極低エネルギー注入ボロンの熱処理時におけるドーズロス現象

非会員 辻 博史* 非会員 古橋 壮之*
非会員 舘 真透* 正員 谷口 研二*

Dose Loss of Ultralow-energy Implanted Boron into Silicon during Annealing

Hiroshi Tsuji*, Non-member, Masayuki Furuhashi*, Non-member, Masayuki Tachi*, Non-member,
Kenji Taniguchi*, Member

The dose loss of ultralow-energy implanted boron in silicon has been investigated. The uphill diffusion was closely correlated with dose loss of implanted boron during early annealing. The evolution of dose loss can be classified into three categories depending on the implant dose. The activation energy for the release of boron atoms from the Si/SiO₂ interface was found to be 2.6 eV.

キーワード：ボロン，ドーズロス，極低エネルギー注入，浅い接合

Keywords: boron, dose loss, ultralow-energy implant, shallow junction

1. まえがき

CMOS 回路の微細化を進めていく上で，pMOSFET のソース・ドレイン領域での浅い接合の形成が重要な課題である。その形成に極低エネルギーイオン注入が用いられる現在，シリコン / 酸化膜界面にドーパントが捕獲されるドーズロス現象⁽¹⁾が深刻な問題となっている。この現象はドーパントのイオン注入エネルギーが低く，分布が界面に近いほど顕著になることが知られている⁽²⁾。しかし，その特性については未だ不明な点が多い。そこで，本研究では，ボロンを極低エネルギー注入した基板を用い，熱処理時のドーズロス現象の特性を詳しく調べた。

2. 実験方法

実験には，高抵抗の n 型 (100)Cz シリコン基板を用い，ボロンをエネルギー 0.5 keV，ドーズ量 $5 \times 10^{11} \sim 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ でイオン注入した。その後，窒素雰囲気中で，電気炉による熱処理を 820~920 °C で行った。ボロンの深さ分布の評価には SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry) 分析法を用いた。

3. 実験結果

3.1 熱処理初期の異常拡散に起因するドーズロス

図 1 にボロンを $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 注入した試料の 820 °C 熱処理後のボロン濃度の深さ方向分布を示す。熱処理を行っていない as-implanted の試料と 820 °C で 1 分熱処理した試料のボロン分布を比較すると，熱処理後の分布の方が浅く

なっており，表面方向への異常なボロンの拡散が生じていることが分かる。また，1 分間の熱処理以降は通常の拡散現象が見られることから，この異常拡散は熱処理初期のみに生じる過渡的な現象であることが分かる。類似の異常拡散現象は，高ドーズ注入 ($1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) の場合には，プリアモルファス化したシリコン基板でのみ生じることが報告されているが⁽³⁾，そのメカニズムは未解明である。同様の表面方向への異常拡散は，他のドーズ量 ($5 \times 10^{11} \sim 5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$) の試料でも観測されたが， $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 注入した試料では観測されなかった。

図 1 ボロンを $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 注入した試料の 820 °C 熱処理後のボロン濃度分布

Fig. 1. B SIMS profiles for 0.5 keV $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ B implant, followed by annealing at 820 °C.

* 大阪大学大学院工学研究科電子情報エネルギー工学専攻，
〒565-0871 吹田市
Department of Electronics and Information Systems, Osaka
University,
Suita, 565-0871, Japan

図2 ボロンを $5 \times 10^{11} \sim 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 注入した試料の 820°C 熱処理後のドーズロス量のドーズ量依存性

Fig. 2. Dose dependence of B dose loss at 820°C for $0.5 \text{ keV } 5 \times 10^{11} \sim 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ B implant.

図3 (a) ボロンを $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 注入した試料のドーズロス量の減衰時定数の解析
(b) 減衰時定数のアレニウスプロット

Fig. 3. (a) Analysis of the decay time constant of the dose loss for $0.5 \text{ keV } 5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ B implant.
(b) Arrhenius plot of the decay time constant.

図2にボロンを $5 \times 10^{11} \sim 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 注入した試料の 820°C 熱処理後のドーズロス量のドーズ量依存性を示す。ドーズ量が $5 \times 10^{11} \sim 5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ の試料では、1分の熱処理で多量のドーズロスが生じていることが分かる。過渡増速拡散 (TED) によって多量のドーズロスが生じることが報告されているが⁽⁴⁾、本実験で用いた試料では TED は観測されていない。更に、1分の熱処理で多量のドーズロスが観測された全ての試料 ($1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ を除く) において前述の表面方向への異常拡散が観測された。以上のことから、表面方向への異常拡散と熱処理初期のドーズロスとが密接に関連していることが分かった。

3.2 ドーズロス量の時間変化 ドーズロス量の時間変化は、ドーズ量により3通りのパターンに分類できることが分かった (図2)。低ドーズ ($5 \times 10^{11}, 5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) では、熱処理初期のドーズロスに加えて、その後もドーズロス量は増加するが、ある時間から減少に転じる。ドーズロス量の減少は、界面に捕獲されたボロンが放出され、シリコン基板中に戻ることを意味する。また、中ドーズ ($5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$) では、熱処理初期に多量のドーズロスを生じるが、その後は単調に減少し続ける。そして、高ドーズ ($5 \times 10^{14}, 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) では、熱処理初期のドーズロス量は少ないが、長時間にわたってドーズロスが続く。

ドーズロス量の時間変化は、界面へのボロンの流入量とそこからの放出量の差によって決まるため、熱処理初期のドーズロス量の大小がその後の時間変化に大きな影響を与える。したがって、上記のドーズ量に依存した複雑なドーズロス量の時間変化を理解するためには、表面方向への異常拡散のメカニズムの解明が必要不可欠である。

3.3 界面捕獲ボロンの放出 ドーズ量が $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ の試料の熱処理温度を変化させ、シリコン / 酸化膜界面から放出されるボロンの活性化エネルギー E_a を見積

もった。その際、熱処理初期の異常拡散の影響を除くために、ドーズロス量の減少部分のみを指数関数でフィッティングし、減衰時定数を求めた (図3(a))。のアレニウスプロットから、 E_a は 2.6 eV であった (図3(b))。BF₂ を用いた実験では、界面からのボロン放出の活性化エネルギーはおおよそ 1.7 eV ⁽⁵⁾ と見積もられており、このエネルギーの差はフッ素の影響であると考えられる。

4. むすび

熱処理初期の表面方向へのボロンの異常拡散と多量のドーズロスとが密接に関連していることを初めて確認した。また、ドーズロス量の時間変化は注入ドーズ量に大きく依存し、低、中、高ドーズの3通りのパターンに分類できることを見出した。さらに、シリコン / 酸化膜界面からのボロン放出の活性化エネルギーは 2.6 eV であることが分かった。

(平成15年11月4日受付)

文 献

- (1) F. Lau, L. Mader, C. Mazure, Ch. Werner, and M. Orlowski: "A Model for Phosphorus Segregation at the Silicon-Silicon Dioxide Interface", *Appl. Phys. A*, Vol.49, pp.671-675 (1989)
- (2) 谷口研二: "シリコン中の不純物原子拡散", *応用物理*, **69**, 4, pp.427-434 (2000-4)
- (3) R. Duffy, V.C. Venezia, A. Heringa, T.W.T. Hüsken, M.J.P. Hopstaken, N.E.B. Cowern, P.B. Griffin, and C.C. Wang: "Boron uphill diffusion during ultrashallow junction formation", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.82, No.21, pp.3647-3649 (2003-5)
- (4) P.B. Griffin, S.W. Crowder, and J.M. Poate: "Dose loss in phosphorus implants due to transient diffusion and interface segregation", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.67, No.4, pp.482-484 (1995-7)
- (5) A. Shima, T. Jinbo, N. Natsuaki, J. Ushio, J.H. Oh, K. Ono, and M. Oshima: "A model for the segregation and pileup of boron at the SiO₂/Si interface during the formation of ultrashallow p^+ junctions", *J. Appl. Phys.*, Vol.89, No.6, pp.3458-3463 (2001-3)