

プラズマ照射に起因するシリコン系材料中の欠陥形成機構の解明

航空宇宙工学専攻 推進工学研究室

博士後期課程 3年 濱野誉

1. 研究背景

プラズマ技術は、半導体デバイス製造や宇宙電気推進など最先端の重要科学技術分野の中核を担い、幅広い産業分野で利用されている。代表的なプラズマ応用の1つであるプラズマ材料加工プロセスでは、プラズマから材料表面に輸送されるラジカルやイオンとの化学的・物理的反応を利用して、ナノスケールの極微細構造、複雑な3次元構造の高精度加工を実現している。一方でプラズマ照射は固体材料との様々な相互作用(例:イオン衝撃, 光照射)を伴い、被加工材料表面(深さ数~数百 nm)に本来望ましくない欠陥構造を形成する(図 1(a))。これらは「プラズマ誘起欠陥」[1]と定義され、材料の物理的特性を潜在的に変化させる。デバイスの微細化に伴い、欠陥形成に起因するデバイス特性(例:消費電力), 信頼性の劣化が顕在化している。高性能デバイスの実現には、欠陥の超低密度化とともに、残留する欠陥の本質的特性を解明することが不可欠である。

一般に半導体, 絶縁体材料において、微視的な欠陥状態はその空間的位置に加え、バンドギャップ内のエネルギー準位により規定される。したがってプラズマ誘起欠陥のプロファイルは物理的深さプロファイル, バンドギャップ内のエネルギー準位分布により記述される[2](図 1(b))。これら欠陥密度プロファイルはプロセス条件に依存して様々な形態をとりうると推定されている。これまで、プラズマ照射によりシリコン(Si)基板表面に形成される欠陥準位に対して、特に深さプロファイルに焦点を当てた分析, 解析が進められてきた[3]が、エネルギー準位分布の解析手法確立には至っていない。以上の背景から本研究では、Si基板内部の様々な欠陥準位分布を考慮したデバイスの電気的特性予測手法を構築し、特徴的な実験結果と比較することでバンドギャップ内欠陥準位分布の予測を試みた。

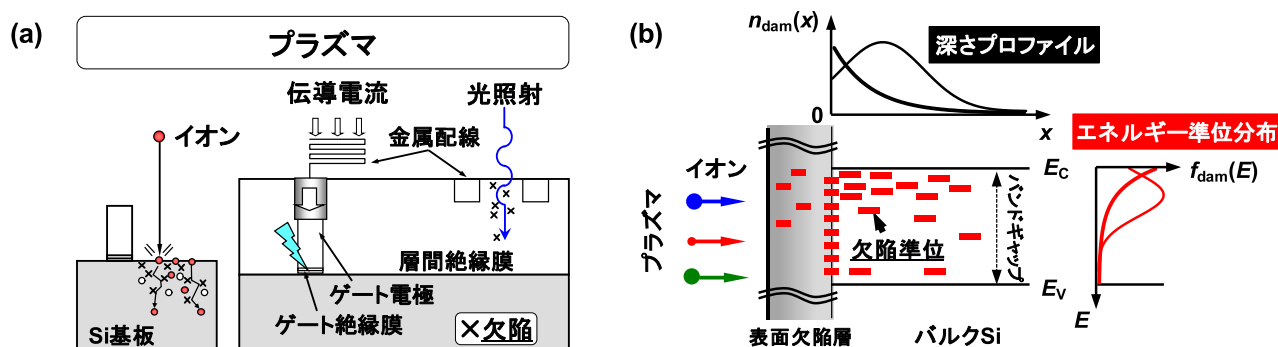


図1 (a)プラズマ誘起欠陥の形成機構 (b)Si基板内に形成される欠陥準位のプロファイル

2. 欠陥準位分布を考慮したデバイス特性の予測

本研究では、金属, 酸化膜, 半導体が縦方向に並んだMOS(Metal-Oxide-Semiconductor)構造とよばれる代表的な素子構造に着目する(図 2(a))。この構造は、外部電圧の印加により電気容量を制御できる可変容量キャパシタとなっている。低抵抗 n 型 Si 基板表面にプラズマ誘起欠陥準位が多数存在する MOS 構造の電気容量-電圧(C-V)特性を数値計算により予測する。ここでは欠陥のエネルギー準位分布に着目した予測結果を紹介する。欠陥の深さプロファイルは指数分布, エネルギー準位分布はボルツマン型(A)または平均エネルギー

\bar{E} の異なる2つのガウシアン型分布(B, C)を仮定した(図 2(b)). ガウシアン型分布の場合, \bar{E} がバンドギャップ中央に近づくにつれて, ボルツマン型分布の場合に見られる単調な形状からフラットバンド近傍(0 V 付近)に特異な形状(ハンプ構造)を持つ曲線への変化が予測された(図 2(c)).

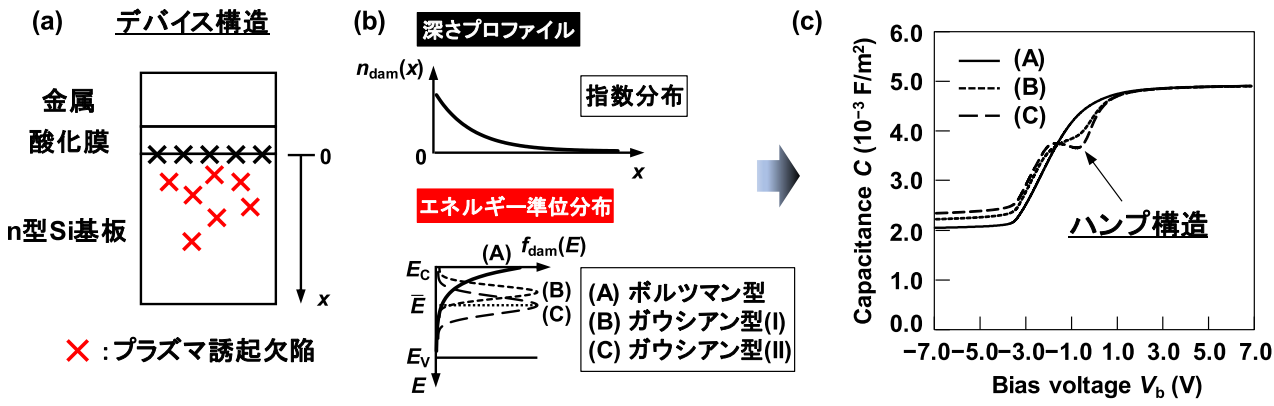


図2 3種類のエネルギー準位分布に対して予測されたMOS構造の電気容量—電圧(C—V)特性

3. 実験結果とモデル予測の比較によるプラズマ誘起欠陥準位分布解析

低抵抗 n 型 Si 基板を(i)誘導結合型(ICP)または(ii)容量結合型(CCP)プラズマ源に 60 秒曝露した(図 3(a)). 2 つのプラズマ源ではプラズマ密度が大きく異なり, 結果として基板に入射するイオンの総数が異なる. ガス種としてアルゴン(Ar)を用いた. その後, 水銀(Hg)プローバを用いて MOS 構造を構築し, C—V 特性を計測した. ここでは縦軸を $1/C^2$ とした曲線を示す(図 3(b)). 典型的な単調曲線である(i)とは異なり, (ii)は空乏領域(-1 V 付近)においてハンプ構造が見られる. また, 他のガス種でも同様の特異な形状を持つ実験結果が報告されている[4]. これらの結果は, プロセス条件(プラズマパラメータ)によって欠陥のエネルギー準位分布が大きく異なることを意味する. なおこれら欠陥準位分布の違いは, 局所的な欠陥構造の違いに起因すると考えている.

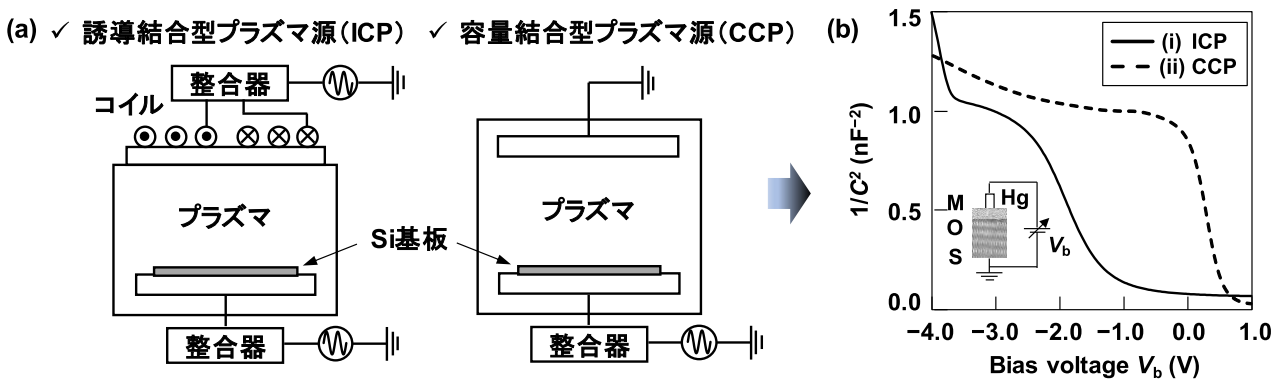


図3 異なるプラズマ源でSi基板を曝露した後作製したMOS構造のC—V特性

4. おわりに

現在, プラズマ材料加工プロセスでは様々なプラズマ源, ガス種が用いられており, 生じる欠陥のプロファイルも様々である. 欠陥準位分布に応じたデバイスの特徴的な電気特性変化に着目してバンドギャップ内準位分布を予測する本手法は, 種々のプロセス条件に対するプラズマ誘起欠陥解析, 制御に有用であると考えている.

参考文献

[1] K. Eriguchi, Jpn. J. Appl. Phys. **60**, 040101 (2021). [2] T. Hamano *et al.*, J. Phys. D **52**, 455102 (2019). [3] Y. Sato *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. A **37**, 011304 (2019). [4] T. Hamano *et al.*, Proc. SISPAD, 125 (2020).