

氏 名 中川聰子

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大甲第 1134 号

学位授与の日付 平成 20 年 3 月 19 日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 電子線照射発光活性化法による極薄 SOI 層中軽元素不純物の評価

論文審査委員 主 査 准教授 田島 道夫(JAXA 宇宙科学
研究本部)
准教授 廣瀬 和之
准教授 稲富 裕光
准教授 戸田 知朗
准教授 村上 浩(JAXA 宇宙科学
研究本部)

Silicon-on-insulator (SOI) wafers have begun to be used as substrates of large-scale integrated circuits (LSIs) for high speed and low power applications. The SOI structure consists of a top silicon layer, a buried oxide (BOX) layer, and a silicon substrate. The thickness of the top silicon layer of the SOI wafers required for metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (MOSFET) devices is on the order of 30-200 nm. Defect control for the thin top silicon layer is very important, where the light element impurities play a key role. Oxygen and carbon are main light element impurities included unintentionally in silicon crystals. Oxygen impurities in silicon crystals promote mechanical strength but lead to oxygen microprecipitates after annealing. Carbon impurities act as nucleation sites for oxygen precipitation in the gettering process of LSI production and the carbon impurities precipitate in dislocation loop formation. A quantitative analysis is required for determining these light element impurities in the top silicon layer of SOI wafers. However, the characterization of these impurities in the top silicon layer is lagging because of the difficulty in measuring their concentrations in ultrathin layers.

In this study we report on detection of the light element impurities after electron irradiation by photoluminescence (PL) spectroscopy. Irradiation with electrons, protons, or other high-energy particles induces defects that involve light element impurities and emit strong luminescence. There are two well-known radiative defects: the complex of interstitial carbon and interstitial oxygen which induces the C-line at 0.79 eV and that of interstitial carbon and substitutional carbon which induces the G-line at 0.97 eV. The ultraviolet (UV) excitation enables us to detect these lines from the ultrathin top silicon layer of a SOI wafer because of the shallow penetration depth of UV light and the confinement effect of photo-excited carriers in the top silicon layer.

Various commercial SOI wafers (thicknesses of top silicon layers: 60 - 200 nm) were irradiated with 1 MeV electrons by a fluence ranging from 3×10^{16} to 1×10^{17} electrons/cm² for luminescence activation of light element impurities. We detected the C-line and the G-line from all the samples under the UV light excitation. That demonstrates the presence of oxygen and carbon in the top silicon layers. To the best of my knowledge this is the first report on detection of carbon and oxygen impurities in the ultrathin top silicon layer.

As yet we have not observed differences in crystalline quality depending on the SOI wafer fabrication methods. We compared PL spectra under the UV light excitation from UNIBOND, SIMOX, and ELTRAN wafers fabricated in 2002 to find out differences in concentration of the light element impurities. We observed substantial differences in the intensity of the C-line and the G-line among these wafers. The variation in the intensity of the C-line and the G-line reflects the carbon and oxygen concentrations. We also found variation in concentrations of these light element impurities in a wafer.

In order to verify that the PL signal under the UV light excitation does not come from the silicon substrate, we implanted xenon ion solely in the top silicon layer by adjusting the accelerating voltage to 50 keV. Although we detected the luminescent activated centers, such as the C-line, under the UV light excitation with a penetration depth of 10 nm, we did not detect the centers

under the visible light excitation with a penetration depth of 3 μm . This confirmed that PL under UV light excitation detects the C-line not from the substrate but from the top silicon layer.

We confirmed the repeatability of this method. Several SOI wafers were separately irradiated with electrons and separately measured by PL spectroscopy under the same conditions. The spectral shape in terms of the relative intensity between the C-line, G-line, and bound exciton line was almost the same for the separate measurements.

We estimated detection limit of our PL measurement for carbon impurities in bulk silicon wafers. We measured the intensity ratios of the C-line and the G-line to the free exciton (FE) line for bulk silicon wafers whose carbon impurity concentration had been determined to be from 1×10^{15} to 3×10^{16} atoms/cm³ by FT-IR. The quantitative relationships between the intensity ratios (I_{PL}) and the carbon concentration ($[C]$) were expressed as $I_{PL} \propto [C]^n$. We estimated the detection limit to be on the order of 10^{12} atoms/cm³ by taking the signal-to-noise ratio into consideration. The detection limit of the carbon impurity in the top silicon layers is supposed to be on the order of 10^{14} atoms/cm³ because the thickness of the top silicon layers is two orders of magnitude smaller than the penetration depth of the excitation light. This number is large enough for measuring carbon impurity with practical concentration. Therefore our PL measurement has sufficient accuracy to determine the carbon impurities in the top silicon layers quantitatively.

In conclusion, we revealed that differences in the impurity concentration depending on the wafer fabrication methods and variations of the impurity concentration depending on the location of the wafers. Luminescence activation using electron irradiation with PL measurement under the UV light excitation is a very promising tool for the evaluating the light element impurities in the top silicon layer of SOI wafers.

SOI (Silicon-on-insulator) デバイスは高速、低消費電力、高集積などの利点を持つことから次世代電子デバイスとして期待されており、その基板となる SOI ウエハーの高品質化が求められている。JAXA では 2002 年に top Si 層、埋め込み酸化膜層、シリコン基板からなる SOI 構造を採用した耐放射線強化部品”128Kbit-SRAM (static random access memory)”が開発された。これは、静止軌道上でのソフトウェア発生率が 9000 年に 1 度という極めて低い部品である。現在では宇宙用だけではなく一般的にも SOI 構造の利用が進み、SOI ウエハーはノートパソコンやモバイル機器用のチップなどに実用化されつつある。このような動きはあるものの、SOI を更に一般的に用いる動きを高めるには、多くの課題が残されている。この一つに、製法が複雑であり、シリコンに比べて価格が高いことが挙げられる。また、SOI ウエハーは数十～数百 nm の薄膜の top Si 層を持つためその評価が困難であり、歩留まりに代表されるウエハーの信頼性評価が十分に行なえていないことが挙げられる。高品質なウエハーを得るためには、結晶中の不純物・欠陥の制御が重要である。その中でも特に欠陥形成に大きな影響を与える酸素、炭素、水素、窒素等の軽元素不純物制御が重要視されている。通常シリコンウエハーの軽元素不純物の定量評価では、一般的に赤外吸収法が利用されているが、この手法を top Si 層の評価に用いることはできないため、新たな評価法の確立が求められている。そこで、本出願論文では top Si 層の軽元素不純物の評価法を提案するとともに、定量化に向けた取り組みを行なった。

出願者は、これまでに報告がある紫外光を励起光源として用いた PL (photoluminescence) 法による top Si 層の結晶性評価と、放射線による軽元素不純物の発光活性化法によるシリコン結晶の定量評価に注目した。そして、これらの手法を組み合わせることで top Si 層に含まれる軽元素不純物評価を試みた。その結果、top Si 層中の酸素、炭素不純物の存在を表す発光線を検出することに成功した。これは、top Si 層中の軽元素評価を行なった初めての報告である。軽元素の評価が可能であることがわかったため、出願者は top Si 層の評価に最適な電子線照射量を決定し、通常厚さのシリコン結晶よりも少ない照射量が適していることを示した。そして、この照射量を用い、各製法による SOI ウエハーの評価を行ない、製法により酸素や炭素の濃度が異なることや不純物が不均一に分布している場合があることを示した。SOI ウエハーはシリコンウエハーをドナーウエハーに用いている。そのため、シリコン基板と top Si 層の性質には差がないと考えられていたが、実際には top Si 層とシリコン基板で含まれる炭素、酸素濃度が異なる場合があることを示した。このことは、top Si 層の評価が重要であることの裏付けとなった。top Si 層の評価を行なう際、シリコン基板ではなく top Si 層のみの評価が行なえているかを明確にする必要がある。これは、電子線照射では top Si 層とシリコン基板の両者を発光活性化してしまうため、得られるスペクトルが類似している場合にどの層を評価しているかの判断ができないためである。そこで、発光活性化領域を加速電圧により制御することで top Si 層のみを発光活性化させる実験により、紫外光励起では top Si 層のみを評価していることを確認した。

以上の検討は放射線照射発光活性化による紫外光励起 PL スペクトル測定が SOI ウエハーの top Si 層評価に有効であることを示している。続いて本手法の実用化に向け、再現性や最適な照射種の検討を行なった。その結果、再現性は十分であることを確認し、照射種としては電子線が最も優れていることがわかった。また、定量化に向けた取り組みとして、定量法として既に確立している赤外吸収法と組み合わせた評価を行なうため、測定対象をバルクシリコンウエハーとして低濃度領域の炭素の定量を試みた。その結果、モデルに基づく理論計算により PL 強度から推定した炭素濃度値は赤外吸収測定で得られた値とほぼ一致することが示された。また PL 強度測定のノイズレベルより、PL 法の炭素の検出限界

は 10^{12} atoms/cm³ と見積もられた。これは、赤外吸収法での検出限界値より 2桁以上低く、本手法が top Si 層の評価だけでなく、低炭素濃度シリコンウエハーの評価法としても優れていることを示している。このように低濃度な炭素の検出が可能であることから、top Si 層の定量法としても十分に対応できると考えられる。

以上のように、本研究では電子線照射発光活性化法と紫外光励起 PL スペクトル測定法を併用した SOI ウエハーの top Si 層中に含まれる軽元素評価法を提案し、その有効性を実証するとともに定量化の可能性を示した。これは従来行うことのできなかつた極薄の top Si 層中の軽元素不純物を評価した最初の報告であり、SOI ウエハーの品質向上ならびに信頼性向上に大きく貢献するものである。また、シリコンバルクウエハーにおいても炭素不純物の検出限界を著しく向上させたことは、低濃度領域での高精度な炭素不純物制御を可能とする等、シリコンウエハーの品質向上に大きく寄与するものである。よって申請された論文が博士学位論文としてふさわしい水準にあると判断した。