

## Отзыв

официального оппонента на диссертационную работу М. С. Буяло  
“Особенности пассивной синхронизации мод в полупроводниковых  
лазерах на наногетероструктурах”, представленную на соискание ученой  
степени кандидата физико-математических наук по специальности  
01.04.10 – физика полупроводников

Диссертационная работа М. С. Буяло посвящена изучению особенностей пассивной синхронизации мод в полупроводниковых лазерах различных конструкций и с различными типами активных областей, включая квантовые ямы и квантовые точки. В настоящее время генерация сверхкоротких лазерных импульсов со сверхвысокими частотами следования рассматривается как весьма перспективное направление для создания нового поколения телекоммуникационных систем, скоростной передачи больших объёмов информации, спектроскопии, изучения и стимулирования различных химических процессов, а также процессов, протекающих в биологических системах. Использование для этих целей компактных полупроводниковых лазеров считается при этом одним из наиболее обещающих технических решений. С другой стороны, многие вопросы, связанные с выбором оптимальной конструкции лазеров и, в частности, наиболее подходящей активной среды, со стабильностью амплитуды, частоты следования и длительности лазерных импульсов, положения их спектральных линий, выбора оптимальной конструкции насыщающегося поглотителя и т. д., всё ещё остаются не до конца прояснёнными. В связи с этим, **актуальность темы диссертационной работы М. С. Буяло** как с научной точки зрения, так и для практики не вызывает сомнения.

В качестве позитивного аспекта диссертационной работы хотелось бы отметить использованный в ней комплексный подход к исследованию протекающих процессов, где в дополнение к характеристикам самого лазерного диода детально изучаются спектры поглощения света в насыщающемся поглотителе, их зависимости от приложенного смещения, спектры усиления лазерного диода, а также делаются необходимые оценки положения уровней энергии в квантовых ямах с целью интерпретации получаемых данных. Кроме того, в работе используется ряд оригинальных подходов к определению параметров лазеров, которые трудно измерить непосредственно: например, производится оценка стабильности частоты следования лазерных импульсов по ширине измеряемой радиочастотной линии.

В результате выполнения работы М. С. Буяло получен ряд результатов, обладающих несомненной **научной новизной**. К ним следует отнести

- установление корреляции между конструкцией (шириной) волноводных слоёв лазерной структуры и стабильностью частоты следования лазерных импульсов в режиме пассивной синхронизации мод
- демонстрацию сильного влияния экситонного эффекта на поглощение света в насыщающемся поглотителе и, как следствие, на возможность реализации и устойчивость режима пассивной синхронизации мод

- выявление роли диагональных оптических переходов в структурах с двумя туннельно-связанными квантовыми ямами в формировании края поглощения света в насыщающемся поглотителе
- выявление особенностей пассивной синхронизации мод в лазерных структурах с квантовыми точками, включая массивы вертикально-коррелированных точек

**Практическая значимость** диссертационной работы определяется предложенными и апробированными в ней новыми техническими решениями, направленными на получение устойчивого режима пассивной синхронизации мод, а также полученной детальной информации об особенностях работы лазеров с различными активными средами в этом режиме. Среди полученных результатов следует отметить

- значительное повышение стабильности частоты следования лазерных импульсов за счёт простой и технологичной оптимизации параметров волноводных слоёв лазерной гетероструктуры
- разработку конструкции и реализацию режима пассивной синхронизации мод в лазерах с двумя асимметричными квантовыми ямами, позволяющими достичь этого режима при малых обратных смещениях секции насыщающегося поглотителя (такая конструкция активной области пригодна также для создания эффективных оптических модуляторов)
- результаты детального исследования эффекта Штарка в структурах с квантовыми ямами и квантовыми точками, дающими основу для оптимизации конструкции секции насыщающегося поглотителя
- полученную экспериментальную информацию о поляризационно-чувствительном поглощении света в структурах с вертикально-коррелированными квантовыми точками

**Обоснованность и достоверность** результатов, полученных автором, определяется использованным в диссертационной работе и отмеченным выше комплексным подходом к исследованию, внутренней согласованностью результатов основных и вспомогательных исследований, корреляцией ряда полученных результатов с аналогичными, имеющимися в литературе, и детальной интерпретацией наблюдаемых эффектов, приводимой автором практически на всех стадиях исследования.

По содержанию диссертации имеются следующие **замечания**:

1. В сравнительном анализе пассивной синхронизации мод в лазерах с широким и узким (с градиентом состава) волноводом автор оценивает характерное время транспорта носителей к квантовой яме, предполагая диффузионный характер переноса в первом и дрейфовый во втором случае (глава 1). Такое разделение механизмов не вполне корректно, т. к., согласно имеющимся результатам моделирования таких структур, и в том и в другом случае перенос носителей имеет смешанный характер, и большую роль в нём играет электрическое поле р-п перехода в номинально нелегированных вол-

новодных слоях, а также существенно различная концентрация электронов и дырок, соответствующая одной и той же плотности тока в разных структурах. Поэтому вывод о существенно разных (различающихся на порядок) временах транспорта носителей в структурах с узким и широким волноводом требует более тщательного обоснования. Кроме того, для более корректного сравнения работы лазеров с широким и узким волноводом в режиме пассивной синхронизации мод нужен также анализ влияния побочных факторов, таких, например, как нанесение антиотражающего покрытия на выходное зеркало в первом и отсутствие такого покрытия во втором случае.

2. В главе 4 автором отмечается, что близкое расположение друг к другу вертикально-коррелированных квантовых точек приводит «к туннельному связыванию и изменению поляризационных свойств структуры». Данное утверждение относится к GaAs барьерам между слоями квантовых точек толщиной 6 нм. В то же время, в предыдущей главе было показано, что GaAs барьеры толщиной 4 нм уже слишком широки, чтобы обеспечить эффективное туннелирование через них электронов из одной квантовой ямы в другую. Поэтому вывод о том, что наблюдаемое небольшое различие в поглощении ТЕ- и ТМ-поляризованного света в системе вертикально-коррелированных квантовых точек связано с туннелированием носителей требует более тщательного обоснования или же прямого экспериментального сравнения со структурой, где такая корреляция заведомо отсутствует.
3. По оформлению диссертационной работы: многие обозначения в ней не расшифровываются в тексте, и часто используется «научный жаргон», что затрудняет чтение.

В качестве пожелания, оставленного для будущих исследований, хотелось бы отметить возможную связь диагональных оптических переходов в структуре с двумя асимметричными квантовыми ямами с преимущественной поляризацией поглощаемого ими излучения.

В целом, перечисленные замечания не снижают ценности проведенного исследования и полученных в нем результатов. Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, выполненным автором самостоятельно и на высоком научном уровне. Основные результаты диссертации опубликованы в 9 печатных работах в изданиях, рекомендованных ВАК, они неоднократно обсуждались на различных отечественных и международных конференциях и получили одобрение специалистов. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Результаты исследований могут представлять интерес для следующих организаций: Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, АО «НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха», Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО, ООО «Коннектор Оптикс», ООО «Полупроводниковые приборы» и других исследовательских и промышленных организаций, занимающихся исследованием и производством полупроводниковых лазеров.

Данная диссертационная работа отвечает требованиям Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор Буяло Михаил Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Карпов Сергей Юрьевич,  
ведущий инженер-физик  
ООО «Софт-Импакт»,  
а/я 83, пр. Энгельса 27, 194156,  
Санкт-Петербург,  
кандидат физико-математических наук  
тел. +7 911 944 3005  
E-mail: [sergey.karpov@str-soft.com](mailto:sergey.karpov@str-soft.com)

\_\_\_\_\_

Подпись к.ф.-м.н., Карпова С.Ю. заверяю  
Финансовый директор ООО «Софт-Импакт»

\_\_\_\_\_ /Е.Н.Шалаева/

3 апреля 2017 г.