

電子線照射発光活性化 PL 法における Si 結晶中炭素の検出下限 Detection Limit of Carbon in Si for Photoluminescence after Electron Irradiation

明治大理工¹, 再生可能エネルギー研究インスティテュート²

○佐竹 雄太¹, 田島 道夫², 朝原 将太¹, 小椋 厚志^{1,2}

Meiji Univ.¹, Meiji Renewable Energy Laboratory²

○Yuta Satake¹, Michio Tajima², Shota Asahara¹, Atsushi Ogura^{1,2}

E-mail: ce201023@meiji.ac.jp

【序】IGBT 等の Si パワーデバイスの高性能化に伴い、Si ウェーハの高品質化の妨げとなる微量残留炭素不純物の高感度・高精度の定量評価が要求されている。この状況下で、電子線照射によって誘起される G-line(C_i-C_s 起因)のフォトルミネッセンス(PL)を利用する手法が注目され、標準化が図られている¹⁾。本報告では、PL 測定の前積算時間・試料温度・励起光強度を変化させ、この手法の炭素濃度の検出下限を検討した。

【測定方法】測定には、電子線(加速電圧: 2 MeV, 線量: $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$)を照射して発光活性化させた 2 種類の n 型 MCZ-Si ウェーハを使用した。炭素濃度と抵抗率は、それぞれ、 $1.4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $70 \Omega \cdot \text{cm}$ (試料#1), $9 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $25 \Omega \cdot \text{cm}$ (試料#2)である。4.2~100 K において DPSS レーザー照射下(波長: 532 nm, ビーム径: 約 2.3 mm)で励起光強度を 2~200 mW の範囲で変化させ、InGaAs ダイオードアレイにより PL 光を検出した。長時間露光によるカウント数のオーバーフローを防ぎつつ安定性を保つため、短時間に区切って G-line と I_{TO}(FE)線を交互に測定し、その都度バックグラウンドを測定した。

【測定結果】試料#1 に対して JIS 規格²⁾に準じた測定条件(試料温度 $T=4.2 \text{ K}$ ・励起光強度 $L=50 \text{ mW}$ ・波長分解能 $\Delta\lambda=0.26 \text{ nm}$)で測定したスペクトルを Fig. 1 に示す。本報告では、図に示す雑音強度 N , G-line の信号強度 S に対して、 $S/N=2$ を検出限界と定義する。

積算時間延長に伴う G-line の信号対雑音比(S/N)の変化を Fig. 2 に示す。積算時間の平方根に比例して S/N が向上しているため、不規則性雑音が支配的である。10000 秒まで積算しても同関係が確認されており、時間対効果を考慮すると 1 時間程度の積算が妥当である。低炭素濃度領域では G-line 強度が炭素濃度の 2 乗に比例する関係¹⁾から検出下限炭素濃度を算出すると、1 時間の積算で約 $4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ であった。

また、試料#2 に対して $L=50 \text{ mW}$ ・ $\Delta\lambda=0.92 \text{ nm}$ で測定した G-line および濃度指標となる G-line 強度比の分母 I_{TO} の強度の温度依存性(14~100 K)を Fig. 3 に示す。I_{TO} 強度は温度とともに単調に減少するが、G-line 強度は 30 K 程度で最も強くなる。図中の破線はこの結果から推定した炭素濃度が $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ の場合の G-line 強度の温度変化である。このような低濃度領域では G-line は極めて低強度となるため、高温化による I_{TO} の強度減少を考慮しても 30 K 程度の測定温度が適していることがわかる。30 K では 1 時間の積算で約 $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ まで検出可能となる。更に、G-line の励起光強度依存性は温度によらず概ね線形特性であったため、励起光強度を 50 mW から 150 mW に増加させ、30 K で 1 時間積算すると検出下限は約 $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ まで低減できる。4.2 K・高励起光強度下では電子正孔液滴発光が顕在化し、特に低分解能では各強度を読み取る際の妨害となるが、同発光は臨界温度 25 K で消滅するため、その影響はない。

以上より、JIS 規格に準じた測定条件($T=4.2 \text{ K}$ ・ $L=50 \text{ mW}$ ・ $\Delta\lambda=0.26 \text{ nm}$)で 1 時間積算すると PL 法の検出下限炭素濃度は約 $4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ まで向上され、 $T=30 \text{ K}$ ・ $L=150 \text{ mW}$ ・ $\Delta\lambda=0.92 \text{ nm}$ とすると、同積算時間で約 $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ まで向上可能であることを示した。

1) M. Tajima *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys. **59**, SGGK05 (2020).

2) JIS H 0615 (1996) [in Japanese].

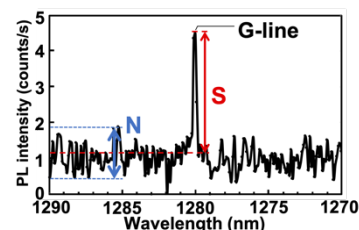


Fig. 1. PL spectrum at 4.2 K of G-line from MCZ-Si (sample #1, $[C]=1.4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) after 2 MeV electron irradiation.

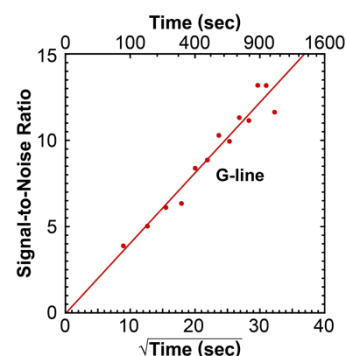


Fig. 2. Variation of S/N for G-line from sample #1 with integration time at 4.2 K. ($L=50 \text{ mW}$)

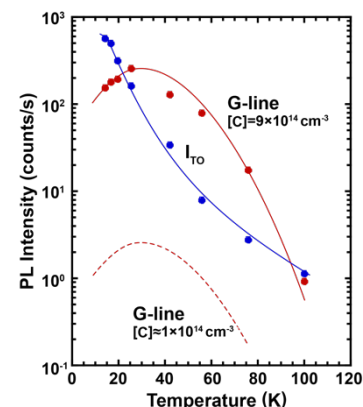


Fig. 3. Temperature dependence of intensities of G-line and I_{TO} from sample #2 at 4.2 K. ($L=50 \text{ mW}$)