

РАСЧЁТ ИНТЕНСИВНОСТИ РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ НА ИОНИЗИРОВАННОЙ ПРИМЕСИ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ МЕТОДОМ РИДЛИ

Д. А. Астратович

Белорусский государственный университет, г. Минск;

dmitrij.astratovich@yandex.by;

*науч. рук. – В. М. Борздов, д-р физ.-мат. наук, проф.; Ю. Г. Василевский,
ст. преп.*

В настоящей работе рассмотрены основные подходы к описанию процесса рассеяния электронов на ионизированной примеси при численном моделировании электрофизических свойств полупроводниковых структур. Проведён расчёт интенсивности рассеяния электронов на ионизированной примеси в рамках модели Брукса-Херринга и модели Ридли. Показано, что в области энергий электронов менее 0,1 эВ значения интенсивности рассеяния электронов, полученные в рамках модели Ридли, близки к уровню интенсивности рассеяния электронов в рамках модели Конуэлл-Вайскопфа, а при энергиях 0,1-1 эВ – близки к значениям, рассчитанным в рамках модели Брукса-Херринга. Таким образом, модель Ридли позволяет согласовать модели Конуэлл-Вайскопфа и Брукса-Херринга в данном диапазоне энергий электронов.

Ключевые слова: метод Монте-Карло; интенсивность рассеяния; модель Брукса-Херринга; модель Конуэлл-Вайскопфа; модель Ридли.

ВВЕДЕНИЕ

При моделировании кинетических процессов в полупроводниках рассеяние электронов на ионизированных атомах примеси существенно влияет на кинетические свойства сильнолегированных полупроводниковых областей. Полное поперечное сечение рассеяния электрона на кулоновском потенциале иона:

$$\sigma = \pi b^2 = 2\pi \int_0^{\pi} \sigma_d(\theta') \sin \theta' d\theta', \quad (1)$$

где θ – угол рассеяния, b – прицельный параметр, $\sigma_d(\theta)$ – дифференциальное сечение рассеяния.

Из-за расходимости величины $\sigma_d(\theta)$ при $\theta \rightarrow 0$ интеграл в выражении (1) расходится.

При численном кинетическом моделировании рассеяния на ионизированной примеси по методу Монте-Карло используются три основные модели примесного рассеяния электронов, позволяющие в той или иной мере снять расходимость интеграла в формуле (1): модель Конуэлл-

Вайскопфа (CW), модель Брукса-Херринга (ВН), модель исключения третьего тела (модель Ридли).

Приближение Конуэлл-Вайскопфа состоит в ограничении сверху допустимых значений прицельного параметра b половиной среднего расстояния между примесными центрами:

$$b_{\max} = \frac{1}{2} n^{-\frac{1}{3}}$$

где n – концентрация ионизированной примеси.

Подход Брукса-Херринга учитывает экранирование кулоновского потенциала двухчастичного взаимодействия. В этой модели кулоновский потенциал заменяется потенциалом Юкавы $V(r)$:

$$V(r) = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon r} \exp(-r\beta_s),$$

где $\beta_s = \left(\frac{Ze^2 n}{\epsilon_0 \epsilon k_B T} \right)^{\frac{1}{2}}$.

Для модели Ридли выражение для расчёта вероятности рассеяния в единицу времени:

$$W_R(E) = \frac{\nu(E) \left[1 - \exp\left(-\frac{2b_m W_{BH}(E)}{\nu(E)} \right) \right]}{2b_m},$$

где $W_{BH}(E)$ – интенсивность рассеяния, рассчитанная по модели ВН,

$\nu(E) = \frac{1}{\hbar} \frac{dE}{dk} = \sqrt{\frac{2E}{m^*}}$ – скорость движения электронов.

$$W_{BH}(E) = \left(\frac{\sqrt{2} n e^4}{4\epsilon_0 \epsilon^2 \sqrt{m^*}} \right) E^{-\frac{3}{2}} \left[\frac{1 + 2\alpha E}{(1 + \alpha E)^{\frac{3}{2}}} \right] \cdot \left\{ \frac{\left[1 + 2c_k^2 \left(\frac{\beta}{2k} \right)^2 \right]^2}{4 \left(\frac{\beta}{2k} \right)^2 \left[1 + \left(\frac{\beta}{2k} \right)^2 \right]} + c_k^2 \left[1 + 2c_k^2 \left(\frac{\beta}{2k} \right)^2 \right] \ln \left[\frac{\left(\frac{\beta}{2k} \right)^2}{1 + \left(\frac{\beta}{2k} \right)^2} \right] + c_k^4 \right\},$$

где $c_k = \left(\frac{\alpha E}{1 + 2\alpha E} \right)^{\frac{1}{2}}$, $\beta^2 = \frac{4\pi n e^2}{\epsilon k_B T}$, $k = \sqrt{\frac{2m^* E}{\hbar^2}}$, m^* – эффективная масса электрона, α – угловой коэффициент рассеяния.

РАСЧЁТ ИНТЕНСИВНОСТИ РАССЕЙЯНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В РАМКАХ МОДЕЛЕЙ ВН И РИДЛИ

Были проведены расчёты интенсивности рассеяния электронов в арсениде галлия, для которого $\epsilon = 12,9$, $m^* = 0,067$, $\alpha = 0,576 \text{ эВ}^{-1}$. Результаты расчетов приведены в виде графиков на рис. 1-4.

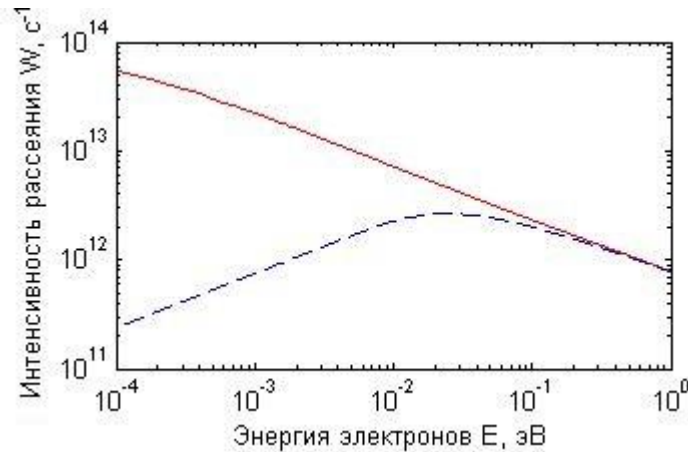


Рис. 1. Зависимость интенсивности рассеяния на ионизированной примеси от энергии электрона в арсениде галлия при значениях $T = 77 \text{ К}$, $n = 1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$: (—) модель Брукса-Херринга (ВН), (---) модель Ридли

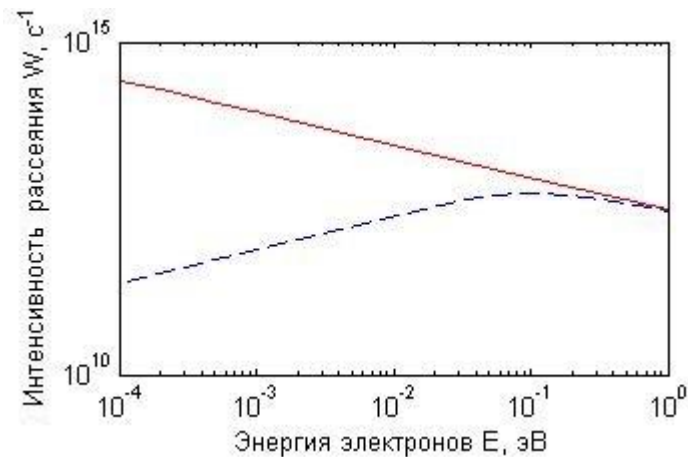


Рис. 2. Зависимость интенсивности рассеяния на ионизированной примеси от энергии электрона в арсениде галлия при значениях $T = 300 \text{ К}$, $n = 1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$: (—) модель Брукса-Херринга (ВН), (---) модель Ридли

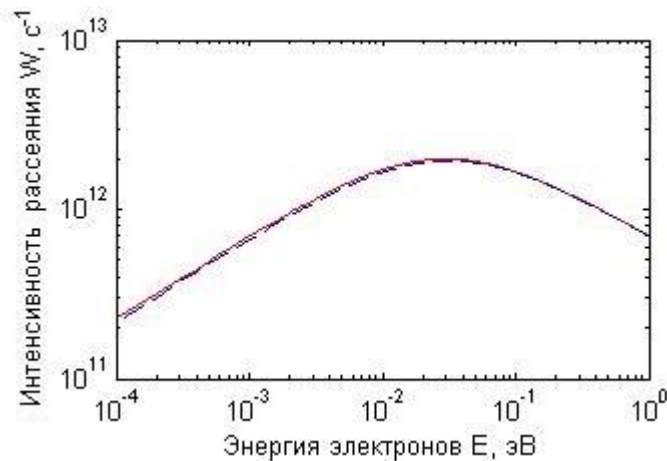


Рис. 3. Зависимость интенсивности рассеяния на ионизированной примеси от энергии заряда в арсениде галлия при значениях $T = 77$ К, $n = 1 \cdot 10^{24}$ м⁻³: (—) модель Брукса-Херринга (ВН), (---) модель Ридли

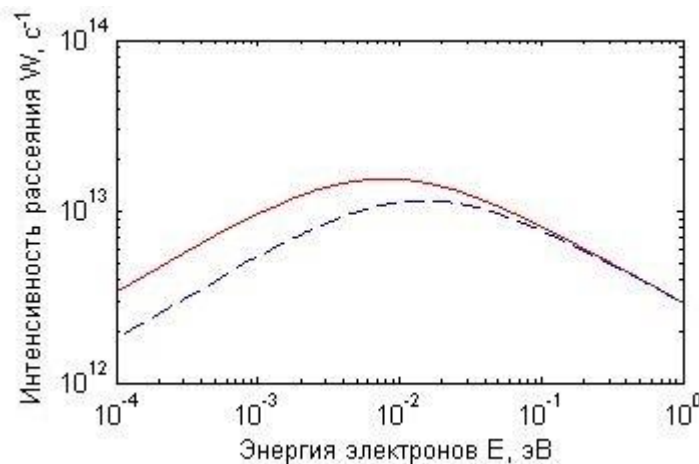


Рис. 4. Зависимость интенсивности рассеяния на ионизированной примеси от энергии заряда в арсениде галлия при значениях $T = 300$ К, $n = 1 \cdot 10^{24}$ м⁻³: (—) модель Брукса-Херринга (ВН), (---) модель Ридли

Оси координат в представленных графиках имеют логарифмический масштаб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Был проведен расчёт интенсивности рассеяния электронов в арсениде галлия при различных наборах значений температур и концентраций ионизированной примеси в рамках моделей ВН и Ридли.

Показано, что при значениях энергии электронов порядка 0,1-1 эВ модели ВН и Ридли дают близкие результаты моделирования, а при меньших энергиях модель Ридли дает меньшие величины интенсивности рассеяния, близкие к значениям интенсивности в модели СВ [2].

Таким образом, показано, что модель Ридли позволяет согласовать модели ВН и СВ.

Библиографические ссылки

1. Сперанский Д.С., Борздов В.М., Поздняков Д.В. Моделирование рассеяния электронов на ионизированной примеси в полупроводниках и полупроводниковых структурах методом Монте-Карло // Доклады БГУИР. 2010. № 2(56). С. 33–39.
2. Иващенко В.М., Митин В.В. Моделирование кинетических явлений в полупроводниках. Метод Монте-Карло // «Наукова думка», Киев. 1990. С. 102–107.
3. Ruch J.G, Fawcett W. Temperature Dependence of the transport Properties of Gallium Arsenide Determined by a Monte Carlo Method. Journal of applied physics // Journal of Applied Physics. 1970. Vol. 41, № 9. P. 3843–3849.