

Температурное переключение резонаторных мод в микрокристаллах InN

© Д.Р. Казанов[†], В.Х. Кайбышев, В.Ю. Давыдов, А.Н. Смирнов, В.Н. Жмерик, Н.В. Кузнецова, П.С. Копьев, С.В. Иванов, Т.В. Шубина

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 22 апреля 2015 г. Принята к печати 12 мая 2015 г.)

Оптические резонаторы на основе микрокристаллов InN, в которых возможно существование мод шепчущих галерей низких порядков вплоть до комнатной температуры, были сформированы молекулярно-пучковой эпитаксией на профилированных подложках. Обнаруженное явление переключения типа мод при подъеме температуры объяснено изменением оптических параметров вследствие сдвига и изменения формы края поглощения. Результаты моделирования, проведенного с учетом изменения показателя преломления, воспроизводят характерные распределения интенсивности электромагнитного поля в резонаторах.

1. Введение

Резонансные стоячие волны, так называемые моды шепчущей галереи (whispering gallery mode — WGM), возникают в замкнутых оптических системах за счет эффекта полного внутреннего отражения. Нарастающий интерес к ним связан с необходимостью усиления слабых сигналов квантовых излучателей путем применения оптических резонаторов различных типов. Среди них наиболее исследованными являются планарные микрорезонаторы — брэгговские структуры с диэлектрическими или полупроводниковыми зеркалами, сложность производства которых общеизвестна. В то же время благодаря современным средствам технологии микроструктур появляется возможность создания оптических резонаторов с WGM в виде микродисков, колонн и других подобных объектов [1]. Можно выделить два основных способа создания таких резонаторов: 1) эпитаксиальной технологией, допускающей создание активной области внутри резонатора в том же ростовом цикле [2], и 2) литографией с использованием сухого или жидкого травления [3]. Наряду с развитием технологии формирования WGM микрорезонаторов происходило теоретическое исследование модового состава в таких резонаторах. В частности, одними из первых были исследованы моды низких порядков в гексагональных микроколоннах ZnO различных размеров [4,5]. Также изучались условия существования мод и их свойства в зависимости от типа и порядка мод в цилиндрических резонаторах [6], а также характеристики резонаторов, имеющих конусообразную форму [7].

Недавно нами была продемонстрирована возможность создания оптических резонаторов в виде микрокристаллов, формируемых в процессе роста методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на профилированных подложках [8]. Такие резонаторы представляются перспективными для создания микролазеров и источников одиночных фотонов, где требуется усиление слабой интенсивности излучения двухуровневой

системы за счет эффекта Парселла. Как правило, для этой цели используются WGM высокого порядка, поскольку они соответствуют более высокой добротности резонатора. Это накладывает ограничения на размеры кристаллов, которые должны быть в этом случае достаточно большими. В данной работе исследуется возможность применения для этой цели мод низкого порядка, возбуждаемых в микрокристаллах InN, которые имеют форму перевернутой гексагональной пирамиды. Анализируется обнаруженное явление температурного переключения доминирующего типа оптических мод в таких микрокристаллах и демонстрируется, что это явление может быть обусловлено изменением показателя преломления полупроводникового материала при сдвиге края поглощения, вызванном температурой.

2. Изготовление и оптические свойства образцов

Структуры изготавливались МПЭ с плазменной активацией азота на профилированных $c\text{-Al}_2\text{O}_3$ подложках с полусферическими микровыступами, имевшими диаметр и высоту 3 и 1.5 мкм соответственно. За счет разности латеральной и вертикальной компоненты скорости роста на части выступов (от 15 до 20% от общего количества выступов) образуются микрокристаллы, имеющие специфическую форму перевернутой гексагональной пирамиды (рис. 1). Согласно микроAMANовским исследованиям, структурное качество сформированных микрокристаллов выше, чем у окружающей области. Плоская вершина микрокристаллов имеет гладкую поверхность с составом, близким к стехиометрии [8]. Следует отметить, что по данным, полученным по результатам энергодисперсионного рентгеновского микроанализа (EDX), наблюдается уменьшение соотношения In/N на периферии кристаллов, что исключает влияние эффекта Парселла, связанного с плазмонными резонансами в частицах металлического In, на возможное усиление оптического сигнала.

[†] E-mail: kazanovdr@gmail.com

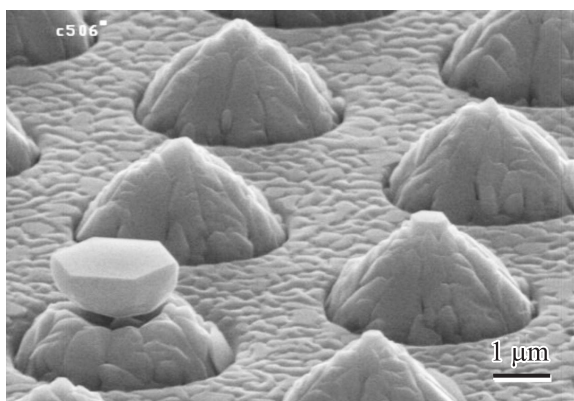


Рис. 1. Изображение микрокристаллов InN, полученное методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

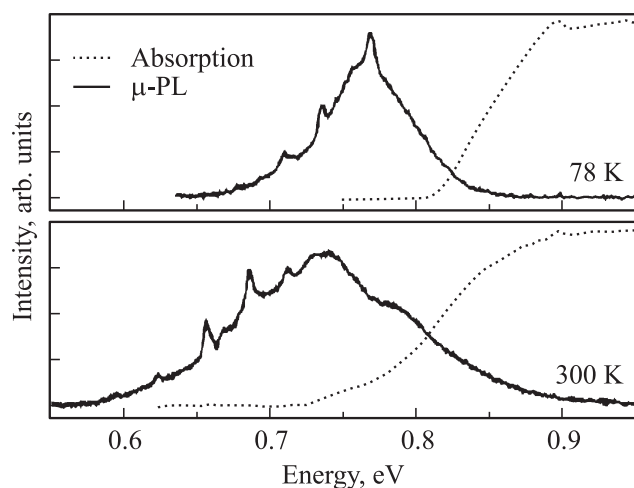


Рис. 2. Спектры микрофотолюминесценции и поглощения при низкой и комнатной температурах. Измерения μ -ФЛ проводились при фокусировке лазерного пучка на одном и том же кристалле.

Для общего представления о составе мод и его изменении с температурой данные структуры исследовались методом спектроскопии микрофотолюминесценции (μ -ФЛ). Спектры μ -ФЛ регистрировались при возбуждении лучом лазера с длиной волны 532 нм, сфокусированным в пятно с диаметром порядка одного микрона. Спектры поглощения таких структур были получены из данных по пропусканию и отражению излучения лампы накаливания; они характеризуют интегральные свойства площади около 1–2 мм², включающей кристаллы и планарный слой InN между ними. Результаты этих исследований приведены на рис. 2.

Картинки распределения излучения из микрорезонаторов, полученные методом спектроскопии микрофотолюминесценции (μ -КЛ), представлены на рис. 3. Они показывают, что при низкой температуре в кристаллах доминирует азимутальный тип мод, при котором максимальная интенсивность излучения наблюдается на периферии кристалла. Однако при повышении температуры (до ~ 80 – 100 К) наблюдается изменение типа мод, который при 300 К становится по преимуществу радиальным. Ему соответствует максимальная плотность электромагнитной энергии в центре кристалла.

Сопоставление характера распределения оптических мод и их частот, соответствующих узким линиям в спектрах μ -ФЛ, со спектрами поглощения выявило ряд особенностей: 1) моды на коротковолновом краю спектров излучения гасятся поглощением в кристалле; 2) при температурном сдвиге края поглощения моды могут усиливаться, если они достаточно далеко отстоят от края поглощения; 3) новые моды могут возгореться на длинноволновом краю полосы излучения. Таким образом, мода, будучи самой интенсивной при низкой температуре, может гаситься краем поглощения при комнатной температуре, уширенным и сдвинутым в длинноволновую область.

Отметим, что изменением с температурой оптическим параметрам полупроводника должен соответство-

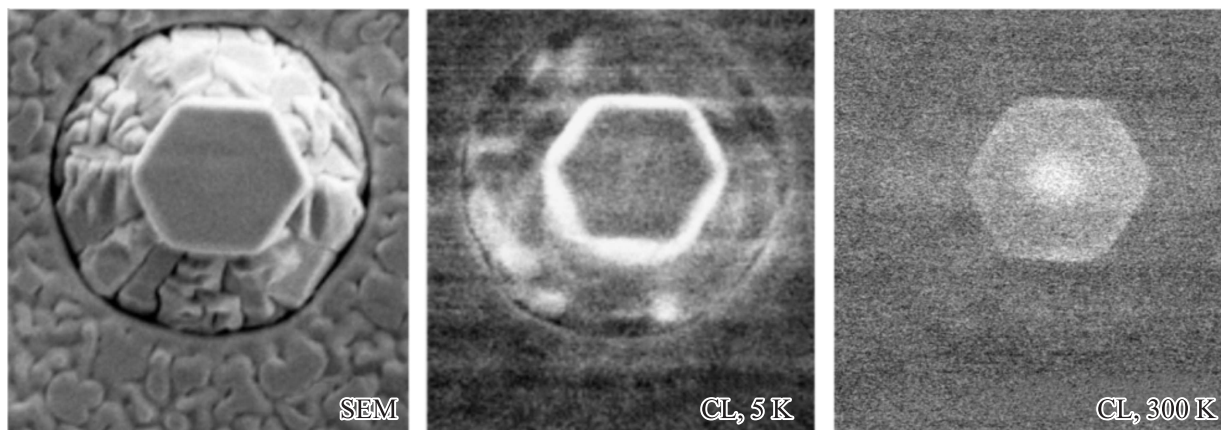


Рис. 3. (Слева направо): изображения микрокристалла, полученные сканирующей электронной микроскопией и катодолуминесценцией при 5 и 300 К.

Экспериментальные и теоретические частоты оптических мод в микрорезонаторе с максимальным диаметром ~ 2.2 микрона, а также соответствующие распределения полей, определенные для двух температур

Энергия (эВ) эксперимент/расчет	Распределение поля	Энергия (эВ) эксперимент/расчет	Распределение поля
77 К		300 К	
0.688/0.690		0.623/0.625	
0.711/0.709		0.655/0.673	
0.734/0.721		0.685/0.685	
0.747/0.756		0.711/0.709	
0.768/0.762		0.738/0.739*	

Примечание. * Аналогичная мода, повернутая на 90°, не приводится из соображений наглядности.

вать несколько иной модовый состав в микрокристалле. В простейшем цилиндрическом приближении собственные частоты резонаторных мод m -го порядка определяются как $\omega \propto mc/Dn$, где c — скорость света в вакууме, D — диаметр цилиндра, а n — показатель преломления. При постоянном D , а это условие выполнялось путем измерения спектров излучения из одного и того же кристалла, изменения частот и типа мод могут быть приписаны только изменению n .

3. Моделирование оптических мод в микрокристаллах InN

Для определения температурной зависимости показателя преломления, необходимой для моделирования, были использованы данные по измерению интегральных спектров пропускания и отражения. Комплексная диэлектрическая функция в прикрасовой спектральной области находилась из совместного анализа этих спектров, используя соотношения Крамерса-Кронига:

$$\epsilon_1(\omega) - 1 = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{x\epsilon_2(x)}{x^2 - \omega^2} dx,$$

где

$$\begin{cases} \epsilon_1 = n^2 - k^2 \\ \epsilon_2 = 2nk \end{cases}$$

Результат определения температурных зависимостей показателя преломления для ряда частот, попадающих в полосу излучения InN, приведен на рис. 4.

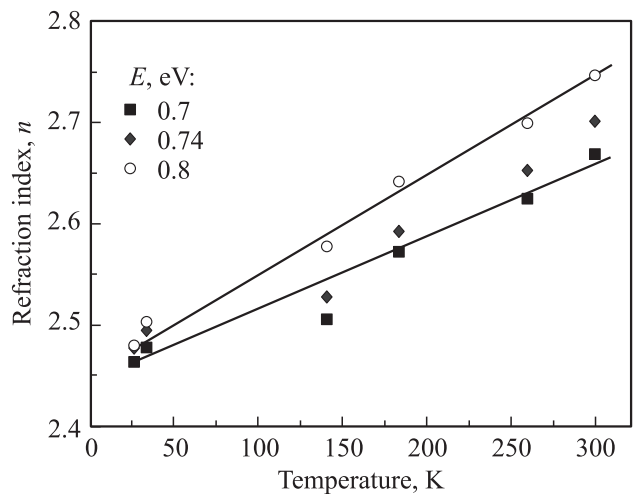


Рис. 4. Зависимости показателя преломления от температуры, найденные для трех различных энергий в пределах полосы излучения.

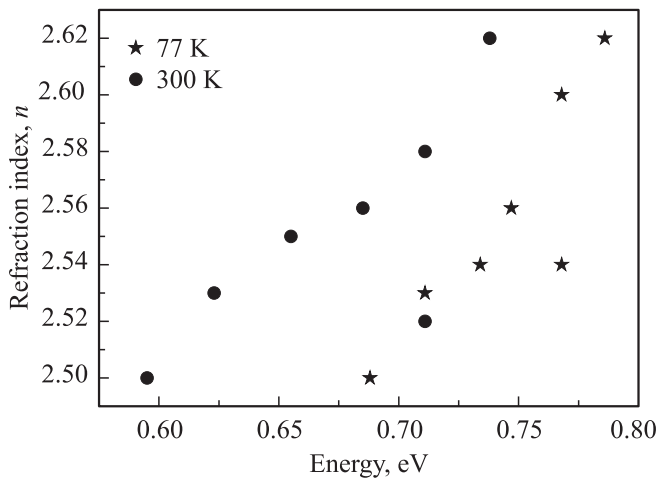


Рис. 5. Дисперсия показателя преломления при низкой (77 К) и комнатной (300 К) температурах, найденная из подгонки частот оптических мод в микрорезонаторах на основе InN.

Используя полученные спектральные зависимости показателя преломления, было произведено моделирование оптических мод в микрокристаллах InN. Оно проводилось численным методом с использованием пакета программ Comsol Multiphysics, позволяющим рассчитать возможные частоты и пространственное распределение интенсивности электромагнитного поля внутри резонатора путем решения уравнений Максвелла. В первом приближении для расчета использовались данные по дисперсии показателя преломления, найденные из анализа интегральных спектров. Перевернутые гексагональные пирамиды заменялись усеченными конусами, размеры которых (высота, верхний и нижний радиусы) определялись из данных сканирующей электронной микроскопии. Граничные условия выбирались таким образом, чтобы волны экспоненциально затухали при выходе из кристалла. Затем было проведено уточнение частот мод путем варьирования показателя преломления с целью достижения наилучшего совпадения с экспериментальными данными.

В результате моделирования была составлена таблица рассчитанных и зарегистрированных в эксперименте по измерению μ -ФЛ частот оптических мод и определен соответствующий им вид распределения интенсивности электромагнитного поля (см. таблицу). Найденные собственные частоты попадают в диапазон 0.65–0.8 эВ, в котором находится полоса излучения InN. Уточненные значения показателя преломления, которые возрастают при приближении к краю поглощения, примерно так же, как было найдено из анализа оптических спектров, приведены на рис. 5.

Таким образом, проявление оптической дисперсии показателя преломления и ее изменение с температурой сильно влияют на спектр модовых состояний в резонаторах на основе микрокристаллов InN. Необходимо отметить, что из теоретического моделирования следует, что моды шепчущей галереи азимутального

типа преобладают над радиальными модами при низких температурах. Ситуация меняется на обратную при комнатной температуре. Именно это и наблюдается в эксперименте. Как представляется, основная причина этого — сдвиг края поглощения в длинноволновую область, приводящий к гашению мод высоких порядков при увеличении температуры. Модификация же модового состава пространственного распределения энергии обусловлена изменением показателя преломления материала микрокристаллов.

Стоит обратить внимание на то, что показатели преломления на рис. 4 и 5 несколько отличаются. По-видимому, это связано с тем, что на рис. 4 приведены данные, характеризующие структуру в целом, включая микрокристаллы и слой между ними. Известно, что InN представляет собой сильно дефектный материал, поэтому измеренные интегральные спектры несут информацию не только о фундаментальном крае поглощения, но также и о „хвосте“ состояний, которые характерны для сильно компенсированных полупроводников [9,10]. Данные, приведенные на рис. 5, отражают оптические свойства именно материала микрокристаллов, где возбуждаются оптические моды. Как отмечалось выше, их качество лучше, чем у окружающей области. Поэтому способ определения показателя преломления путем моделирования модовых частот в резонаторах представляется более точным.

4. Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о возможности усиления сигнала в ближней инфракрасной области оптическими модами низких порядков в резонаторах на основе микрокристаллов InN. Показано, что изменение комплексной диэлектрической функции материала резонатора с температурой влияет на характер распределения электромагнитной энергии и частоту оптических мод. Это явление необходимо учитывать при проектировании приборов, в основе которых лежит селективное усиление определенных частот излучения с помощью мод шепчущих галерей. Кроме этого, продемонстрировано, что моделирование оптических мод является приемлемым способом для определения дисперсии показателя преломления материала микрорезонатора.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 14-22-00107.

Авторы благодарны Г. Позиной (Университет г. Линчепинга, Швеция) за помощь в проведении микрокатодоллюминесцентных исследований.

Список литературы

- [1] K.J. Vahala. *Nature*, **424**, 839 (2003).
- [2] M. Bürger, G. Gallsen, T. Kure, A. Hoffmann, A. Pawlis, D. Reuter, *D.J. As. Appl. Phys. Lett.*, **103**, 021 107 (2013).

- [3] Y. Zhang, Z. Ma, Z. Zhang, T. Wang, H.W. Choi. Appl. Phys. Lett., **104**, 221 106 (2014).
- [4] T. Nobis, R.M. Kaidashev, A. Rahm, M. Lorenz, M. Grundmann. Phys. Rev. Lett., **93**, 103 903 (2004).
- [5] T. Nobis, M. Grundmann. Phys. Rev. A, **72**, 063 806 (2005).
- [6] M.A. Kaliteevski, S. Brand, R.A. Abram, A. Kavokin, L.S. Dang. Phys. Rev. B, **75**, 233 309 (2007).
- [7] Я.В. Алексеевко, А.М. Монахов, И.В. Рожанский. ЖТФ, **79**, 72 (2009).
- [8] Т.В. Шубина, В.Н. Жмерик, В.Ю. Давыдов, А.Н. Смирнов, В.Х. Кайбышев, G. Pozina, B. Monemar, A.B. Андрианов, Д.И. Куницын, С.В. Иванов, П.С. Копьев. *Тр. XVIII Междунар. симп. Нанозфизика и нанозлектроника* (Н.Новгород, 2014) т. 2, с. 616.
- [9] A.L. Efros, B.L. Shklovskii. *Electronic of Doped Semiconductors* (Springer, Heidelberg, 1989).
- [10] T.V. Shubina, M.M. Glazov, S.V. Ivanov, A. Vasson, J. Leymarie, B. Monemar, T. Araki, H. Naoi, Y. Nanishi. Phys. Status Solidi C, **4**, 2474 (2007).

Редактор А.Н. Смирнов

Temperature switching of resonator modes in microcrystals InN

D.R. Kazanov, V.H. Kaibyshev, V.U. Davidov, A.N. Smirnov, V.N. Jmerik, N.V. Kyznetsova, P.S. Kopiev, S.V. Ivanov, T.V. Shubina

loffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract InN optical resonators, which can support the whispering-gallery modes of low orders up to room temperature, were made by MBE on profiled substrates. It was found out that the effect of mode switching with a temperature rise is induced by changing optical parameters due to the shift of an absorption edge and modification of its shape. The results of modelling taking into account the variation of refraction index reproduce typical distribution of the intensity of electromagnetic field within the resonators.