

「シートコンピュータ実現のための軟X線照射によるBクラスタの低温活性化」

兵庫県立大学大学院工学研究科

部家 彰

1 研究の背景と目的

安全安心な長寿命社会に向けて、軽量・高性能・低消費電力のシートコンピュータ（遠隔治療（電子カルテ））や高効率発電システムの構築が求められている。このような半導体デバイス製造プロセスにおいて不純物原子（ドーパント）の活性化技術は不可欠であり、近年、さらなる高集積化を目指し、接合深さ X_j が 10nm 以下という極浅接合技術の開発が盛んに行われている（図 1）。

一般に B 原子を n 型 Si 基板にイオン注入した後、高温熱処理（900°C）することにより B 原子を Si の格子位置に移動させることで B を電氣的に活性化させる。しかし、この方法では、活性化と同時に B 原子が熱拡散してドーピング領域が広がり、極浅接合を形成できない。また、シートコンピュータ、フレキシブルディスプレイ、フレキシブル太陽電池では従来の Si 基板、ガラス基板に代わり、軽量・柔軟なプラスチック基板が用いられるようになるが、このような製品では、耐熱温度（200°C）以下での不純物原子の活性化技術の開発が求められている。

本研究では一般に高温（900°C）が不可欠な Si 基板中の B 不純物原子の活性化を 200°C の低温で実現する革新的半導体プロセス技術を創出する。具体的には NewSUBARU の高輝度軟 X 線源を用い、軟 X 線と物質との相互作用（低温活性化機構）を解明し、Si 原子および B 原子の内殻準位の電子を軟 X 線で励起し、原子移動を促進させることで低温でも効率よく B 原子を活性化させる技術を確立することを目的とする。

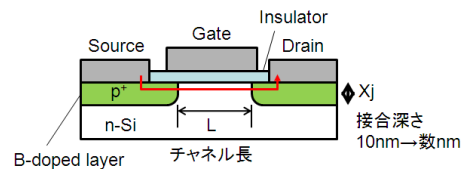


図 1 MOSFET の構造

チャンネル長 L を $1/k$ にしたときに接合深さ X_j も $1/k$ にする必要がある。この場合、集積度を k^2 倍に増加させることができる。

2 研究方法・研究内容

注入エネルギー 47.8 keV（B1 個当たり 4.5 keV）、ドーズ量 $6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 、入射角 0° の条件で $B_{10}H_{14}^+$ 注入された n 型 Si（100）基板（抵抗率 10~25 $\Omega \text{ cm}$ ）を用意した。比較のために、n 型 Si（100）基板に加速エネルギー 5 keV、注入量 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 、注入角 7° の条件で B 原子をイオン注入した試料も用意した。なお、どちらの試料も注入前の非晶質化処理は行っていない。

軟 X 線源として放射光施設 NewSUBARU のアンジュレータ光（BL07A）を用いた。軟 X 線照射時の試料の配置を図 2 に示す。試料として先の B 注入した Si 基板を 20 mm 角にカットした物を用いた。アンジュレータ長は 2.28 m、アンジュレータギャップ（SU gap）を変えることで、放出される光子のエネルギーを変更した。ただし、ビームライン中に分光器がないため、わずかに高次光も含まれている。蓄積リングの加速エネルギー 1.0 GeV、光子エネルギー 50~250 eV、蓄

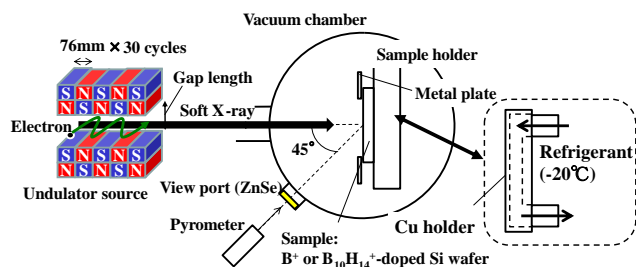


図 2 B 不純物の低温活性化に用いた NewSUBARU BL07A（アンジュレータ光源）の概略と試料の配置

積リング電流 300 mA、ドーズ量 50 mA・h (処理時間は 600 s) である。光子束密度は 3.8×10^{14} photons/s、軟 X 線照射中の真空度は 5×10^{-5} Pa 程度である。一部の試料は Cu 製試料ホルダに -20°C の冷媒を流すことで冷却を行った。

処理時の試料温度は ZnSe 製のぞき窓からサーモビューア (測定波長 7.5~13 μm) を用いて Si の放射率を文献値である放射率 0.6 で測定した。この測定温度の妥当性は熱電対をセラミックボンドで固定した Si 基板を用いて測定し、確認している。比較のため、電気炉 (窒素雰囲気) にて $100 \sim 800^\circ\text{C}$ で 900 s 熱処理した $\text{B}_{10}\text{H}_{14}^+$ 注入試料も作製した。軟 X 線照射もしくは熱処理した Si 基板は、5%HF 水溶液にて表面酸化膜を除去した後、4 探針法によりシート抵抗を室温にて測定した。探針には W を用い、各探針間の距離は 1 mm である。探針と試料との幾何学的配置による補正は行っていない。B の注入深さを 150 nm とし、抵抗率と不純物濃度との関係 (アービン曲線) とドーズ量から活性化率を求めた。

B 原子の拡散を調べるため、B 原子の深さ方向分布を、一次イオン O_2^+ 、加速電圧 3 kV、測定領域 $60 \mu\text{m} \Phi$ の条件で 2 次イオン質量分析 (SIMS) 測定した。

3 研究成果

シート抵抗と試料温度の光子エネルギー依存性を図 3 に示す。Si2p (99.8 eV)、Si2s (149.7 eV)、B1s (188 eV) のエネルギー準位も参考のため示した。シート抵抗値は 100 eV 付近で極小値を取った。フェルミの黄金律によると照射光子エネルギーが準位間のエネルギーに近づくにつれ、急激に電子の励起確率は増加する。このことからシート抵抗は光子エネルギーに依存し、Si2p エネルギー準位付近で極小値を示したと考えられる。このように軟 X 線照射活性化において、内殻電子の励起過程が重要であり、照射光子エネルギーと内殻電子のエネルギー準位との関係が重要なパラメータの 1 つであることが明らかとなった。シート抵抗の光子エネルギー依存性に関しては B^+ 注入の試料でも同様の結果が得られており、 B^+ 源のクラスタ化による差異は見られなかった。また、冷却ホルダを用いた場合、試料温度を 490°C から 140°C まで低減でき、シー

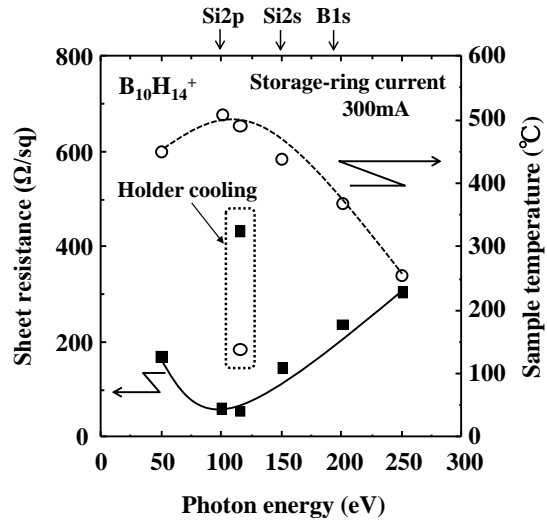


図 3 シート抵抗と試料温度の光子エネルギー依存性 未照射試料のシート抵抗は $880 \Omega/\text{sq}$ であり、軟 X 線照射によりシート抵抗が低減し、低温でも活性化が起こっていることが分かる。

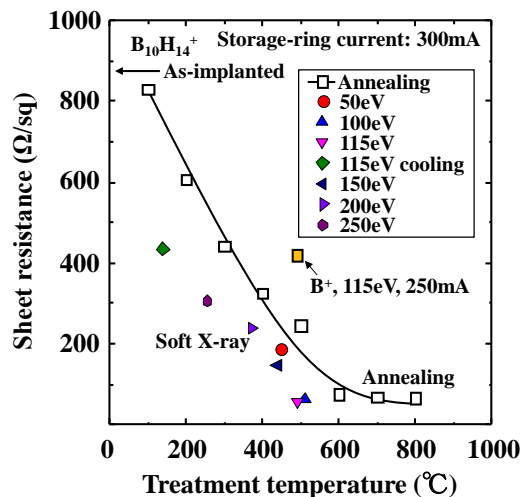


図 4 シート抵抗の処理時の温度依存性 比較のため、熱処理した試料のシート抵抗も示す。軟 X 線照射では 500°C 以下の領域で熱処理に比べ、シート抵抗の低下が確認できる。

ト抵抗は $430 \text{ } \Omega/\text{sq}$ と十分低くないが、イオン注入のみの試料のシート抵抗 ($880 \text{ } \Omega/\text{sq}$) よりも低抵抗となった。

ところで、図3に示したシート抵抗の光子エネルギー依存性において、光子エネルギー 200 eV は B_{1s} のエネルギー準位に対応し、B原子に優先的に影響を与えると考えられるが、 200 eV においてシート抵抗の顕著な低抵抗化は見られなかった。B原子の電子を励起しても、活性化が起こりにくいことから、B原子はSi原子よりも小さく、B原子が優先的に原子移動してもSiの格子位置が埋まっている (Si原子が動かない) 場合、格子位置のSiと置換することができないため、活性化できないと考えられる。Si中のBの活性化においては、まず、Siが原子移動を行い、その過程においてBのはじき出し (ノックオン効果) が起こり、Bが格子位置に置換できると予想される。

シート抵抗と試料温度との関係を図4に示す。比較のため、熱処理した試料のシート抵抗値も示した。熱処理試料では、処理温度が増加するにつれ、シート抵抗は減少したが、 100°C の熱処理ではシート抵抗の減少 (不純物の活性化) はほとんど起こらなかった。一方、軟X線照射した試料において、 500°C 以下で、熱処理と比較してシート抵抗の低減が確認された。このような傾向は B^+ 注入の試料でも同様の結果が得られており、 B^+ のクラスタ化による大きな差異は見られなかった。

ここで B^+ 注入と $B_{10}H_{14}^+$ 注入を比較する。B注入量は $B_{10}H_{14}^+$ の方が3倍多く、蓄積リング電流 (光子束密度) は1.2倍である。一方、シート抵抗は $B_{10}H_{14}^+$ で $55 \text{ } \Omega/\text{sq}$ 、 B^+ で $410 \text{ } \Omega/\text{sq}$ と $1/7$ に低減され、注入量・光子束密度を考慮しても、 $B_{10}H_{14}^+$ の方がシート抵抗をより低減できることが示された。これは $B_{10}H_{14}^+$ の方がSi表面をよりアモルファス化することができるため、その後の軟X線照射時の原子移動が促進されるためであると考えられる。

軟X線照射した試料のBの深さ方向分布を図5に示す。比較のため、高速熱処理 (RTA : 995°C 、 10 s) した試料のデータも示す。キャリア濃度 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ではRTAで 20 nm 拡散が見られるが、軟X線照射ではB拡散は見られなかった。 115 eV の照射条件では、処理時の温度は 490°C と低温でありながら、シート抵抗は $55 \text{ } \Omega/\text{sq}$ まで低減できており、活性化率は 36% となった。厚み 150 nm で 115 eV の軟X線は 95% 吸収される。表面から数 10 nm の領域を効果的に活性化できるため、余計な不純物拡散を抑制できると考えられる。

最後に軟X線照射による活性化機構について考察する (図6)。① Si_{2p} 準位の電子励起によりSi原子がイオン化する。②アモルファス層の構造の局所性と軟X線の面密度分布の局所性に起因したクーロン斥力が発生する。この斥力はイオン化した原子間距離の2乗に反比例するため、最近隣のSi原子が電子励起されることで、より大きな斥力が発生すると考えられる。③そのクーロン斥力・X線照射による局所格子振動の合成により、Siの原子移動が促進され、イオン注入時に導入されたダメージの回復と共にSi移動に伴うB原子のノックオン効果によるB原子のSi置換位置への移動が起こる。この場合、低温でもシート抵抗の低減が生じると考えられる。低温領域でのシート抵抗の低減はSiダメージ層の結晶性回復で説明されるため、軟X線照射では主にSi原子移動促進による結晶性回復が起こっていると考えられる。低温領域の顕

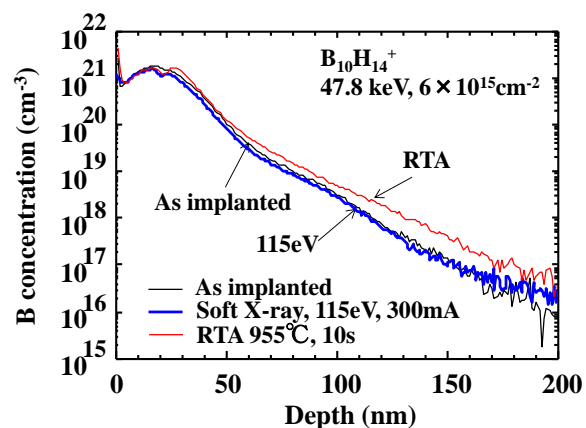


図5 Bの深さ方向分布 RTA処理ではBが基板内部に拡散しているが、軟X線照射では照射前と比較してもB分布に変化は見られず、拡散は起こっていない。

著な結晶性回復が $B_{10}H_{14}^+$ 注入試料ではより促進されるため、より低抵抗化が起こったと考えられる。

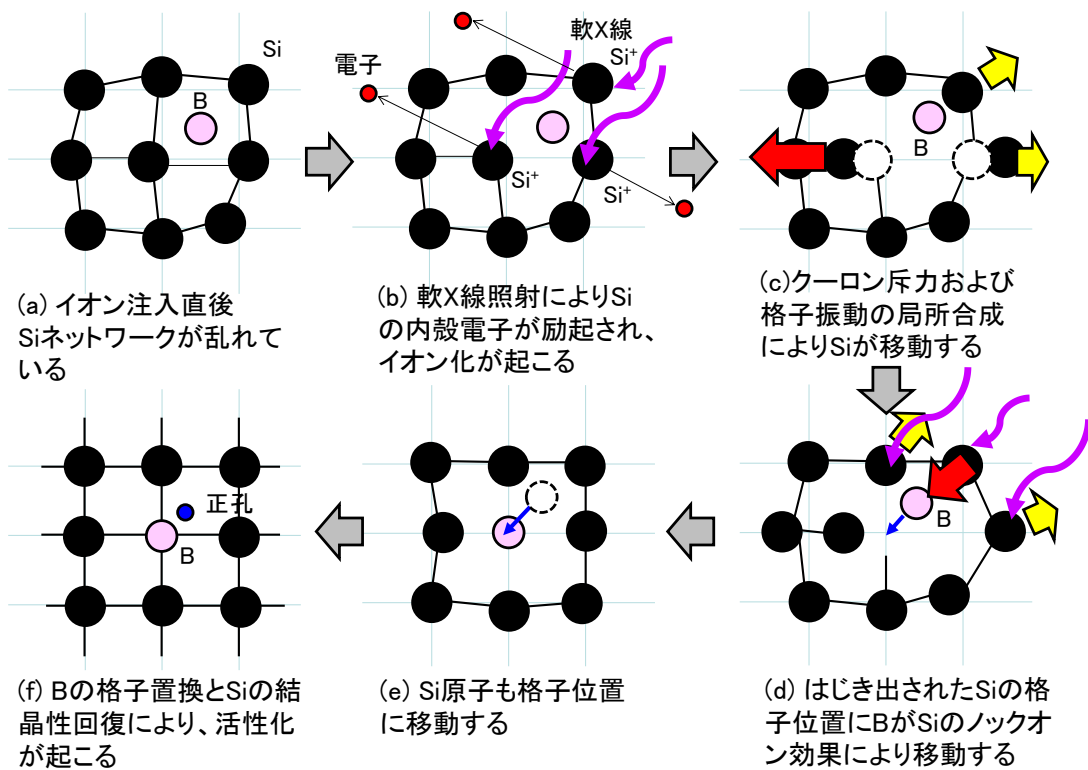


図 6 軟 X 線照射による Si 中の B 原子の低温活性化機構

4 生活や産業への貢献および波及効果

高輝度軟 X 線源の小型化、低コスト化という課題があるが、本技術はシートコンピュータ実現の要素技術として有益であり、軽量・高性能・低消費電力のシートコンピュータによる安全安心な長寿命社会の実現が期待できる。

また、従来技術とは異なり、熱エネルギーを用いていないため、プロセスの低温化が期待でき、高輝度軟 X 線照射による低温活性化は、次世代半導体プロセスとしての発展や新たな学問分野を開拓する可能性を秘めている。