

Поперечный баллистический транспорт электронов через квантоворазмерные структуры в высокочастотных полях

Представлены результаты исследований поперечного баллистического транспорта электронов через квантоворазмерные гетероструктуры в высокочастотных электрических полях. Описан математический аппарат, позволяющий находить аналитические решения ряда задач по электронному транспорту через системы ям и барьеров с приложенным электрическим полем как малой, так и в ряде случаев произвольной амплитуды. Представлена задача, допускающая аналитическое самосогласованное решение уравнений Шредингера и Пуассона при произвольной амплитуде высокочастотного поля. Описан эффект возникновения абсолютной прозрачности многобарьерных структур под воздействием высокочастотного поля и ряд других физических эффектов.

Ключевые слова: Поперечный баллистического транспорт электронов, аналитические решения.

С того момента как в 1972 г. Р.А. Сурисом и А.Ф. Казариновым был предложен квантовый каскадный лазер на межподзонных переходах в сверхрешётке на основе полупроводниковых гетероструктур [1], электронный транспорт через системы квантовых ям и барьеров в высокочастотном электрическом поле продолжает привлекать пристальное внимание экспериментаторов и теоретиков во всём мире [2-6]. Существует две принципиально разные ситуации. Первый предельный случай – барьеры оказываются достаточно толстыми и время жизни электронов на квантовых уровнях велико. В этом случае определяющее влияние на динамику электронов оказывает взаимодействие с фононами. Второй предельный случай – толщины барьеров достаточно малы, соответственно взаимодействием с фононами можно пренебречь и на электронный транспорт, по сути, оказывает влияние только взаимодействие с высокочастотным электрическим полем. Долгое время, несмотря на внешне кажущуюся простоту, практически все данные задачи анализировались численно. Бурный всплеск аналитических исследований в этой области начался с появлением в 1993г. очень простого математического аппарата, позволяющего совместно с приближением дельта барьеров получать для ряда задач аналитические решения. В докладе рассматривается теория баллистического транспорта электронов через квантоворазмерные структуры в высокочастотных полях (для учёта пространственного заряда численная процедура) и найденные точные аналитические решения уравнения Шредингера в бесконечном пространстве для однородного СВЧ поля, как в отсутствие статического поля, так и в однородном статическом поле и параболическом потенциале [7]. Приводится крайне простой метод позволяющий описывать резонансные переходы в сильных полях на основе суммирования ряда теории возмущений. Показано, что двухбарьерная структура с тонкими высокими барьерами под воздействием резонансного высокочастотного поля может становиться абсолютно прозрачной для электронов, падающих на центр резонансного уровня [8]. Представлено аналитическое решение самосогласованных уравнений Шредингера и Пуассона в слабом СВЧ поле. Демонстрируется аномальное

подавление переходов в двухбарьерных структурах пространственным зарядом. Показано что квантовая эффективность для резонансных переходов при баллистическом транспорте может достигать до 80%. Найдено аналитическое решение самосогласованных уравнений Шредингера и Пуассона в сильном поле и обнаружена возможность существования квантовых неустойчивостей. Рассмотрены варианты как предложенного А.С. Тагером с соавторами в 1994 квантового каскадного лазера с баллистическим транспортом электронов [9], так и других аналогичных приборов, в частности длинноволнового ИК лазер на расщепленных уровнях трехбарьерных структур. Показана возможность высокоинтенсивных межзонных переходов при баллистическом транспорте. Представлен соответствующий математический аппарат с учетом непараболичности закона дисперсии. Рассмотрены варианты лазеров с баллистическим транспортом электронов с межзонными переходами и лазера с межподзонными переходами и уходом электронов в валентную зону. Найдено аналитическое решение уравнений Шредингера и Пуассона для переходов электронов между расщепленными уровнями в трехбарьерных структурах. Продемонстрирована высокая прозрачность двухфотонного канала рассеяния в трехбарьерных структурах (квантовая эффективность может достигать до 160%), как в одночастотном, так и в двухчастотном режимах. Предложено еще два типа когерентных лазеров на этих эффектах. Исследован баллистический электронный транспорт через двухуровневые и трехуровневые системы при отстройке частот и энергий от резонансных. Теоретически показано, что при баллистическом транспорте электронов эффект абсолютной прозрачности, возникающий под воздействием СВЧ поля на многобарьерные структуры, – явление распространенное и не является строго резонансным ни по частоте СВЧ колебаний, ни по энергии электронов [10].

Библиографический список

1. Казаринов А.Ф., Сурис Р.А. // ФТП 6, 135(1972).
2. Сумецкий М.Ю., Фельштын М.Л. // Письма в ЖЭТФ, 53(1), 24-27(1991).
3. Butiker M., Landauer R. // Phys. Rev. Letters 49(23), 1739-1743(1982).
4. Пашковский А. Б. // Письма в ЖТФ, 1993, т. 19, в.17, с.1-6.
5. Елесин В.Ф. // ЖЭТФ, 112(8), 483(1997).
6. Ткач Н.В., Сети Ю.А. // Письма в ЖЭТФ 95(В.5), 296 (2012).
7. Пашковский А.Б. // ЖЭТФ, 1996, т.109. В.5, с.1779-1805.
8. Голант Е.И., Пашковский А.Б. // Письма в ЖЭТФ, 63(7), 559 (1996).
9. Голант Е.И., Пашковский А.Б., Тагер А.С. // Письма в ЖТФ, 20(21), 74(1994).
10. Пашковский А.Б. // ФТП 2017, т. 51, в.4, с. 453-460.