

4. ВЫВАДЫ

У дадзенай працы былі разлічаны спектры аднамерных фатонных крышталяў канечных памераў. Аб'ектам даследавання выбрана перыядычная структура арсеніда галія і аксіда крэмнія. Атрыманы спектры прапускання і адбіцця для дадзенай структуры і праверана іх адпаведнасць тэорыі. Заўважана, што на фарміраванне забароненых зон уплываюць глыбіня мадуляцыі паказніка праламлення фатоннага крышталя і колькасць перыядаў.

Літаратура

1. Фотонные кристаллы с перестраиваемой запрещённой зоной на основе заполненных и инвертированных композитов опал-кремний / В. Г. Голубев, В. А. Кособукин, Д. А. Курдюков и др. // Физика и техника полупроводников. 2001. Том 35. вып. 6. С. 710–713.
2. Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах // Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. 616 с.
3. Борн М., Вольф. Э. Основы оптики // М.: Наука, 1970. С. 77-96.
4. Ціхановіч В. Фатонныя крышталі(агляд). // Полупроводниковые лазеры. Сб. науч. статей. Вып. 2. – Мн.: БГУ, 2003. С.161-194.
5. Афоненко А. А., Манак И. С. Электромагнитная теория полупроводниковых лазеров. // Мн.: Белгосуниверситет, 1997. – 59 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАВИННЫХ ФОТОДИОДОВ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

М. В. Якутович

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в различных областях науки и техники широко распространены детекторы на основе лавинных фотодиодов (ЛФД). Работа ЛФД основана на физическом механизме лавинного умножения фотоносителей в сильном электрическом поле обратно смещенного *pin*-перехода.

Предельная чувствительность фотодиода определяется хаотическими флуктуациями тока на выходе, которые имеются как в присутствии оптического сигнала, так и без него. Задача заключается в необходимости обнаружения сигнала среди хаотических флуктуаций. Лавинный процесс умножения является по своей природе статистическим, так как фотоносители, генерируемые в различных точках обедненной области, претер-

певают неодинаковое умножение, что и является основным источником шума ЛФД является статистический характер умножения.

Шум-фактор был впервые определен Макинтайром [1,2], который получил формулу для средней квадратичной величины шумового тока $I_{\text{ш}}^2$, пропорционального среднему току \bar{I} и полосе пропускания фотодиода Δf :

$$I_{\text{ш}}^2 = 2e\bar{I}\Delta f \langle M^2 \rangle F \quad (1)$$

где шум-фактор F был определен как

$$F = k \langle M \rangle + (2 - 1/\langle M \rangle)(1 - k) \quad (2)$$

здесь k – это отношение коэффициентов ионизации соответственно для электронов и дырок (α и β), которые равны вероятности возбуждения данным носителем электрон-дырочной пары на единичном расстоянии. Если первичный фотоноситель электрон, то $k = \beta / \alpha$, в противном случае $k = \alpha / \beta$.

Однако недавние исследования GaAs лавинных фотодиодов [3-6] показали существенное уменьшение шум-фактора при толщине i -области меньше 1 микрона. Носитель, стартующий с нулевой энергией относительно края зона проводимости, должен набрать достаточную энергию для совершения ударной ионизации. Попытки расчета коэффициентов ионизации методом Монте-Карло [7] и различные аналитические модели [8,9] показали, что носитель перед ударной ионизацией должен пройти некоторое расстояние («*dead-space*»), за которое он должен набрать энергию, в среднем превышающую в 1.5-2 раза энергию порога ионизации.

В данной работе была реализована упрощенная модель Монте-Карло [10] для моделирования ЛФД с узкой i -областью. Это достаточно точная, эффективная и самодостаточная модель, которая позволяет предсказать коэффициент умножения и шумовые характеристики практически для всех видов геометрии.

Т.к. моделирование методом Монте-Карло является достаточно ресурсоемким, был предложен и реализован алгоритм параллельного выполнения данной задачи с учетом неоднородности кластера, что позволило достигнуть значительного ускорения вычислений.

2. ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УМНОЖЕНИЯ И ШУМ-ФАКТОРА

Для моделирования лавинного процесса генерируется электрическое поле в зависимости от приложенного обратного напряжения V_b с учетом внутреннего напряжения перехода 1.2 В.

Для расчета используется итерационная схема. Носители (электроны) поочередно инжектируются в структуру, каждый раз образуя на выходе

коэффициент умножения M_i . Для расчета коэффициента умножения $M = \langle M_i \rangle$ и шум-фактора F , который рассчитывался как $F = \langle M_i^2 \rangle / \langle M_i \rangle^2$, требовалось инжектировать от 10000 до 50000 носителей.

В результате варьирования входных параметров было получено, что подбором соответствующих параметров данная модель вполне корректно описывает процессы в лавинных фотодиодах (см. рис. 1, 2).

3. АЛГОРИТМ РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В моделировании методом Монте-Карло полет каждой частицы моделируется отдельно. Предполагается, что движение всех частиц не зависит друг от друга, что делает данное моделирование идеально подходящим для распараллеливания. Параллельный алгоритм основан на модели «главный-подчиненный» по классификации взаимодействия между процессорами. Ансамбль частиц разбивается на группы, и каждая группа привязывается к определенному процессору. Подчиненные процессоры полностью ответственны за моделирование частиц во внутреннем поле. «Главный» процессор распределяет вычисления и служит в качестве интерфейса пользователя.

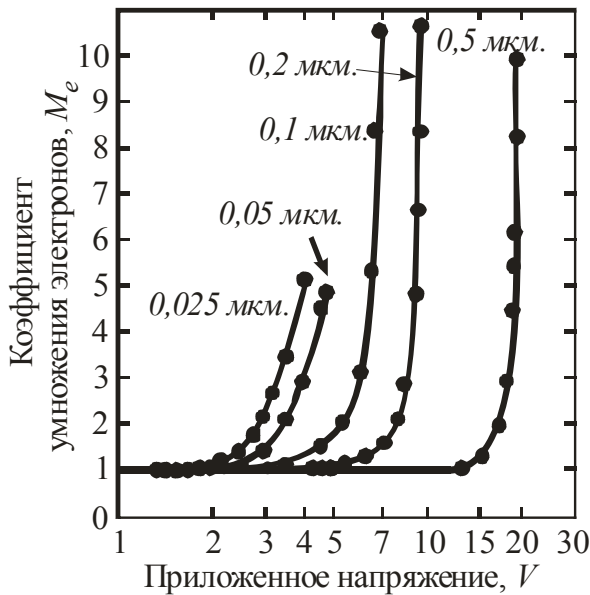


Рис. 1. Коэффициент электронного умножения M_e • – смоделированный, (–) – экспериментальный

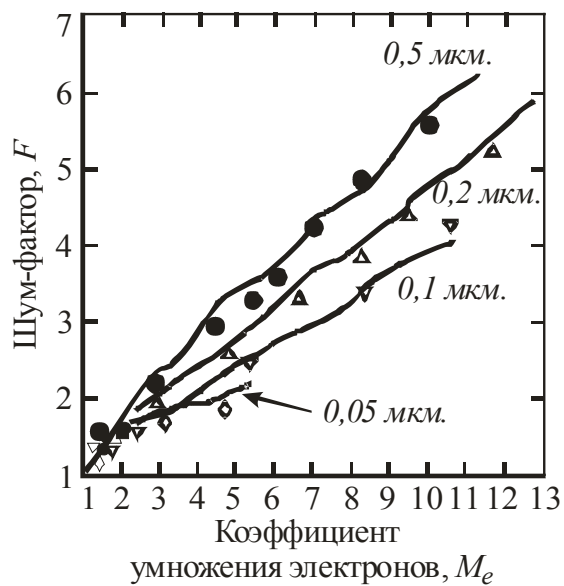


Рис. 2. График шум-фактора в зависимости от коэффициента умножения • – смоделированный, (–) – экспериментальный

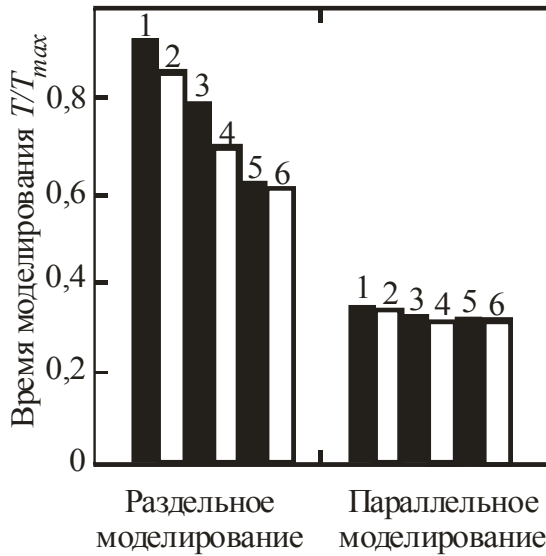


Рис. 3. Время выполнения моделирования, нормированное на максимальное

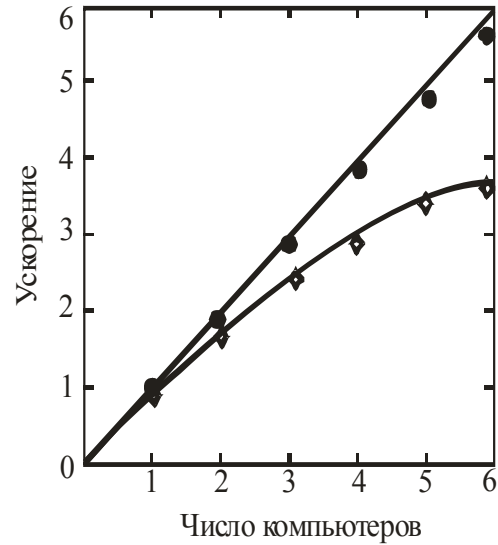


Рис. 4. Ускорение вычисления с учетом неоднородности кластера (•) и без (□).

Сначала пользователь задает начальные условия, физические параметры модели, точность вычислений и т.д. Затем головной компьютер инициализирует массив подчиненных процессоров, и рассылает каждому процессору небольшой тестовый вычислительный объем (в нашем случае – это моделирование пролета 1000 частиц). После расчета предложенной задачи все процессоры кластера высылают головному компьютеру время выполнения тестовой задачи. Т.о., определяется вычислительная мощность каждого процессора применительно к данной задаче. После выполнения тестового моделирования головной процессор рассылает поставленную задачу, причем деление происходит прямо пропорционально вычислительной мощности каждого компьютера в кластере. Моделирование продолжается до достижения заданной точности.

Данный алгоритм распараллеливания позволяет эффективно использовать разнородные кластеры. Причем, программа без изменения может запускаться на различных кластерах, и везде будут учитываться индивидуальные особенности того или иного кластера применительно к конкретной задаче. Это хорошо видно на рис. 3 и рис. 4, где приведены графики, отражающие время выполнения задачи по отдельности и в кластере, а также ускорение вычислений с тестовым моделированием и без него.

Литература

1. *McIntyre R. J.* Multiplication noise in uniform avalanche diodes // *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-13, Jan. 1966.
2. *McIntyre R. J.* The distribution of gains in uniformly multiplying photodiodes: Theory // *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-19, pp.703–713, 1972.

3. *Li K. F., Ong D. S., David J. P. R., Rees G. J., Tozer R. C., Robson P. N., and Grey R.* Avalanche multiplication noise characteristics in thin GaAs p⁺-i-n⁺ diodes // *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 45, pp. 2102–2107, Oct. 1998.
4. *Hu C., Anselm K. A., Streetman B. G., and Campbell J. C.* Noise characteristics of thin multiplication region GaAs avalanche photodiodes // *Appl. Phys. Lett.*, vol. 69, pp. 3734–3736, 1996.
5. *Li K. F., Ong D. S., David J. P. R., Robson P. N., Tozer R. C., Rees G. J., and Grey R.* Low excess noise characteristics in thin avalanche region GaAs diodes // *Electron. Lett.*, vol. 34, pp. 125–126, 1998.
6. *Plimmer S. A., R. David J. P., Herbert D. C.* Investigation of impact ionization in thin GaAs diodes // *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 43, pp. 1066–1072, July 1996.
7. *Brennan K. F.* Calculated electron and hole spatial ionization profiles in bulk GaAs and superlattice avalanche photodiodes // *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 24, pp. 2001–2006, 1988.
8. *Spinelli, Pacelli A., and Lacaíta A. L.* Dead space approximation for impact ionization in silicon // *Appl. Phys. Lett.*, vol. 69, no. 24, pp. 3707–3709, 1996.
9. . *Ананасович В. В., Пашкевич В. В.* Модель формирования однофотонного отклика в лавинном фотодиоде // *Радиотехника и Электроника*, 1997, том 42, 12.
10. *Plimmer S. A., David J. P. R., Ong D. S., Li K. F.* A Simple Model for Avalanche Multiplication Including Deadspace Effects // *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 46, April 1999.