

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 2

РОЗРАХУНОК НЕРІВНОВАЖНИХ НОСІЇВ ЗАРЯДУ В НАПІВПРОВІДНИКАХ

Мета роботи: визначення електрофізичних характеристик нерівноважних носіїв заряду.

Теоретичні відомості

При будь-якій температурі, відмінній від абсолютного нуля, в напівпровіднику за рахунок теплового збудження виникає генерація вільних електронів та дірок. Якщо б цей процес був би єдиним, то концентрація носіїв заряду неперервно б зростала протягом деякого часу до повної іонізації атомів. Але одночасно з процесом генерації протікає процес рекомбінації носіїв заряду. Між цими двома процесами встановлюється рівновага, якій відповідає рівноважна концентрація електронів та дірок. Тільки до рівноважних концентрацій застосовується закон «діючих мас» для носіїв заряду. Нерівноважний стан виникає під впливом будь-якого зовнішнього фактора, що приводить до зміни концентрації носіїв заряду. Такими факторами можуть бути, наприклад, неоднорідне нагрівання, дія світла, механічна напруга, корпускулярні потоки (електрони, протони, нейтрони тощо), інтенсивні електричні поля, що приводять до тунельного ефекту та лавинного пробоя, дефекти, легувальні домішки, різниця потенціалів на контактах метал – напівпровідник та *p-n* переходах.

Часом життя нерівноважних носіїв заряду називають відношення надлишкової концентрації (Δn або Δp) нерівноважних носіїв заряду до швидкості зміни цієї концентрації внаслідок рекомбінації:

$$\tau_n = \frac{|\Delta n|}{|d(\Delta n) / dt|}; \quad \tau_p = \frac{|\Delta p|}{|d(\Delta p) / dt|}. \quad (5.1)$$

Поява нерівноважних носіїв заряду не викликає істотної зміни концентрації основних носіїв заряду. В цих умовах швидкість рекомбінації пропорційна надлишковій концентрації неосновних носіїв, а час життя не змінюється при зміні надлишкової концентрації носіїв заряду. Таку рекомбінацію називають лінійною. Час життя визначається кількістю та типом пасток, тому він є чутливою характеристикою хімічної чистоти та структурної досконалості напівпровідникового матеріалу. У власному напівпровіднику час життя нерівноважних носіїв заряду є максимальним.

В реальних напівпровідниках час життя нерівноважних носіїв заряду може становити $10^{-2} \div 10^{-10}$ с.

Дифузійна довжина – це відстань, на якій в однорідному напівпровіднику при одновимірній дифузії за відсутності електричних та магнітних полів надлишкова концентрація носіїв заряду зменшується внаслідок рекомбінації в e раз, тобто – це середня відстань, на якій носій дифундує за час життя. Дифузійна довжина визначається за виразом:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}, \quad L_p = \sqrt{D_p \tau_p}, \quad (5.2)$$

де D – коефіцієнт дифузії носіїв заряду відповідного типу, який обчислюється за виразами:

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n, \quad (5.3)$$

$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p. \quad (5.4)$$

Для германію $\tau \approx 10 \div 500$ мкс, $L \approx 0,2 \div 3$

мм, для кремнію вони менші. Чим менше домішок та дефектів в напівпровіднику, тим більший час життя і, відповідно, дифузійна довжина нерівноважних носіїв заряду.

Приклад розв'язування задач

Обчисліть дифузійну довжину дірок в германії n -типу, якщо час життя неосновних носіїв заряду $\tau_p = 10^{-4}$ с, а коефіцієнт дифузії $D_p = 4,8 \cdot 10^{-3}$ м²/с.

Розв'язування.

Дифузійна довжина визначається за виразом:

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} ;$$

$$L_p = \sqrt{4,8 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-4}} = 0,693 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Відповідь: дифузійна довжина дірок в германії n -типу дорівнює 0,693 мм.

Задачі для самостійного розв'язування

Задача 1. Обчисліть час життя та рухливість електронів в германії при температурі 300 К, якщо дифузійна довжина електронів $L_n = 1,5$ мм, коефіцієнт дифузії $D_n = 9,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$.

Задача 2. Обчисліть дифузійну довжину та коефіцієнт дифузії дірок в кремнії при кімнатній температурі, якщо час життя дірок 400 мкс, а їх рухливість $0,05 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Задача 3. Час життя неосновних носіїв у полікристалічному германії, який очищено за методом направленої кристалізації дорівнює 5 мкс, а в монокристалі, який отримано методом витягання з розплаву – 300 мкс. Знаючи рухливість електронів $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, розрахуйте коефіцієнт дифузії електронів D ($\text{м}^2/\text{с}$) при 300 К для германію та розрахуйте для обох зразків дифузійну довжину L (м) електронів.

Задача 4. Знаючи рухливість електронів та дірок германію $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, розрахувати для кожного носія коефіцієнт дифузії D ($\text{м}^2/\text{с}$), пов'язаний з рухливістю μ співвідношенням Ейнштейна.

Контрольні запитання

1. Поясніть суть термінів «генерація» та «рекомбінація» носіїв заряду.
2. Назвіть фактори, що визначають рухливість носіїв в напівпровідниках.
3. Назвіть основні фактори, від яких залежить час життя та дифузійна довжина нерівноважних носіїв заряду.
4. Охарактеризуйте рухливість носіїв в напівпровідниках з атомною ґраткою.
5. Охарактеризуйте рухливість носіїв струму в іонних кристалах.