誘電率ミスマッチによる高ドープ Si 薄膜中の不純物のイオン化エネルギー上昇の解析

Analysis of Increased Ionization Energy in Heavily Doped Thin Si Films by Dielectric Mismatch

○田中 貴久[1]，高橋 綱己[1]，内田 建[1]（慶應大理工 電子工[1]）
○Takahisa Tanaka[1], Tsunaki Takahashi[1], and Ken Uchida[1]
(Dept. Electronics and Electrical Eng., Keio Univ.[1])
E-mail: tanaka@ssn.elec.keio.ac.jp

【背景および目的】近年のトランジスタはナノスケール半導体をチャネルに用いており，ナノサイズ半導体中への不純物の添加とその特性理解は不可欠である．トランジスタのソース/ドレインエクステンションにおいては，寄生抵抗を抑制するために高ドープの不純物が用いられるので，ナノスケール高不純物ドープ半導体中における不純物のイオン化エネルギー(E_D)に関する研究が必要である．低ドープのナノスケール半導体では，量子閉じ込め効果と絶縁膜との誘電率ミスマッチが，孤立した不純物のイオン化エネルギー(E_D^0)を大きく上昇させることがすでに報告されているが[1], 高ドープのナノスケール半導体において，誘電率ミスマッチが E_D に与える影響は十分に解析されていない．そこで本研究では，高ドープ Si 薄膜中において誘電率ミスマッチが E_D に与える影響を解析した．

【方法】本研究では不純物としてリンを考慮した．図 1 に不純物に束縛された電子の波動関数の模式図を示す．高ドープ Si 薄膜中の E_D は(1)量子閉じ込め効果と誘電率ミスマッチによる電子の波動関数の変形による変化, (2)高ドープによる電子の波動関数同士の重なりで生じる減少の 2 種類の機構で決定される．まず，(1)による孤立した不純物の E_D^0 の変化は，有効質量近似を用いて Schrödinger 方程式から計算した．4 種類の絶縁膜(SiO_2, Si_3N_4, Al_2O_3, HfO_2)についての誘電率ミスマッチの影響は，鏡像電荷として取り入れた．次に(2)については，実験から決定した Si 薄膜中の E_D に基づく，不純物濃度に依存した E_D の減少の経験的モデル[2]を用いて計算した．

【結果と考察】異なる絶縁膜に挟まれた Si 薄膜中の E_D^0 の膜厚依存性を図 2 に示す．孤立した不純物では，誘電率ミスマッチにより酸化膜の誘電率が大きいほど E_D^0 が減少している．E_D^0 から経験的モデルを用いて計算した 4 nm 厚 Si 薄膜中の E_D を図 3 に示す. バルク Si 中では, 不純物濃度 5×10^{18} cm^{-3} で E_D が 2 meV 程度まで減少するのに対し，Si 薄膜中では E_D が 10 meV 以上となっている．この高不純物濃度での E_D の上昇は，ある不純物の周囲に存在する他の不純物数が，低次元化により実効的に少なくなることに起因する[2]．そのため高ドープ Si 薄膜中では，絶縁膜の比誘電率差による E_D の差が高い不純物濃度まで存在する．図 3 より不純物濃度 5×10^{18} cm^{-3} において，酸化膜が SiO_2 と HfO_2 の場合の間で 7 meV 程度の E_D の差が確認できる．この結果は，ゲート側壁の絶縁膜に高い比誘電率を持つ材料を採用することで E_D を減少させ，寄生抵抗を抑制できる可能性を示している．

【結論】誘電率ミスマッチを考慮して薄膜 Si 中の E_D^0 を計算した．次に E_D の不純物濃度依存性の経験的モデルを用いることで，高ドープ Si 薄膜中の E_D を計算した．その結果から，高誘電率の酸化膜を使用することで高ドープ Si 薄膜中の E_D を減少させ，寄生抵抗を抑制できる可能性を示した．

謝辞: 本研究の一部は日本学術振興会の特別研究員奨励費 14J05405 の助成を受けたものです．また，本研究の一部は JSPS 科研費 15H03997 の助成を受けたものです．

[1] M. Diarra *et al*., Phys. Rev. B **75**, 045301 (2007).
[2] T. Tanaka *et al*., Nano Lett. (2016) DOI:10.1021/acs.nanolett.5b04406.

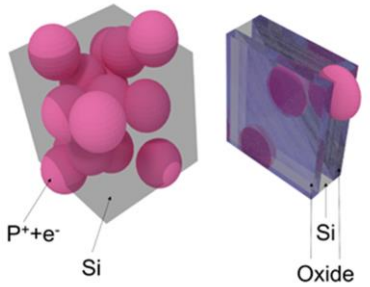

図 1 バルク Si 中(左)と Si 薄膜中(右)のリン P^+に束縛された電子 e^- の波動関数の模式図.

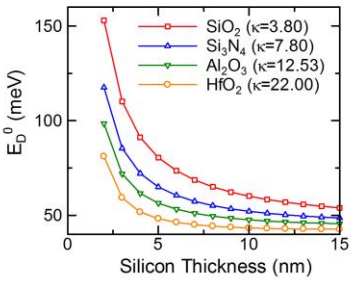

図 2 異なる比誘電率 κ を持つ酸化膜で挟まれた Si 薄膜中の E_D^0.

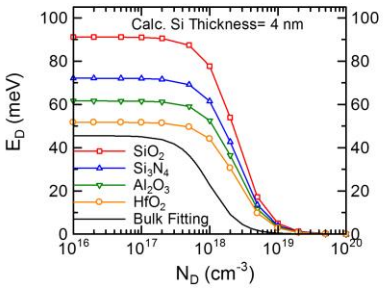

図 3 E_D の不純物濃度 N_D 依存性.

© 2016年 応用物理学会