

電子線照射 Si 結晶中の C_iO_i 欠陥準位からの自由電子-束縛正孔発光 Free-to-bound emission from C_iO_i defects in electron-irradiated Si

明治大¹, NPERC-J², °田島 道夫^{1,2}, 朝原 将太¹, 佐竹 雄太¹, 小椋 厚志¹
Meiji Univ.¹, NPERC-J², °Michio Tajima^{1,2}, Shota Asahara¹, Yuta Satake¹, Atsushi Ogura¹
E-mail: tajima@meiji.ac.jp, tajima@nperc-j.or.jp

【序】 電子線照射した Si 結晶の低温フォトルミネッセンス(PL)で 0.790 eV に現れる C-line 発光線は、最も詳細に研究された発光線の一つであり、格子間炭素-酸素(C_iO_i)欠陥に由来する。この欠陥は再結合センターとして働き、キャリアライフタイムを低減させるため、C-line の検出は、宇宙用太陽電池の劣化、ドライエッチングおよびイオン注入時の損傷等の診断に用いられてきた。また IGBT パワーデバイスでは、この欠陥再結合を利用したライフタイム制御が行われている。さらに最近では、C-line に着目した微量炭素定量も試みられている。我々は、170 K 以上で C-line に代わって現れる 0.8 eV 付近の広い発光帯(C08-band)に焦点を当て、室温での炭素評価の可能性を検討した¹⁾。しかし、同発光帯の低エネルギー側の形状が未知であったため、その起源は不明であった。本報告では、従来よりも低エネルギーまで感度を有する測定系の使用により C08-band の全体形状を決定し、その発光起源を同定した²⁾。

【実験方法】 これまでの実験に使用した最も典型的な MCZ 結晶について、電子線照射後(2 MeV, $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$)に 4.2-300 K において PL 測定を行った。検出には、従来からの感度が波長 1.7 μm までの高感度 InGaAs ダイオードアレイに加えて、2.2 μm まで感度を持つ広帯域 InGaAs ダイオードアレイを使用した。後者のダークノイズは前者の約 500 倍であり、雑音低減に留意した。

【結果と考察】 図 1(a)は 14 K において観測される C-line で、図 2(a)に示すように、 C_iO_i に強く束縛された正孔と有効質量様擬ドナーに弱く捕らえられた電子の励起子様の発光再結合である。室温ではこの電子が熱解離し、自由電子-束縛正孔発光が生じると推定した[図 2(b)]。その場合、発光帯形状は Maxwell-Boltzmann 型となる。この発光は、零フォノン線に加えて運動量保存のためのフォノン(TA, LA, TO)および局在モードフォノン(L)の放出(図 1(c)の-記号)および吸収(+記号)を伴う遷移によるフォノンサイドバンド(色線)で構成される。これらを、経験的な係数を付与して線形結合した理論スペクトルが図 1(c)の黒線である。今回、図 1(b)に示すように室温での C08-band の全体形状が決定された。ピーク位置は理論値の 0.77 eV と一致し、発光形状も概ね同様であり、この発光(C08-band)が自由電子-束縛正孔発光と同定された。

今回得られた知見は、Si 中の欠陥物理の基礎的理解を深めるとともに、デバイスの品質評価・管理にも応用できると期待される。

【謝辞】 C_iO_i 欠陥の発光機構に関し有益な討論・コメントを頂いた Klaus Thonke 教授, Ivan Pelant 教授に感謝致します。

- 1) 田島道夫, 小椋厚志: 応用物理 **87**, 655 (2018).
- 2) M. Tajima et al.: Appl. Phys. Express **14**, 011006 (2021).

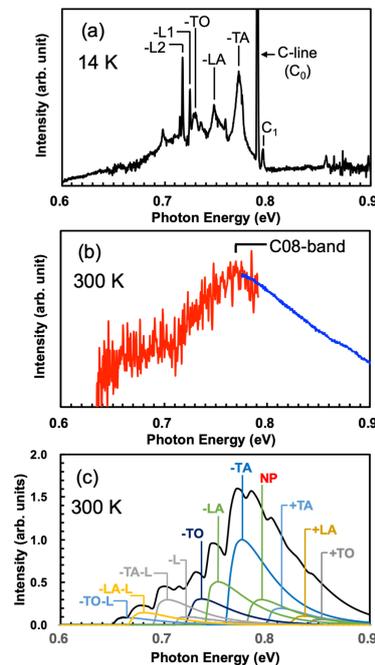


Fig. 1. PL spectra of (a) C-line at 14 K and (b) C08-band at 300 K of MCZ-Si after 2 MeV e irradiation. (c) Calculated spectra of phonon sidebands with Maxwell-Boltzmann shape (colored lines), and simulated C08-band (black line) obtained as the sum of the phonon sidebands.

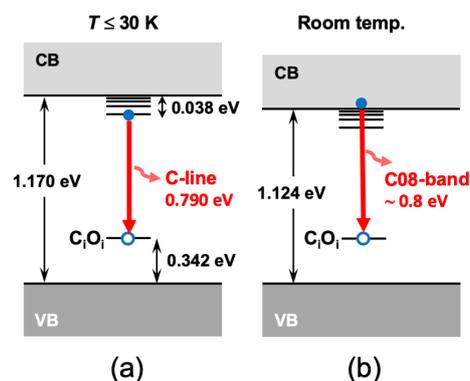


Fig. 2. Schematic illustration of radiative recombination mechanism at C_iO_i defect: (a) C-line at $T \leq 30 \text{ K}$ and (b) C08-band at room temperature.