

А. А. Григорьев,
кандидат физико-математических наук, доцент, Белорусский государственный университет информатики и
радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь,
e-mail: agrig@bsuir.by

A. A. Grigoryev, Candidate in Physics and Mathematics, associate professor,
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

**ТЕХНОЛОГИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА
В ПОЛУПРОВОДНИКЕ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ
ПОСРЕДСТВОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ В MATLAB
TECHNOLOGIZATION OF THE PROCESS OF STUDYING THE DYNAMICS
OF CHARGE CARRIERS IN A SEMICONDUCTOR IN A MAGNETIC FIELD BY MEANS
OF SIMULATION IN MATLAB**

Аннотация. Рассматривается технологизация процесса обучения посредством визуализации результатов моделирования в математическом редакторе MATLAB.

Abstract. The technologization of the learning process through the visualization of simulation results in the mathematical editor MATLAB has being regarded.

Ключевые слова: технологизация процесса обучения, MATLAB, электромагнетизм.

Key words: technologicalization of the learning process, MATLAB, electromagnetism.

Технологизация процесса обучения позволяет определить и рационально распределить порядок процедур, обеспечивающих доступность учебно-образовательного процесса, при этом предполагается максимальная последовательность и простота выполнения операций.

Технологические схемы учебно-образовательного процесса являются необходимой частью при составлении методических схем, направленных на рационализацию и индивидуализацию процесса обучения, для принятия современных педагогических решений по формулировке исходных принципов и идей обучения. При успешном внедрении таких схем значительно усиливается организованность учебного процесса, целенаправленность руководства им, рационально осуществляется деятельность его участников, усиливается обратная связь.

При обучении естественнонаучным дисциплинам информационные технологии используются как для управления учебной работой, так и как средство телекоммуникации, которое может являться средой общения,

редактирования математических объектов, моделирования процессов и средством презентации материала в лекционном режиме.

В этом случае программная среда применяется не только как среда обучения, но и как средство усиления интеллектуального потенциала студентов, что способствует улучшению их развития.

Для технологизации процесса подготовки студентов предлагается использовать MATLAB [1, с. 12] – пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений и одноимённый язык программирования. Данный пакет ориентирован на подготовку интерактивных документов с вычислениями и визуальным сопровождением. MATLAB предназначается для проектирования систем управления и во многих других научных и инженерных областях, используется в сложных проектах, чтобы визуализировать результаты математического моделирования. MATLAB достаточно удобно использовать в образовании, в частности, для преподавания линейной алгебры и численных методов.

В качестве модельной задачи рассмотрим применение численных методов в описании динамики движения частиц с разноименными зарядами в ортогональных электрическом и магнитном полях, что является модельной задачей для эффекта Холла в полупроводнике. Для визуализации физических процессов воспользуемся следующими возможностями MATLAB: решение системы дифференциальных уравнений, построение интерполяционных кривых для функций координат и скоростей, построение анимированных графиков пространственных положений заряженных частиц. Для оптимизации расчётов предлагается применение упрощённой модели и составленного на её основе программного скрипта.

Рассмотрим, как в такой среде можно построить физическую модель движения частиц в силовых полях, и какие методы дают улучшение наглядности физических явлений. Объектом моделирования является полупроводник плоской формы (горизонтальная пластина) шириной b , толщиной d и длиной a , с текущим вдоль неё током плотностью j , порождаемым напряжённостью внешнего электрического поля E . Пусть пластина находится в магнитном поле, вектор индукции B которого перпендикулярен её плоскости и направлен вниз. Результирующая сила, действующая на заряженную частицу в такой модели, является суммой силы Лоренца, силы со стороны электрического поля и силы сопротивления [2, с. 194].

Для анализа траектории движения заряженной частицы перейдём от векторной формы 2-го закона Ньютона к системе дифференциальных уравнений 1-ого порядка для проекций скоростей и координат:

В качестве начальных условий и численных параметров пластины взяты такие для кремниевой пластины, легированной мышьяком, размерами $10 \times 10 \times 0.1$ мм, с текущим через неё током $I = 1$ мА, помещённой в магнитное поле с величиной индукции $0,1$ Тл. MATLAB-скрипт с функцией `ode45` (использующей одношаговые явные методы Рунге-Кутты 4-го и 5-го порядков) позволяет по заданным начальным условиям решать систему дифференциальных уравнений (1-4). При этом, поскольку холловская напряжённость (создаваемая скапливающимися на поперечных границах пластины зарядами) изменяется от 0 (в начальный момент времени) до некоторого максимального значения [3, с. 17], необходимо построить графики зависимостей координат проекций скорости частиц от времени, а также траекторий частиц для различных её значений.

Кроме того, для экспериментальной проверки правильности модели вычислена зависимость поперечного тока в полупроводнике от продольного, график которой построен в одной системе координат с экспериментальным графиком той же зависимости.

После запуска скрипта программой строятся восемь различных графиков координатных зависимостей смещения (в микрометрах) электронов и дырок от времени (в миллисекундах). Серый график с пометками $p+$ показывает зависимость для дырки, чёрный с пометками $e-$ – для электрона. Графики, нарисованные штрихпунктирной линией, соответствуют движению в отсутствие холловской (поперечной) напряжённости. Графики, нарисованные сплошной линией – движению при максимальном её значении, а пунктирной – движению при половине максимального значения.

Ввиду большей подвижности и малой массы, электроны вначале отклоняются гораздо сильнее дырок, однако по мере их скопления на границе пластины и возрастания холловской напряжённости, отклонение дырок растёт, а электронов – падает.

Поскольку носители заряда движутся от разных концов полупроводника в противоположных направлениях, эти зависимости могут быть показаны на одной координатной плоскости и не накладываться друг на друга.

Графики показывают, что электроны, ввиду большей подвижности, быстрее достигают другого конца проводника. Также по мере роста время движения дырки растёт, а электрона – падает, так как рост (падение) поперечной скорости ведёт к падению (росту) продольной скорости, соответственно (под действием силы Лоренца).

Траектории движения электронов и дырок представлены на рис. 1.

Отлично видно, что горизонтальное отклонение происходит в одну и ту же сторону, а также подтверждается вывод о том, что со временем отклонение электронов снижается, а дырок – растёт.

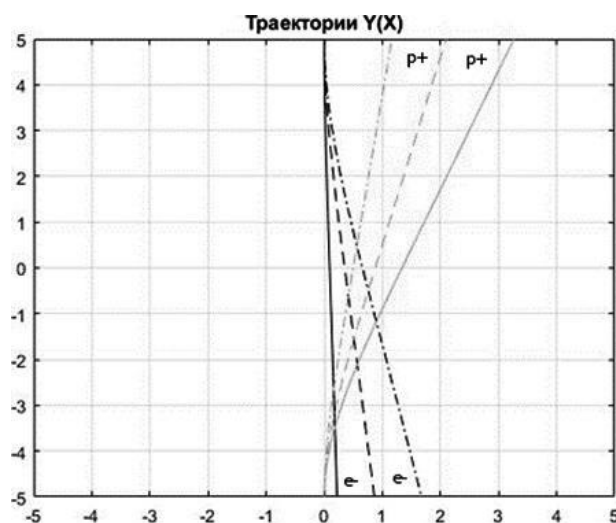


Рис. 1. Траектории движения электронов и дырок

Для проверки правильности предлагаемой модели использованы результаты эксперимента по методу Ван-дер-Пау [4, с. 147] (рис. 2).

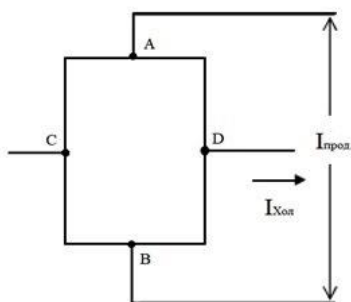


Рис. 2. Схема эксперимента

В ходе эксперимента к пластине из кремния, легированного мышьяком, крепились 4 контакта (А, В, С и D). Через контакты А и В шёл продольный ток, а к контактам С и D был подключён амперметр для измерения зависимости поперечного тока Холла от продольного тока. По экспериментальным и рассчитанным (вычисленным в MATLAB-скрипте) данным в среде MATLAB построены соответствующие графики зависимости поперечного тока Холла от продольного тока, которые хорошо согласуются.

Модель описывает эффект Холла в полупроводнике с высокой степенью точности (погрешность около 4–8 %), особенно при малых токах (для индукции внешнего магнитного поля $B = 0.1$ Тл это токи до 1 мА). По мере увеличения продольного тока погрешность растёт по причине пренебрежения магнитным полем тока в полупроводнике, однако его учёт сильно усложняет математическое описание.

При этом такая точность достаточна при изучении поведения полупроводников различных типов в магнитном поле, движения заряженных частиц в них и макропараметров, таких как сила поперечного тока Холла. В результате модель может быть применена:

1. Для наглядного сравнения полупроводников с целью выбора наиболее подходящего в конкретных условиях.
2. Для детального изучения движения заряженных частиц в полупроводнике.
3. Для определения типа проводимости, соотношения концентраций заряженных частиц и их подвижностей и некоторых других параметров полупроводника путём сопоставления имеющихся данных о нём с моделью (без необходимости в расчётах).

Данный метод позволяет изменять величины и координаты электрических зарядов и наблюдать изменение картины электростатического поля. Технологизированный таким образом процесс позволяет индивидуализировать выполнение лабораторных работ или практических занятий в учебной аудитории или в режиме on-line. В рамках педагогических технологий значительно усиливается организованность учебного процесса, повышается привлекательность процесса обучения за счет использования программных продуктов и визуализации результатов.

Литература

1. Дьяконов, В. П. MATLAB 5.0/5.3. Система символьной математики / В. П. Дьяконов, И. В. Абраменков. – Москва: Нолидж, 1999. – 640 с.



**Проблемы и перспективы технологического образования в России и за рубежом
("Problems and prospects of technological education in Russia and abroad")**

185

2. Савельев, И. В. Электропроводимость металлов и полупроводников // Научная библиотека избранных естественнонаучных изданий. – URL: http://scask.ru/c_book_s_phis3.php?id=57 (дата обращения: 16.06. 2020).
3. Павлов, Д. А. Эффект Холла: практикум / Д. А. Павлов. – Нижний Новгород: НГУ им. Н. И. Лобачевского, 2013. – 24 с.
4. Кучис, Е. В. Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования / Е. В. Кучис. – Москва: Радио и связь. 1990. – 264 с.