

ОТЗЫВ

ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Атращенко Александра Васильевича «Синтез и оптические свойства метаматериалов на основе пористых полупроводников $A^{III}B^V$ и Si» представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10- Физика полупроводников.

Тема работы актуальна. Это определяется тем, что развитие информационных технологий, микро – опто- и наноэлектроники, квантовой оптики, нанофотоники и др., требуют метаматериалы, работающих в оптическом и его окрестностях диапазонах. Размеры нанообъектов, являющихся основным элементом таких наноструктур единицы и десятки нанометров и это серьезно затрудняет разработку технологий изготовления метаматериалов, обладающих заданными и стабильными оптическими свойствами.

Работа представляет собой экспериментальное научное исследование, состоящее из двух этапов: развитие методов электрохимического получения пористых кристаллов полупроводников $A^{III}B^V$ и Si и диэлектрика Al_2O_3 и синтеза сред из металлических проводов на их основе и их изготовления; экспериментальное исследования оптических свойств изготовленных нанопроволочных метаматериалов в оптическом и инфракрасном диапазоне частот и изучении эмиссии терагерцового излучении нанопористыми полупроводниковыми матрицами GaP возбуждаемого фемтосекундными импульсами света.

В ходе исследований для изготовления пористых кристаллов полупроводников $A^{III}B^V$ и Si диссертант использовал метод импульсного

анодного электрохимического травления. Осаждение металла в нанопоры полупроводниковой матрицы проводилось в импульсном режиме (амплитуда импульса до 15 вольт), что позволило добиться осаждения металла начиная со дна пор. У полученных таким образом проволочных метаматериалов различной толщины исследовались оптические свойства, включая эмиссию терагерцового излучения, возбуждаемого фемтосекундными импульсами света оптического и инфракрасного диапазонов с использованием стандартных методов. Проводилось численное моделирование показателя преломления и эффективной диэлектрической проницаемости проволочных метаматериалов с использованием модели Максвелла-Гарнетта.

В результате исследований получен ряд, обладающих **научной новизной и практической ценностью** результатов.

В том числе указано, что в основе процесса порообразования в полупроводниковых соединениях $A^{III}B^V$ лежат кооперативные реакции нуклеофильного замещения, а использование импульсного травления для изготовления пористых кристаллов полупроводников $A^{III}B^V$ позволяет избежать ограничения на толщину пористого слоя и получать слои толщиной до несколько сотен мкм.

В частности впервые обнаружено, что использование нанопористых полупроводниковых матриц (на примере GaP) в качестве источника терагерцового излучения возбуждаемой фемтосекундными импульсами оптического диапазона может увеличивать интенсивность эмиссии на три и более порядка по сравнению с объемным материалом.

Предложено и обосновывается утверждение, что нанопористые матрицы на примере InP) и нанопроволочные металлические среды (на примере золотых нанопроволок) на основе соединений $A^{III}B^V$ являются оптическими метаматериалами с эффективной диэлектрической проницаемостью и поляризационными свойствами определяемые направлением пор относительно кристаллографических направлений матрицы.

Диссертация состоит из шести глав, введения, заключения, списка цитируемой литературы и приложения. Первая глава содержит обстоятельный обзор и анализ литературы посвященной теме диссертации.

Во второй главе представлены конкретные методики реализации метода анодного электрохимического травления использованного Атращенко А.В. и приводятся, модельные представления, на основе которых были разработаны эти методики. Результаты использования этих методик легли в основу одного из положений, вынесенных на защиту.

Третья и четвертая главы посвящены описанию создания сред из металлических проводов в матрице Si и экспериментальному с элементами численного моделирования исследованию оптических свойств полученных метаматериалов. Результаты этих исследований позволили Атращенко А.В. сформулировать одно из защищаемых положений.

В пятой главе представлены результаты экспериментального исследования и теоретического моделирования особенностей поляризации света прошедшего через нанопористую полупроводниковую (InP) пластинку с различным направлением пор и их заполнением. Результаты этих исследований легли в основу следующего защищаемого положения.

Результаты экспериментальных исследований терагерцовой эмиссии нанопористых матриц GaP и GaAs, возбуждаемой фемтосекундными оптическими и инфракрасными импульсами изложены в шестой главе. Отмечается, что природа наблюдаемой эмиссии, в отличие от эмиссии объемных полупроводников, не может быть объяснена эффектом оптического выпрямления. Указывается на существенную зависимость интенсивности эмиссии от энергии квантов света возбуждения. Эти результаты положены в основу последнего защищаемого положения.

По своей сути диссертация является экспериментальным исследованием, в котором использовались адекватные задачам экспериментальные методы, методики и оборудование. В области моделирования диссертант использовал известные и хорошо зарекомендовавшие себя модели в целом

соответствующие наблюдаемым процессам. Поэтому результаты диссертации можно считать **достоверными**.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что Атращенко А.В. предложил схему процесса порообразования в полупроводниках типа $A^{III}B^V$, отличную от известной модели “current – bust” и, в которой образование пор происходит при активном участии кооперативных реакциях нуклеофильного замещения на поверхности кристалла.

Практическая значимость заключается в том, что результаты диссертационной работы могут быть эффективно использованы для разработки и создания различных оптических и терагерцовых наноструктурированных метаматериалов, приборов и устройств на базе полупроводников типа $A^{III}B^V$, с заданными функциональными возможностями.

Представленные к защите положения являются обобщением полученных диссертантом в ходе выполнения исследований экспериментальных результатов, обладают научной новизной и практической значимостью и в полной мере представлены в работах диссертанта (26 научных работ, из которых 8 опубликованы в журналах из списка ВАК и зарубежных журналах).

Из опубликованных Атращенко А.В. работ можно выделить следующие работы, которые наиболее полно отражают защищаемые положения:

1. A. Atrashchenko, A. Arlauskas, and et.al. Giant Enhancement of Terahertz Emission from Nanoporous GaP / Applied Physics Letters. 2014.V.105, № 20. P. 191905.
2. А.В. Атращенко, А.А. Красилин, И.С. Кучук, Е.М. Арысланова, С.А Чивилихин, П.А. Белов Электрохимические методы синтеза гиперболических метаматериалов//Наносистемы: физика, химия, математика. 2012. Т. 3, № 3.

3. A.V. Atrashchenko, V.N. Katz, V.P. Ulin, V.P. Evtikhiev, V.P. Kochereshko
Fabrication and optical properties of porous InP structures // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. 2012. V. 44, № 7. Pp. 1324—1328.
4. A. Atrashchenko, A. Nashchekin, M. Mitrofanov, V.P. Ulin, V.P. Evtikhiev
Wire metamaterial based on semiconductor matrices // Phys. Status Solidi - Rapid Res. Lett. 2014. V. 8, № 4. Pp. 325—327.

Автореферат правильно и полно отражает основное содержание диссертации. Работа в основном написана грамотным русским и правильным научным языком.

В целом диссертационная работа представляет собой идейно и внутренне связанное исследование, в котором Атращенко А.В. получил ряд обоснованных новых и оригинальных экспериментальных результатов, являющихся решением задач, имеющих важное значение для развития технологий изготовления и применения наноструктурированных материалов и фотоники.

Диссертация как научно-квалификационная работа производит хорошее впечатление, но при этом к ней имеются замечания, связанные с представлением результатов.

1. В тексте работы практически отсутствуют ссылки на работы диссертанта, в которых обсуждаются представляемые в диссертации результаты.
2. В работе отсутствует обоснование утверждения, что предложенная модель процесса порообразования в полупроводниках типа $A^{III}B^V$, отличается от известной модели “current – bust”.
3. В главе, которая посвящена эмиссии терагерцового излучения пористой матрицей GaP отсутствует сравнение интенсивности излучения с известными источниками одного цикла, такими как фотопроводящие антенны или InAs. Не приведены результаты измерений мощности эмиссии терагерцового излучения.
4. В главе 3, показатель преломления сильно-анизотропного материала (среда из металлических проводов в кремниевой матрице) определялся с помощью

численного решения уравнения Френеля для изотропной среды. Такое решение можно назвать весьма приблизительным и его выбор требует дополнительных пояснений.

Приведенные замечания не ставят под сомнение достоверность защищаемых положений.

Считаю, что диссертация Атращенко Александра Васильевича **“Синтез и оптические свойства метаматериалов на основе пористых полупроводников $A^{III}B^V$ и Si ”** является научно-квалификационной работой и соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а Атращенко Александр Васильевич достоин присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10- Физика полупроводников.

Официальный оппонент
д.ф.-м. н., главный научный сотрудник,
Отдел оптоэлектронных методов
исследования газообразных и конденсированных
сред, ФГБУН института Автоматики и процессов
управления ДВО РАН
690041 , Владивосток, ул. Радио 5,
ФГБУН ИАПУ ДВО РАН.
E- mail vdzyuba@iacp.dvo.ru.
Тел. 8 924 336 18 90

Дзюба В.П.

18.12.2015