

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

Махова Ивана Сергеевича, кандидата физико-математических наук, научного сотрудника международной лаборатории квантовой оптоэлектроники факультета Санкт-Петербургская школа физико-математических и компьютерных наук НИУ ВШЭ – Санкт-Петербург, на соискание персональной стипендии имени Ж.И. Алфёрова для молодых ученых в области физики и нанотехнологий за вклад в развитие фундаментальных исследований полупроводниковых наногетероструктур с целью создания оптоэлектронных устройств нового типа, работающих в инфракрасном и терагерцовом диапазонах спектра.

Махов Иван Сергеевич занимается проведением фундаментальных исследований в области оптических и электрооптических явлений в полупроводниковых наноструктурах с низкоразмерной активной областью в инфракрасном и терагерцовом спектральном диапазонах. За время своей научной деятельности Маховым И.С. получены новые и значимые для этой области науки результаты.

Маховым И.С. была обнаружена и исследована двухуровневая лазерная генерация в инжекционных микродисковых лазерах с активной областью на основе самоорганизованных квантовых точек InAs/InGaAs. Такая двухуровневая лазерная генерация заключается в протекании лазерной генерации сразу на нескольких (например, основном и первом возбужденном) оптических переходах квантовых точек, что является перспективным для осуществления оптической передачи данных со спектральным кодированием информации. Маховым И.С. экспериментально и теоретически исследовано влияние температуры на характеристики двухуровневой лазерной генерации в микродисковых лазерах различного диаметра. Более того, с использованием эффекта двухуровневой генерации Маховым И.С. предложен новый метод определения оптических потерь в лазерах со сложной геометрией резонатора.

Маховым И.С. был предложен механизм генерации терагерцового (дальнего инфракрасного) излучения при межзонном фотовозбуждении легированных мелкими примесями квантовых ям. Также были предложены и развиты методы повышения эффективности генерации такого примесного терагерцового излучения за счет введения дополнительного компенсирующего легирования в квантовые ямы, а также за счет реализации эффективного опустошения основного примесного состояния стимулированным ближним инфракрасным излучением. Сами источники терагерцового излучения на основе легированных квантовых ям с оптической накачкой могут стать альтернативой наиболее перспективным к настоящему времени терагерцовым квантово-каскадным лазерам, поскольку к первым главным образом не предъявляются столь высокие требования к ростовой технологии. Такие источники терагерцового излучения могут найти своё применение в медицине, системах безопасности и неразрушающего контроля, спектроскопии, поскольку в терагерцовом диапазоне спектра лежат полосы поглощения различных органических молекул и газов, а также такое излучение является более безопасным для живых организмов по сравнению, например, с широко используемым в медицине рентгеновским излучением.

Маховым И.С. также был впервые экспериментально обнаружен новый эффект – эффект увлечения фотонов током электронов в квантовых ямах, а также построено теоретическое описание данного эффекта. Экспериментально обнаружено изменение показателя преломления света в области межподзонных переходов вследствие направленного дрейфа электронов в квантовых ямах GaAs/AlGaAs для различных длин волн и поляризаций падающего излучения. Обнаруженный эффект имеет потенциальное практическое применение - для разработки малоинерционных модуляторов инфракрасного излучения, совместимых с мощными источниками среднего инфракрасного излучения, в том числе и для реализации источников излучения и модуляторов на одном чипе. Кроме того, обнаруженный эффект может быть использован для фундаментальных исследований параметров двумерного электронного газа в квантовых ямах.

Также Маховым И.С. детально исследовано влияние легирования как на излучательные, так и на поглотительные (равновесные и индуцированные внешним оптическим возбуждением) характеристики Ge/Si квантовых точек в инфракрасном и терагерцовом диапазонах спектра. Развитие Ge/Si наногетероструктур перспективно для интеграции с кремниевой электроникой за счет реализации излучающих устройств на кремнии, который сам по себе не пригоден для создания эффективных источников излучения на межзонных переходах.

Таким образом, на основе изложенного выше предлагается выдвинуть кандидатуру Махова И.С. на стипендию им. Ж.И. Алфёрова за высокий вклад в развитие фундаментальных научных исследований оптических свойств и явлений в полупроводниковых наногетероструктурах в инфракрасном и терагерцовом диапазонах спектра.

Значимость отмеченных выше научных результатов, полученных Маховым И.С., определяется возможностью создания физических основ приборов на основе обнаруженных и изученных оптических явлений в полупроводниковых наноструктурах как для технического применения, так и для развития новых фундаментальных исследований. Представленные результаты научной деятельности Махова И.С. могут быть внедрены в образовательный процесс по курсам физики полупроводников и наноструктур, физике горячих носителей заряда, квантовым генераторам света и др. в ведущих университетах России при подготовке научных и научно-педагогических кадров высшей квалификации.

Махов И.С. является действующим руководителем гранта РФФИ, а также соисполнителем работ по грантам РФФИ и Минобрнауки РФ. Также он являлся руководителем грантов РФФИ и Минобрнауки РФ, а также исполнителем работ по ряду грантов РФФИ, РФФИ, Минобрнауки РФ, грантов Президента РФ и др. Высокие научные достижения Махова И.С. также отмечены дипломом победителя конкурса грантов КНВШ Санкт-Петербурга для молодых ученых (2021, 2022 гг.). По материалам своего устного доклада на XXII Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике Махов И.С. отмечен программным комитетом конференции дипломом первой степени.

Результаты научной работы Махова И.С. опубликованы в ведущих научных журналах, индексируемых в наукометрических базах данных Scopus и WoS, и представлялись, в том числе им лично, на престижных Всероссийских и международных конференциях. Основные научные публикации за последние 3 года с краткой аннотацией представлены ниже.

[1] Makhov I., Ivanov K., Moiseev E., Dragunova A., Fominykh N., Shernyakov Y., Maximov M., Kryzhanovskaya N., Zhukov A. Two-state lasing in microdisk laser diodes with quantum dot active

region // *Photonics* **10** 235 (2023). В работе изучено явление двухуровневой лазерной генерации в микролазерах с дисковыми резонаторами различного диаметра с активной областью на основе самоорганизованных квантовых точек, излучающих в диапазоне 1.1-1.3 мкм. В микродисках диаметрами от 20 до 28 мкм двухуровневая генерация протекает при основном и первом возбужденном переходе квантовых точек, в то время как в микродисках диаметром 9 мкм она протекает при первом и втором возбужденных переходах квантовых точек. Изучена зависимость величины пороговых токов лазерной генерации от диаметра микродисковых лазеров, а также определены оптические потери в них.

[2] Makhov I., Ivanov K., Moiseev E., Fominykh N., Dragunova A., Kryzhanovskaya N., Zhukov A. Temperature evolution of two-state lasing in microdisk lasers with InAs/InGaAs quantum dots // *Nanomaterials* **13** 877 (2023). Экспериментально и теоретически изучены особенности температурной эволюции характеристик двухуровневой лазерной генерации в микродисковых лазерах с квантовыми точками. Моделирование характеристик двухуровневой генерации осуществлялось посредством решения скоростных уравнений для населенностей состояний квантовых точек, а также фотонных мод. Показано существенное влияние поглощения на свободных носителях заряда в волноводных слоях структур при повышенных токах инжекции и температурах.

[3] Zhukov A.E., Moiseev E.I., Nadtochiy A.M., Fominykh N.A., Ivanov K.A., Makhov I.S., Maximov M.V., Zubov F.I., Dubrovskii V.G., Mintairov S.A., Kalyuzhnyy N.A., Gordeev N.Yu., Shernyakov Yu.M., Kryzhanovskaya N.V. Optical loss in microdisk lasers with dense quantum dot arrays // *IEEE Journal of Quantum Electronics* **59**(1) 2000108 (2023). В работе предложен новый метод оценки уровня потерь в микролазерах с помощью анализа спектрально-пороговых характеристик и их сравнения с лазерами полосковой конструкции, созданными из той же эпитаксиальной пластины. Показано, что потери в микродисковых лазерах обратно пропорциональны диаметру резонатора.

[4] Makhov I.S., Budkin G.V., Grav S.V., Firsov D.A. Current induced drag of photons in GaAs/AlGaAs quantum wells // *Micro and Nanostructures* **167** 207288 (2022). Экспериментально обнаружен и исследован новый эффект – эффект увлечения фотонов током электронов в квантовых ямах GaAs/AlGaAs в области межподзонных переходов носителей заряда в инфракрасной области спектра. Определена зависимость величины изменения показателя преломления квантовых ям от амплитуды протекающего латерального тока для различных поляризаций излучения.

[5] Budkin G.V., Makhov I.S., Firsov D.A. The drag of photons by electric current in quantum wells // *Journal of Physics: Condensed Matter* **33** 165301 (2020). Впервые разработана микроскопическая теория нового эффекта - эффекта увлечения фотонов током электронов в квантовых ямах. Теоретически исследована зависимость диэлектрической проницаемости структуры с квантовыми ямами от взаимного направления электрического тока, протекающего в плоскости структуры, и волнового вектора света. Вычислены коэффициенты отражения, прохождения и поглощения излучения на основе решения волнового уравнения, в котором учтено влияние электрического поля излучения на электроны с помощью метода матрицы плотности.

[6] Zhukov A.E., Moiseev E.I., Nadtochiy A.M., Makhov I.S., Ivanov K.A., Dragunova A.S., Fominykh N.A., Shernyakov Yu.M., Mintairov S.A., Kalyuzhnyy N.A., Mikushev S.V., Zubov F.I., Maximov M.V., Kryzhanovskaya N.V. Dynamic characteristics and noise modelling of directly

modulated quantum well-dots microdisk lasers on silicon // *Laser Physics Letters* **19** 025801 (2022). Исследованы малосигнальный модуляционный отклик, пороговые и спектральные характеристики лазеров с InGaAs/GaAs квантовыми яма-точками микродисковой и полосковой геометрии. На основе совместного анализа рассчитана величина шума относительной интенсивности в микродисковых лазерах тока и величины подавления боковых мод.

[7] Vinnichenko M. Ya., Makhov I.S., Ustimenko R.V., Sargsian T.A., Sarkisyan H.A., Hayrapetyan D.B., Firsov D.A. Doping effect on the light absorption and photoluminescence of Ge/Si quantum dots in the infrared spectral range // *Micro and Nanostructures* **169** 207339 (2022). В работе представлены результаты комплексных спектральных исследований ближней инфракрасной фотолуминесценции и равновесного и фотоиндуцированного инфракрасного поглощения света в структурах с квантовыми точками Ge/Si с различным уровнем легирования акцепторами при различных температурах и мощностях оптического возбуждения. Обнаруженные спектральные особенности в спектрах люминесценции, а также их динамика с изменением уровня возбуждения и температуры решетки объясняются изменением интенсивностей прямой и не прямой в реальном пространстве излучательной электрон-дырочной рекомбинации в квантовых точках Ge/Si.

[8] Firsov D., Makhov I., Panevin V., Sarkisyan H., Vorobjev L. Optically pumped terahertz radiation sources based on impurity carrier transitions in quantum wells // *Optics and Its Applications. Springer proceeding in physics* **281** 21 (2022). В работе представлены результаты исследований терагерцовой люминесценции, связанной с примесными переходами электронов в квантовых ямах *n*-GaAs/AlGaAs в условиях межзонного оптического возбуждения неравновесных носителей заряда. Обсуждаются методы и принципы управления интенсивностью такого примесного терагерцового излучения.