

Отзыв официального оппонента на диссертацию К.Г. Беляева
**«Плазмонные эффекты в композитных металл-полупроводниковых
структурах на основе соединений A₂B₆ И A₃N»**

представляемую на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников.

Актуальность темы

Представленное в работе исследование эффекта экситон-плазмонного взаимодействия в металл-полупроводниковых композитных образцах на основе эпитаксиальных полупроводниковых гетероструктур носит фундаментальный характер, но, в то же время имеет существенное прикладное значение для развития оптоэлектроники видимого и УФ спектральных диапазонов. В качестве нового направления нанопластики, наноплазмоники, в рамках которой изучаются плазмонные эффекты, является основой для создания принципиально новых метаматериалов с уникальными оптическими свойствами, многие из которых до конца не исследованы. К таким метаматериалам относятся и композитные структуры, исследуемые в работе. С практической точки зрения реализация и оптимизация условий экситон-плазмонного взаимодействия в металл-полупроводниковых структурах интересна вследствие возможности увеличения внутренней квантовой эффективности эпитаксиальных полупроводниковых гетероструктур с большими собственными безызлучательными потерями. Использование плазмонных металлов Au и Al в металл-полупроводниковых структурах позволяет в принципе добиться увеличения эффективности излучения в спектральных диапазонах 260-300 нм и 560-650 нм, где современные эпитаксиальные полупроводниковые приборы характеризуются низкой эффективностью и, как следствие, ограниченным применением в оптоэлектронике.

Достоверность и новизна результатов диссертации

К моменту начала диссертационной работы отсутствовало детальное понимание оптических свойств наноконпозитов на основе Au (и Al) и

условий необходимых для реализации плазмонного усиления квантовой эффективности эпитаксиальных полупроводниковых структур. В диссертационной работе показано, что естественной степени шероховатости эпитаксиальных гетероструктур оказывается, как правило, недостаточно для вывода излучения поверхностных плазмон-поляритонов и для усиления люминесценции в резонансных спектральных диапазонах по сравнению с люминесценцией исходных гетероструктур. Более эффективным оказывается использование исходных эпитаксиальных структур с трехмерным (например, наноклончатый) рельефом, однако, в этом случае механизмом усиления люминесценции является возбуждение локализованных поверхностных плазмонов с принципиально иными оптическими свойствами.

Впервые продемонстрировано сильное локальное увеличение (до двух порядков величины) интенсивности фотолюминесценции в композитных структурах на основе наноклончатого InGaN коллоидными наночастицами золота. На основе обобщения результатов экспериментов с пленками металлов и коллоидными наночастицами, а также на основе результатов проведенного расчета усиления люминесценции точечного диполя в ближнем поле сферической наночастицы золота предложена новая конструкция композитной структуры в виде наноразмерных включений золота, естественным образом получающихся при напылении золота на наноклонны InGaN. В таких композитных структурах впервые достигнуто интегральное по площади увеличение интенсивности люминесценции в 7 раз, при котором квантовая эффективность наноклонн InGaN состава 25 - 35% по In, излучающих в желто-оранжевой спектральной области, становится сравнима с эффективностью «зеленого» InGaN состава 20%.

Следует отметить преимущество использования в работе точной электродинамической модели усиления излучения точечного диполя в ближнем оптическом поле сферической наночастицы золота. Именно

данная модель позволила учесть мультипольную структуру плазмонных резонансов и определить дополнительные условия резонансного возбуждения локализованных плазмонов. А обобщение результатов модели на наночастицы произвольной формы и, в том числе, на включения золота сложной формы между наноколоннами InGaN позволило теоретически обосновать наблюдаемую особенность критической зависимости усиления люминесценции в композитных структурах от наличия слоя диэлектрика с диэлектрической проницаемостью равной 7.

Достоверность результатов и выводов работы не вызывает сомнений. Экспериментальные исследования проводились с использованием высокоточных измерительных методик и современных экспериментальных средств. Исследование плазмонных эффектов в композитных структурах включало подробное изучение свойств и особенностей явления увеличения интенсивности люминесценции, а результаты исследований согласуются с используемыми теоретическими моделями усиления излучения точечного диполя в композитных структурах разного типа.

Степень обоснованности научных положений и выводов

Защищаемые положения достаточно полно обоснованы экспериментальными данными и согласованностью экспериментальных результатов с общепринятыми теоретическими моделями плазмонных эффектов в композитных структурах. Обоснованность научных положений и выводов работы подтверждена публикациями содержащихся в них результатов исследований в реферируемых журналах и докладами на научных конференциях.

Научная значимость работы заключается в исследовании проявления эффектов экситон-плазмонного взаимодействия в ряде новых композитных структур принципиально разного типа, полученных на основе различных эпитаксиальных полупроводниковых гетероструктур, а также в экспериментальном подтверждении возможности оптимизации конструкции композитных структур с Au и Al с целью значительного

увеличения эффективности люминесценции исходных гетероструктур, излучающих в желто-красном спектральном диапазоне, где требуется увеличение внутренней квантовой эффективности.

Практическая значимость работы заключается в разработке оптимальной конструкции композитной структуры InGaN/Au для получения наибольшего возможного усиления внутренней квантовой эффективности исходной полупроводниковой структуры наноклончатого $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ с составом по индию более 22%. Усиление желто-красной люминесценции данного материала вплоть до значений, полученных для аналогичных структур с малым составом по индию (20%), дает в перспективе возможность использования гибридных структур InGaN/Au в качестве основы для светодиодов практически всего видимого диапазона, обеспечивающих приемлемый уровень яркости излучения.

Вместе с тем необходимо отметить следующие замечания и вопросы:

- 1) При интерпретации плазмонного эффекта в структурах ZnCdSe/Au остается нераскрытой причина особенной температурной зависимости интегральной интенсивности фотолюминесценции композитной структуры (рис. 34). Остается открытым вопрос, о вкладе плазмонного механизма в уменьшении интенсивности люминесценции почти в 10 раз по сравнению с референсной структурой.
- 2) Нет интерпретации усиления в 10 раз люминесценции квантовых точек CdSe золотой наночастицей диаметром 100 нм (рис. 48), хотя согласно теоретическим расчетам (рис. 49) усиление в данной структуре не может превышать значения 1.5-1.8.
- 3) В связи с физическими принципами самого механизма плазмонного усиления желательными для обоснования природы усиления интенсивности люминесценции в структурах InGaN/Au (Глава 5) были бы измерения времен затухания люминесценции.
- 4) Для интерпретации результатов плазмонных эффектов в нанокompозитах InGaN/Au (Глава 5) желательны аналитические расчеты усиления

точечного диполя вблизи наночастицы более сложной несферической формы, например, сфероидной.

Указанные замечания носят характер пожеланий и не снижают общего хорошего впечатления о работе.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

По объему экспериментальных исследований, актуальности темы диссертации, новизне и степени обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, рецензируемая работа полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор – Беляев Кирилл Геннадьевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Официальный оппонент

Профессор, д.ф.-м.н.

«26» ноября 2014 года

Н.А. Гиппиус

Место работы оппонента:

Сколковский институт науки и технологий

143025, Московская обл., Одинцовский р-н,

Сколково, ул. Новая, д.100,

телефон: +7 495 280 14 81 доб. 3461 эл. почта: N.Gippius@skoltech.ru

«Подпись Н.А. Гиппиуса удостоверяю»

Директор по управлению персоналом и операционными вопросами

Сколковского института науки и технологий

Т.А. Шубина

