.14 \times 10^{-1}\text{nm}$ (c) $\pm 0.18 \times 10^{-1}\text{nm}$ (d) $\pm 0.15 \times 10^{-1}\text{nm}$ (e) $\pm 0.76 \times 10^{-1}\text{nm}$ (f) $\pm 1.81 \times 10^{-1}\text{nm}$

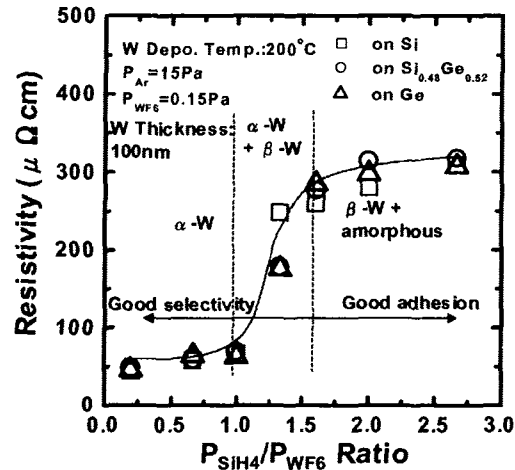


図 3 Si、 $\text{Si}_{0.48}\text{Ge}_{0.52}$ 、Ge 表面上に成膜した W の結晶性と比抵抗の分圧比 ($P_{\text{SiH}_4}/P_{\text{WF}_6}$) 依存性

3. 熱処理による $\text{Si}_{1-x-y}\text{Ge}_x\text{C}_y$ の不純物(B or P)とキャリア濃度との関係^{3,4)}

$\text{Si}_{1-x-y}\text{Ge}_x\text{C}_y$ 薄膜と金属とのコンタクト抵抗を決定する主要因である $\text{Si}_{1-x-y}\text{Ge}_x\text{C}_y$ 薄膜のキャリア濃度について研究した。 550°C での CVD 法によりエピタキシャル成長した B 及び P ドープ $\text{Si}_{1-x-y}\text{Ge}_x\text{C}_y$ 薄膜において、B ドープ $\text{Si}_{1-x-y}\text{Ge}_x\text{C}_y$ 薄膜のキャリア濃度は Ge 比率によらず $2 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ は Ge 比率

によらず $2 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ までほぼ B 濃度と一致するが、 $6 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ で飽和し、電気的に不活性な B が増加する。 P ドープの場合、Ge 比率 0.48 以下ではキャリア濃度は Ge 比率によらず $2 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ までほぼ P 濃度と一致するが、Ge 比率 0.51 以上では電気的に不活性な P が増加する。また、B 及び P ドープ共に C 比率が増加するほど電気的に不活性な不純物(B 及び P)が増加する傾向に

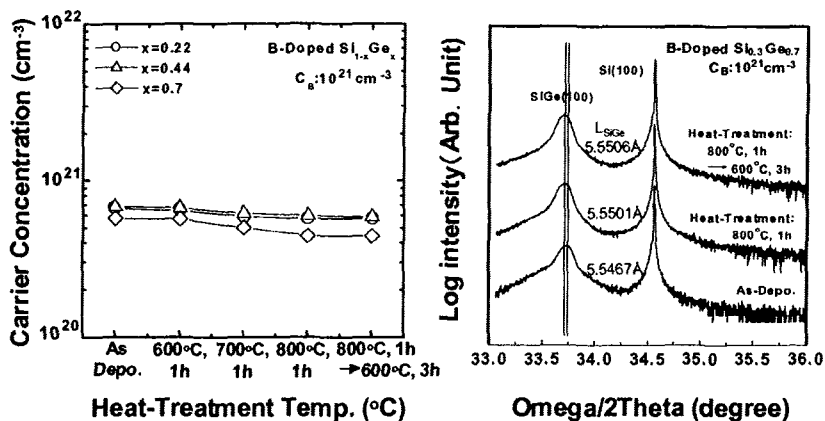


図 4 (a) B ドープ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ のキャリア濃度の熱処理温度依存性 (b) B ドープ $\text{Si}_{0.3}\text{Ge}_{0.7}$ の熱処理前後の XRD スペクトル

ある。さらに、 $\text{Si}_{1-x-y}\text{Ge}_x\text{C}_y$ 薄膜の高キャリア濃度化のため、熱処理による不純物の固溶度の変化並びに不純物の活性化・不活性化現象を定量的に明らかにした。B ドープ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($C_B=10^{21}\text{cm}^{-3}$) の場合(図 4-a)、 700°C 以上での熱処理によりキャリア濃度は減少し、その後の低温熱処理でもキャリア濃度は回復しないことがわかった。XRD による格子定数の測定結果から(図 4-b)、 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 成膜時に B の多くは非平衡状態で置換位置に取り込まれるが、熱処理により置換位置の B の一部が格子間位置に入るとともにクラスタ形成が進行し、電気的に不活性になると考えられる。P ドープ $\text{Si}_{0.3}\text{Ge}_{0.7}$ ($C_P=10^{20}\text{cm}^{-3}$) と $\text{Si}_{0.54}\text{Ge}_{0.44}\text{C}_{0.02}$ ($C_P=10^{20}\text{cm}^{-3}$) の場合(図 5-a)、 800°C の高温熱処理後キャリア濃度が熱処理前よりそれぞれ 2 倍と 2.7 倍増加し、その後の低温熱処理ではキャリア濃度が減少することがわかった。XRD 結果から(図 5-b と 5-c)、 800°C での高温熱処理後格子間位置の P の一部は置換位置に入って活性化になるが、C は高温熱処理により置換位置から格子間位置に入ることがわかった。

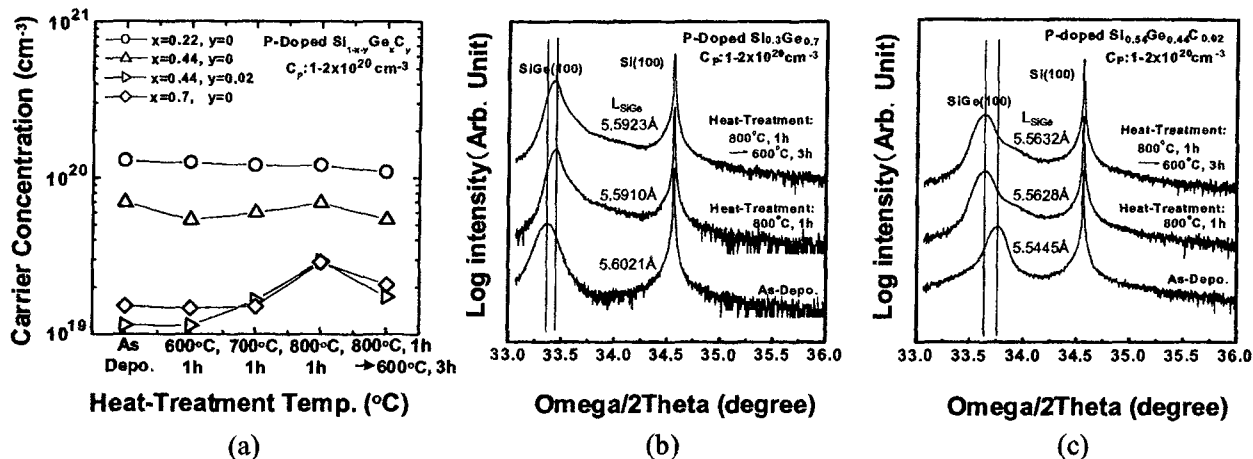


図 5 (a) P ドープ $\text{Si}_{1-x-y}\text{Ge}_x\text{C}_y$ のキャリア濃度の熱処理温度依存性 (b) P ドープ $\text{Si}_{0.3}\text{Ge}_{0.7}$ の熱処理前後の XRD スペクトル (c) P ドープ $\text{Si}_{0.54}\text{Ge}_{0.44}\text{C}_{0.02}$ の熱処理前後の XRD スペクトル

4. B 及び P ドープ $\text{Si}_{1-x-y}\text{Ge}_x\text{C}_y$ と CVD-W とのコンタクト抵抗率^{5,6)}

極微細化素子において不可欠となる $10^{-8}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 台の低コンタクト抵抗率を実現するため、B 及び P ドープ $\text{Si}_{1-x-y}\text{Ge}_x\text{C}_y$ と選択成長 W とのコンタクト抵抗率とキャリア濃度・Ge 比率・C 比率との関係について調べた。W 選択成長は WF_6 のみを供給し基板表面に W 原子を十分吸着させた上で、密着性と選択成長性の両方が得られる図 3 の $P_{\text{SiH}_4}/P_{\text{WF}_6}=1.6$ の条件で行った。P ドープ $\text{Si}_{1-x-y}\text{Ge}_x\text{C}_y$ の

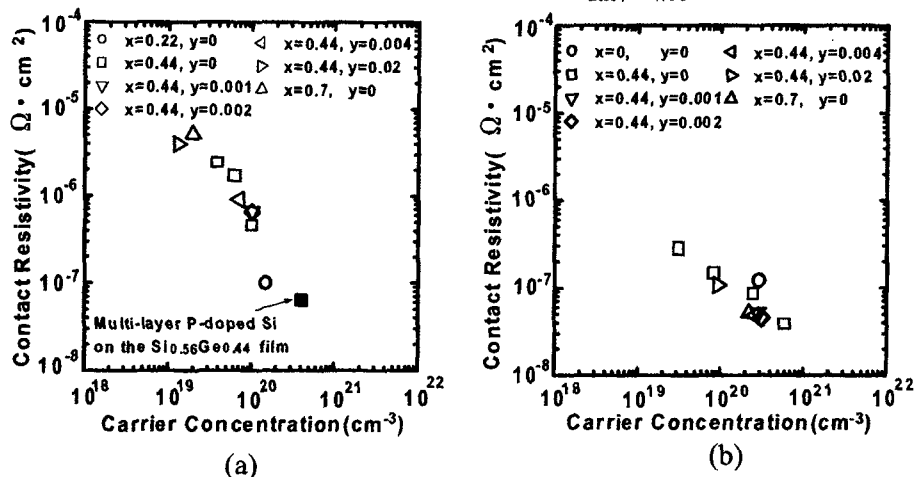


図 6 (a) P 及び(b) B ドープ $\text{Si}_{1-x-y}\text{Ge}_x\text{C}_y$ と CVD-W とのコンタクト抵抗率

場合(図 6-a)は、Ge と C 比率によらず、キャリア濃度の増加とともにコンタクト抵抗率は減少する。一方、Ge 比率と C 比率が高いほど電気的に不活性な P が増加することからキャリア濃度は減少し、コンタクト抵抗率は大きくなる。したがって、P ドープ $\text{Si}_{1-x-y}\text{Ge}_x\text{C}_y$ の場合、コンタクト抵抗率を下げるためには低 Ge 比率と低 C 比率が有効である。この問題を

論文審査結果の要旨

Si 集積回路の大容量化・高速化に伴い、MOS 素子の高駆動力化・低消費電力化のための微細プロセスの開発はめざましいものがある。それと同時に Si-Ge-C 系IV族半導体薄膜の導入による Si のバンドエンジニアリングが必要不可欠となっている。その中で、配線の分野では、コンタクトホールへの金属の埋め込みや極薄ソース/ドレイン層上への金属裏打ちのための選択成長技術と Si-Ge-C 系薄膜と金属との低抵抗コンタクト形成技術の開発が重要な課題となっている。著者は、Si-Ge-C 系薄膜を用いた Si 系デバイスの高性能化を念頭において、Si-Ge-C 系薄膜と選択成長 W との接合形成について研究した。本論文は、これらの成果をまとめたもので全文 5 章よりなる。

第 1 章は序論である。

第 2 章では、 WF_6 を原料ガスとして用いた W 選択成長において、 WF_6 と $Si_{1-x}Ge_x$ との反応の制御について述べている。200°C という低温では、W 堆積量は WF_6 供給時間と共に増加し、 WF_6 反応が自己制限的に飽和する傾向があること、また $Si_{1-x}Ge_x$ の Ge 比率が増加するほど、 WF_6 による $Si_{1-x}Ge_x$ のエッチングが抑制されることを明らかにしている。さらに、 SiH_4 - WF_6 系での W 薄膜低温形成条件、特に SiH_4 と WF_6 の分圧比と W 選択成長性・ $Si_{1-x}Ge_x$ と W との密着性・W 薄膜の結晶性・比抵抗の関係を明らかにしている。これらは、IV族半導体表面への高品質 W 薄膜選択成長に関する極めて重要かつ実用的な知見である。

第 3 章では、 $Si_{1-xy}Ge_xC_y$ 薄膜と金属とのコンタクト抵抗を決定する主要因である $Si_{1-xy}Ge_xC_y$ 薄膜のキャリア濃度制御について述べている。550°C での CVD 法によりエピタキシャル成長した B 及び P ドープ $Si_{1-xy}Ge_xC_y$ 薄膜において、不純物濃度とキャリア濃度との関係を調べ、熱処理による不純物の固溶度変化並びに不純物の活性化・不活性化現象を定量的に明らかにしている。高濃度の B ドープ $Si_{1-xy}Ge_xC_y$ の場合、700°C 以上の熱処理により置換位置の B の一部が格子間位置に入りキャリア濃度が減少することを見だし、熱処理によりクラスタ形成が進行し、B が電気的に不活性になるとして説明している。高濃度の P ドープ $Si_{1-xy}Ge_xC_y$ の場合、P の固溶限界は Ge 比率が高いほど低く、800°C の高温熱処理では格子間位置の P の一部が置換位置に入り活性になるが、その後の低温熱処理では置換位置の P の一部が格子間位置に入り不活性になることを見だしている。また、C は高温熱処理で置換位置から格子間位置に入ることを明らかにしている。これらは、B 及び P ドープ $Si_{1-xy}Ge_xC_y$ のキャリア濃度制御のための極めて重要な知見である。

第 4 章では、B 及び P ドープ $Si_{1-xy}Ge_xC_y$ と選択成長 W とのコンタクト抵抗率とキャリア濃度・Ge 比率・C 比率との関係を調べ、P ドープの場合は Si-Ge-C 系薄膜表面に $4 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ の高キャリア濃度の多層 P ドープ Si 薄膜(6nm 厚)を形成することにより、B ドープの場合は高 Ge 比率の $Si_{1-x}Ge_x$ を用いてキャリア濃度を $6 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ まで高めることにより、 $10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 台の低いコンタクト抵抗率を実現できることを明らかにしている。これらは、MOS 素子の極微細化におけるコンタクト抵抗増大の抑制のための極めて重要な成果である。

第 5 章は結論である。

以上要するに本論文は、Si-Ge-C 系薄膜上のみへの CVD 法による W の低温選択成長を実験的に研究し、Si 系デバイスの極微細化のための幾つかの重要な知見を得たもので、電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。