

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ**

УДК 621.794.61

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СРЕДНЕЙ ДРЕЙФОВОЙ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ В  
ОДНОМЕРНОЙ СТРУКТУРЕ ИЗ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ**

В.Н. МИЩЕНКО

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 19 мая 2015

Приведены результаты моделирования средней дрейфовой скорости электронов в одномерной структуре из арсенида галлия с использованием метода Монте-Карло. Выработаны рекомендации по выбору величин временного шага и длины пространственной ячейки, которые определяют процедуру численного моделирования.

*Ключевые слова:* средняя дрейфовая скорость электронов, арсенид галлия, метод Монте-Карло.

**Введение**

Исследование процесса переноса электронов для полупроводниковых соединений группы  $A^{III}B^V$  и, особенно для материала GaAs, продолжает оставаться актуальной задачей, которая связана с разработкой быстродействующих приборов диапазонов СВЧ и КВЧ. Наиболее корректным методом для анализа физических процессов в таких структурах считается применение статистического метода Монте-Карло, который позволяет учесть все механизмы рассеяния носителей заряда в полупроводнике и получить зависимости их распределения для стационарных и нестационарных процессов. Электроны в полупроводниках при наличии внешнего электрического поля подчиняются основным уравнениям движения и рассеиваются в случайные моменты времени в соответствии с известными вероятностями рассеивания. Моделирование поведения электронов с применением случайных чисел для розыгрыша процессов рассеяния и времен свободного пробега составляют главную особенность моделирования кинетических явлений с использованием метода Монте-Карло.

При исследовании нестационарных и быстропротекающих процессов важное значение приобретает выбор параметров вычислительной процедуры – интервала времени  $dT$ , по завершении которого необходима коррекция величины электрического поля и длины  $H$  элементарной ячейки, на которые разбивается исследуемая структура. Основной целью выполненных исследований, использующих метод Монте-Карло, было изучение особенностей влияния параметров моделирования  $dT$  и  $H$  на величину средней дрейфовой скорости электронов как одного из основных параметров кинетических процессов в полупроводниковых структурах.

**Метод и особенности моделирования**

Параметры моделирования  $dT$  и  $H$  обычно связывают с величинами плазменной частоты  $\omega_p$  и длиной Дебая  $\lambda_D$ , что необходимо для корректного решения уравнения Пуассона. Для устранения появления неустойчивости при решении уравнения Пуассона величину  $dT$  рекомендуется выбирать в соответствии с неравенством [1]:

$$dT \leq \frac{2}{\omega_p} = \frac{2}{q} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot m}{n}}, \quad (1)$$

где  $q$  – заряд электрона,  $n$  – концентрация электронов,  $m$  – масса электрона,  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость,  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная.

Величина  $\lambda_D$  определяется из соотношения [1]:

$$\lambda_D = \frac{1}{q} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot k_B \cdot T}{n}}, \quad (2)$$

где  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура.

Использование условия (1) не дает возможности однозначно выбрать величину  $dT$  для проведения моделирования. Поэтому необходимо проведение дополнительного моделирования и затем оценка правильности выбора значений параметров  $dT$  и  $H$ . Известно, что результаты моделирования с использованием метода Монте-Карло зависят от значений основных электрофизических параметров материала и параметров модели зоны проводимости. В настоящее время для материала GaAs общепризнанной является трехдолинная модель, в которой одной нижней долине  $\Gamma$  (или  $G$ ) сопутствуют верхние долины  $L$  (общее количество – 4 долины) и  $X$  (общее количество – 3 долины). В разработанной программе моделирования процессов переноса носителей заряда с использованием метода Монте Карло для материала GaAs были учтены наиболее важные механизмы рассеяния: на полярных оптических фононах, на примесях, на акустических фононах, междолинное рассеяние между эквивалентными и неэквивалентными долинами [2, 3]. При моделировании были использованы параметры для материала GaAs, данные о которых приведены в табл. 1–3 [4].

Таблица 1. Значения основных электрофизических параметров материала GaAs

Параметр, размерность	Значение параметра
Плотность, гр/см <sup>3</sup>	5,36
Продольная скорость звука, 10 <sup>3</sup> м/с	5,24
Статическая диэлектрическая проницаемость	12,9
Высоочастотная диэлектрическая проницаемость	10,92
Энергия оптического фонона, эВ	0,03536

При выбранных параметрах полупроводниковой структуры из GaAs с использованием формул (1) и (2) была выполнена оценка значений параметров  $dT$  и  $\lambda_D$ . Для долины  $\Gamma$  величина  $dT \leq 4,16 \cdot 10^{-13}$  с, для долин  $X$  величина  $dT \leq 1,26 \cdot 10^{-12}$  с, а для долин  $L$  величина  $dT \leq 7,81 \cdot 10^{-13}$  с. Для всех долин величина  $\lambda_D = 0,56 \cdot 10^{-5}$  см.

Таблица 2. Значения параметров моделирования для материала GaAs

Параметр	Долина (зазор между долинами)	Значение параметра
Акустический деформационный потенциал, эВ	$\Gamma$	7,0
	$L$	9,20
	$X$	9,27
Относительная эффективная масса электрона	$\Gamma$	0,063
	$L$	0,222
	$X$	0,58
Коэффициент непараболичности, (эВ <sup>-1</sup> )	$\Gamma$	0,61
	$L$	0,461
	$X$	0,204
Величина междолинного зазора, эВ	$\Gamma$ - $X$	0,522
	$\Gamma$ - $L$	0,33

Таблица 3. Значения параметров (констант) междолинной связи и энергии междолинных фононов для материала GaAs

Параметр	Переход	Значение параметра
Значения параметров (констант) междолинной связи, $\cdot 10^9$ эВ/см	$\Gamma$ - $L$	1,0
	$\Gamma$ - $X$	1,0
	$L$ - $L$	1,0
	$L$ - $X$	0,5
	$X$ - $X$	0,7
Значения энергии междолинных фононов, эВ	$\Gamma$ - $L$	0,0278
	$\Gamma$ - $X$	0,0299
	$L$ - $L$	0,0290
	$L$ - $X$	0,0293
	$X$ - $X$	0,0299

## Полученные результаты моделирования и их обсуждение

Используя процедуру метода Монте-Карло были исследованы особенности процесса переноса электронов в одномерной GaAs структуре при температуре  $T = 300$  К. Количество моделируемых частиц принималось равным 100000, количество элементарных ячеек (шагов)  $N$  по длине структуры равнялось 100, что определяет длину исследуемой структуры  $L = N \cdot H$ . Концентрация электронов в структуре принималась равной  $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . При этом влияние высоколегированных контактных областей на процессы переноса носителей заряда не учитывалось.

Зависимости средней скорости электронов  $V$  от длительности шага моделирования  $dT$  при длине структуры  $L = 1 \cdot 10^{-2}$  см представлены на рис. 1, где кривые 1–5 соответствуют значениям напряженности поля  $F$ , равным соответственно 3, 4, 5, 6, 8 кВ/см. Анализ этих данных показывает, что для значений  $dT \leq 2 \cdot 10^{-13}$  наблюдается немонотонное и довольно значительное изменение средней скорости электронов. При увеличении  $dT$  выше этого значения величина средней скорости электронов изменяется незначительно.

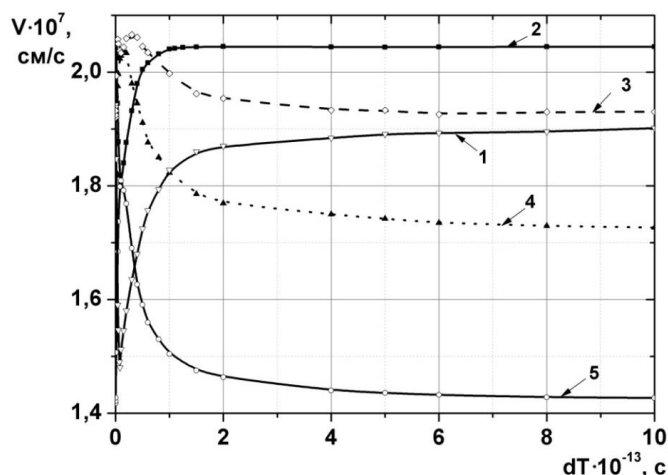


Рис. 1. Зависимость средней скорости электронов от длительности шага моделирования

Зависимости средней скорости электронов  $V$  от длины структуры  $L$  при  $F = 4$  кВ/см представлены на рис. 2, где кривые 1–4 соответствуют значениям  $dT$  равным  $1 \cdot 10^{-13}$ ;  $5 \cdot 10^{-14}$ ;  $2 \cdot 10^{-14}$ ;  $1 \cdot 10^{-14}$  с, соответственно. Анализ этих данных показывает, что при значениях  $L \leq 0,6 \cdot 10^{-3}$  см и значениях  $dT$ , равных  $5 \cdot 10^{-14}$  и  $1 \cdot 10^{-13}$  с, наблюдается значительное изменение средней скорости электронов как проявление динамических релаксационных процессов.

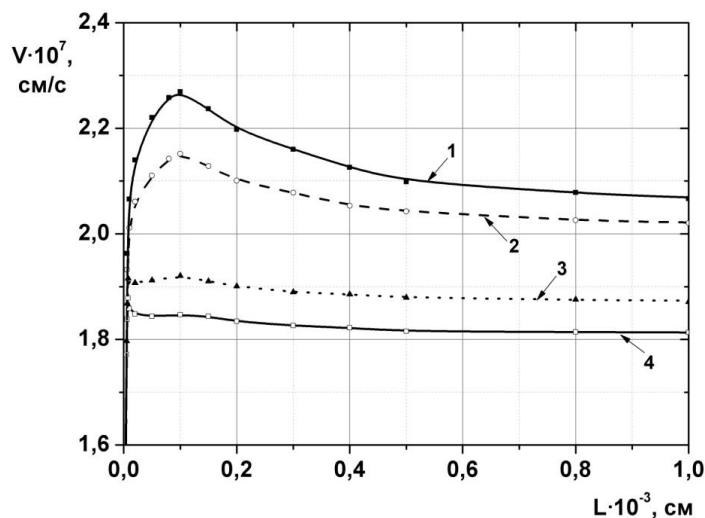


Рис. 2. Зависимость средней скорости электронов от длины структуры

Таким образом, наиболее оптимальным является выбор значения параметра  $dT = 4 \cdot 10^{-13}$  с, что, с одной стороны, гарантирует выполнение условия (1) для электронов всех трех долин материала

GaAs, а с другой стороны обеспечивает накопление достаточного количества данных для правильного расчета величины средней дрейфовой скорости электронов за интервал  $dT$ . При выбранном значении  $dT = 4 \cdot 10^{-13}$  с величина шага  $H$  выбиралась согласно рекомендациям, представленным в [1].

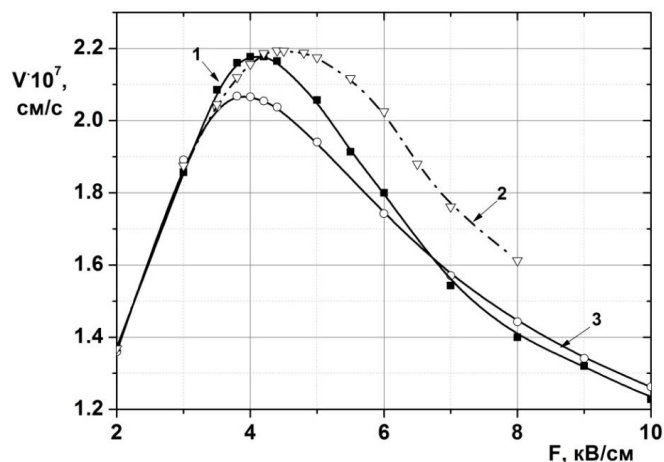


Рис. 3. Зависимость средней скорости электронов от напряженности электрического поля

Учитывая все отмеченные обстоятельства, для расчета зависимости средней скорости электронов  $V$  от напряженности электрического поля  $F$  (рис. 3) были выбраны значения параметров  $dT = 4 \cdot 10^{-13}$  с и  $H = 1 \cdot 10^{-4}$  см. Результаты расчета зависимости средней скорости электронов от напряженности электрического поля показаны на рис. 3 в виде кривой 3. Анализ этой зависимости показывает хорошее соответствие экспериментальным данным (кривая 1 получена в [5], а кривая 2 – в [6]). Это позволяет считать обоснованными высказанные выше рекомендации по выбору параметров  $dT$  и  $L$  (или  $H$ ) и использовать их для моделирования процессов переноса носителей заряда в материале GaAs и сложных структурах на основе этого материала.

### Заключение

Выполнено моделирование средней дрейфовой скорости электронов в одномерной структуре из арсенида галлия. Выработаны рекомендации по выбору величин временного шага и длины пространственной ячейки, которые определяют процедуру численного моделирования. Результаты моделирования средней дрейфовой скорости электронов в одномерной структуре показали хорошее соответствие экспериментальным данным.

## MODELLING OF AVERAGE DRIFT SPEED OF ELECTRONS IN ONE-DIMENSIONAL STRUCTURE FROM GALLIUM ARSENIDE

V.N. MISHCHENKA

### Abstract

Modeling results of average drift speed of electrons are given in one-dimensional structure from gallium arsenide. Recommendations about a choice of sizes of a temporary step and length of a spatial cell which define procedure of numerical modeling are developed.

### Список литературы

1. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц. М., 1987.
2. Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия. М., 1991.
3. Fawcett W., Boardman D.A., Swain S. // Journal of Physical Chemistry Solids. 1970. Vol. 31. P. 1963–1990.
4. Littlejohn M.A., Hauser J.R., Glisson T.H. // Journal of Applied Physics. 1977. Vol. 48, № 11. P. 4587–4590.
5. Braslau N., Hauge P.S. // IEEE Transactions on Electron Devices. 1980. V. ED-17. № 8. P. 616–622.
6. Masselink W.T., Kuech T.F. // Journal of Electronic Materials. 1989. Vol. 18, № 5. P. 579–584.