

Кінетика релаксації світло індукованих процесів

Експериментальні дослідження проводилися на сонячному елементі дифузійно-польового типу 05_351_1.

Проведено дослідження кінетики струму короткого замикання при монохроматичному освітленні інфрачервоним діодом з довжиною хвилі $\lambda = 940$ нм. Вимірювання проводилися після опромінення зразка галогеновою лампою (світлова потужність близько 250 мВт) на протязі 10 с.

При апроксимації отриманої залежності вважалося, що величина струму короткого замикання може бути описана виразом

$$I_{sc} = N_{ph} \frac{\alpha L}{1 + \alpha L},$$

де

$\alpha = \alpha(T, \lambda)$ – коефіцієнт поглинання, для розрахунку величини якого в залежності від температури та довжини хвилі якого використовувався вираз, наведений в [1],

N_{ph} – кількість падаючих фотонів:

$$N_{ph} = \frac{W_{ph}(1 - R)q\beta\lambda}{hc},$$

W_{ph} – світлова потужність,

R – коефіцієнт відбиття (в розрахунках вважалося $R = 1$),

β – коефіцієнт квантового виходу (вважалося $\beta = 1$)

L – довжина дифузії неосновних носіїв заряду:

$$L = \sqrt{D\tau} = \sqrt{\frac{\mu kT}{q}} \tau,$$

μ – рухливість носіїв, обчислювалась за теорією Klaassen [2]

τ – час життя неосновних носіїв заряду, для оцінки якого виокремлювалися міжзонна рекомбінація, Оже-процеси, рекомбінація Шоклі-Ріда-Хола на міжвузольних атомах заліза Fe_i та на парах FeB , а решта можливих рекомбінаційних каналів описувалися узагальненим часом τ_{rest} :

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{BtB}} + \frac{1}{\tau_{Auger}} + \frac{1}{\tau_{Fei}} + \frac{1}{\tau_{FeB}} + \frac{1}{\tau_{rest}},$$

τ_{BtB} – час життя, пов'язаний з випромінювальною міжзонною рекомбінацією,

$$\tau_{BtB} = \frac{1}{B(N_A + n_0 + \Delta n)},$$

N_A – рівень легування p-області,

n_0 – рівноважна концентрація неосновних носіїв в базі SE,

Δn – концентрація нерівноважних носіїв,

B – рекомбінаційний коефіцієнт, температурна залежність якого обчислювалась з використанням даних [3]

τ_{Auger} – час життя, пов'язаний з Оже-процесами

$$\tau_{Auger} = \frac{1}{C_p N_A^2},$$

для оцінки коефіцієнта рекомбінації використовувався вираз [4]

$$C_p(T) = (7,91 \cdot 10^{-44} - 4,13 \cdot 10^{-47} T + 3,59 \cdot 10^{-49} T^2) \times \\ \left(1 + (564812 \cdot T^{-1.6545} - 1) \left(1 - \tanh \left[\left\{ \frac{p}{5 \cdot 10^{22}} \right\}^{0,29} \right] \right) \right)$$

Час життя, пов'язаний з процесами ШРХ описувався виразом

$$\tau_{SRH} = \frac{\tau_{p0}(n + n_1 + \Delta n) + \tau_{n0}(N_A + p_1 + \Delta n)}{N_A + n + \Delta n}$$

де

$$n_1 = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_d}{kT}\right), \quad p_1 = N_V \exp\left(-\frac{E_d - E_V}{kT}\right)$$

E_d – енергетичне положення рівня, пов'язаного з дефектом,

для Fe_i $E_d = E_V + 0,394$ eV

для FeV $E_d = E_C - 0,26$ eV;

розрахунок ефективних густин станів поблизу границь дозволених зон відбувався з використанням виразів, запропонованих в [5];

$$\tau_{n0} = \frac{1}{N_d \sigma_n v_{th,n}}, \quad \tau_{p0} = \frac{1}{N_d \sigma_p v_{th,p}}$$

теплові швидкості носіїв обчислювалися відповідно до [6],

σ_n та σ_p – поперечні перерізи захоплення електронів та дірок, відповідно до [7]

$$\text{для } Fe_i \quad \sigma_{n,Fe} = 3,47 \cdot 10^{-15} T^{-1,48} \text{ (м}^2\text{)}; \quad \sigma_{p,Fe} = 4,54 \cdot 10^{-20} \exp\left(-\frac{0,05}{kT}\right) \text{ (м}^2\text{)}.$$

$$\text{для } FeV \quad \sigma_{n,FeB} = 5,1 \cdot 10^{-13} T^{-2,5} \text{ (м}^2\text{)}; \quad \sigma_{p,FeB} = 3,32 \cdot 10^{-14} \exp\left(-\frac{0,262}{kT}\right) \text{ (м}^2\text{)};$$

N_d – концентрація дефектів,

вважалось, що часова залежність концентрації міжвузольних атомів заліза описується виразом [8]

$$N_{Fe}(t) = (N_{Fe,All} - N_{Fe,eq}) \exp(-At) + N_{Fe,eq},$$

де

$N_{Fe,All}$ – загальна концентрація домішковий атомів заліза в кристалі (кількість міжвузольних зразу після інтенсивного освітлення),

$N_{Fe,eq}$ – концентрація міжвузольних атомів заліза в рівновазі (після тривалого перебування у темряві)

$$N_{Fe,eq} = \frac{N_{Fe,All}}{\left[1 + N_A 10^{-23} \exp\left(\frac{0.582}{kT}\right)\right] \left[1 + \exp\left(\frac{E_F - 0.394}{kT}\right)\right]},$$

$$A = 1.3 \cdot 10^{-3} N_A^{2/3} \exp\left(-\frac{E_m}{kT}\right),$$

де E_m – енергія міграції міжвузольних атомів заліза (в літературі 0.68 eV)

В свою чергу, часова залежність концентрації пар

$$N_{FeB}(t) = N_{Fe,All} - N_{Fe}(t).$$

При апроксимації відповідно до комплексу наведених вище формул, вважалося, що $\Delta n = 0$ (режим короткого замикання), як шукані параметри розглядалися величини W_{ph} , τ_{rest} , $N_{Fe,All}$ та E_m . Результати вимірів та апроксимації при двох температурах наведені на рисунку.

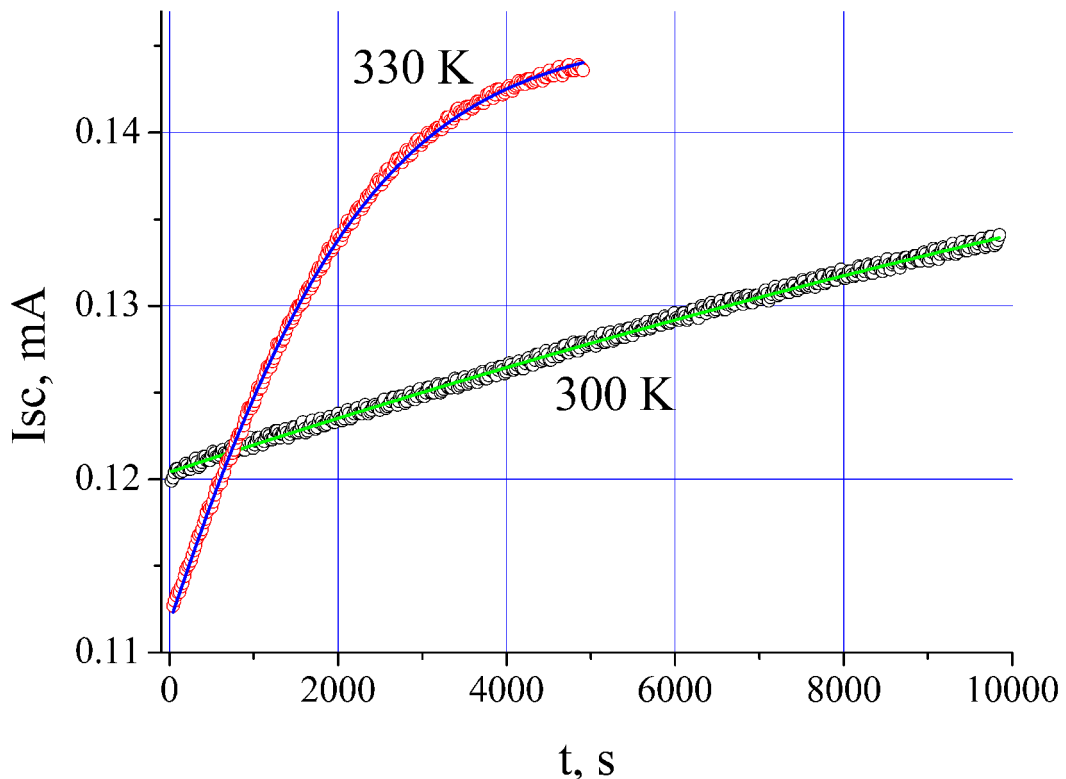


Рис. 1. Кінетика релаксації струму короткого замикання після інтенсивного освітлення при різних температурах. Точки – експеримент, лінії – апроксимація.

Найпозитивнішим моментом є те, що отримана в результаті апроксимації величина E_m дорівнює 0,68 еВ (співпадає з літературними даними), що підтверджує те, що спостережені процеси пов'язані з перебуваю Fe_i->FeV

Використані джерела

1. Solar Cells. Materials, Manufacture and Operation / Ed. by Augustin McEvoy, Tom Markvart, Luis Castaner. — Second edition. — Oxford: Academic Press, 2013. — 641 pp.
2. D. B. M. KLAASSEN «A unified mobility model for device simulation-- I. Model equations and concentration dependence», Solid-State Electronics Vol. 35, No. 7, pp. 953- 959, 1992
3. Hieu T. Nguyen, Simeon C. Baker-Finch, and Daniel Macdonald, «Temperature dependence of the radiative recombination coefficient in crystalline silicon from spectral photoluminescence», Applied Physics Letters, 104, 112105 (2014), <http://dx.doi.org/10.1063/1.4869295>
4. Pietro P. Altermatt, Jan Schmidt, Gernot Heiser, Armin G. Aberle «Assessment and parameterisation of Coulomb-enhanced Auger recombination coefficients in lowly injected crystalline silicon», J. Appl. Phys. 82 (10), 15 November 1997, pp.4938-4944.
5. Romain Couderc, Mohamed Amara, and Mustapha Lemiti «Reassessment of the intrinsic carrier density temperature dependence in crystalline silicon», Journal of Applied Physics 115, 093705 (2014), <http://dx.doi.org/10.1063/1.4867776>
6. Green M. A. Intrinsic concentration, effective densities of states, and effective mass in silicon / M.A. Green // J. Appl. Phys.. – 1990. – Vol. 67. – P. 2944-2954.
7. Fiacre E. Rougieux, Chang Sun, Daniel Macdonal «Determining the charge states and capture mechanisms of defects in silicon through accurate recombination analyses: A review» Solar Energy Materials and Solar Cells 187 (2018) 263–272, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.07.029>
8. Journal of Applied Physics 110, 053713 (2011)