

УДК 51–72; 535; 537.9; 538.97

Экситонные поляритоны в AlGaN микрополости: результаты математического моделирования

А.Н. Поляков, М.А. Степович

При помощи подходов, характерных для математического моделирования, рассматриваются некоторые проявления экситонных поляритонов, образующихся в результате взаимодействия световой волны с микрорезонатором, содержащим квантовые ямы в AlGaN микрополости. Методом матриц переноса получены электрическое поле световой волны в микрорезонаторе и угловая дисперсия поляритонных веток.

PACS: 71.36.+c, 78.20.Bh, 78.40.Fy, 78.66.Fd, 78.67.De

Ключевые слова: микрополость, микрорезонатор, экситон, квантовая яма, поляритон, угловая дисперсия, спектр отражения, нитрид галлия

Введение

Оптически анизотропные материалы, такие как, например, нитрид галлия и оксид цинка, а также их твёрдые растворы довольно много исследуются в последние годы как в России, так и за рубежом. Это связано прежде всего с тем, что их можно использовать для создания оптических приборов опто-, микро- и нанoeлектроники (светоизлучающих и фотоприёмных устройств, сенсоров, датчиков и др.), работающих в голубой и ультрафиолетовой областях спектра, в том числе, при высоких напряжениях и в неблагоприятных условиях внешней среды, что делает диагностику физических свойств этих материалов актуальной современной задачей [1–3]. Особый интерес представляет исследование микрорезонаторов с микрополостями, выполненными из таких материалов. Такие микрорезонаторы довольно широко применяются в современной полупроводниковой электронике (фильтры, стабилизация лазеров, химические и биологические сенсоры, переключатели, модуляторы, лазерная и параметрическая генерация, высокостабильные СВЧ-генераторы и др.). Кроме микрополости может реализовываться режим сильного экситон-фотонного взаимодействия между собственной модой резонатора и экситонами квантовых ям (КЯ), расположенных в микрополости. Это приводит к расщеплению уровней экситона и фотона на два поляритонных

состояния, получивших названия *верхняя и нижняя поляритонные ветки*, что можно наблюдать в виде особенностей в спектрах отражения и пропускания, характеризующихся величиной расщепления Раби [4–6]. Следовательно, микрорезонаторы на основе широкозонных материалов в ближайшей перспективе можно рассматривать как одни из перспективных кандидатов для производства поляритонных лазеров [7–9]. Поэтому работы по исследованию таких микрорезонаторов интересны как с фундаментальной (экситонные и поляритонные эффекты), так и с прикладной (новые устройства) точек зрения.

Ранее [10] нами уже изучались возможности количественных исследований транспорта экситонов в КЯ широкозонных полупроводников. В данной работе в продолжение этого направления обсуждаются некоторые информативные возможности математического моделирования спектров отражения для исследования экситонных и поляритонных проявлений в микрорезонаторах с полупроводниковыми микрополостями на основе AlGaN, в том числе и содержащими AlGaN/GaN квантовые ямы.

Теоретическая модель

Рост и диагностика физических свойств гетероструктур микрорезонатора являются довольно ресурсозатратными как с финансовой, так и с временной точки зрения. Для снижения затрат на этапе проектирования и разработки микрорезонатора могут быть эффективно использованы характерные для математического моделирования подходы, которые дают возможность определить насколько многослойный образец данной структуры и данного состава пригоден для реализации того или иного эксперимента, или создания того или

Поляков Андрей Николаевич, научный сотрудник.

Степович Михаил Адольфович, зав. кафедрой.

Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского

Россия, 248023, Калуга, ул. Степана Разина, 26,

Тел.: +7 (4842) 576120. E-mail: andrei-polyakov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20 сентября 2013 г.

© Поляков А.Н., Степович М.А., 2013

иноустройства. Актуальным вопросом является, например, проектирование гетероструктуры микрорезонатора с заранее заданной длиной волны его собственной моды, а также вопрос о поляритонных эффектах, которые могут проявляться при взаимодействии этой моды с экситонами КЯ, расположенных в микрополости. Некоторая полезная для решения этих вопросов информация может быть получена при анализе результатов математического моделирования электрического поля внутри многослойной гетероструктуры микрорезонатора, а также спектров отражения от него.

Спектры отражения, пропускания и поглощения многослойной гетероструктуры, которой по своей сути является микрорезонатор (вместе с подложкой, на которой он выращен), могут быть довольно эффективно рассчитаны при помощи так называемого метода матриц переноса [11]. Согласно этому подходу, поле справа и слева от исследуемой многослойной структуры можно связать при помощи матрицы переноса S следующим образом:

$$\begin{pmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{pmatrix} = S \begin{pmatrix} E_{m+1}^+ \\ E_{m+1}^- \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $S = \left(\prod_{v=1}^m I_{(v-1)v} L_v \right) I_{m(m+1)}$, m — число слоёв.

Здесь считается, что электрическое поле в каждом из слоёв структуры является суперпозицией двух компонент: $E_j^+(z)$ — распространяющейся вправо в положительном направлении оси z (перпендикулярной плоскости слоёв) и $E_j^-(z)$ — распространяющейся влево в отрицательном направлении этой оси, а I_{jk} и L_j — матрицы переноса через границу соседних j -го и k -го слоя и через j -й слой соответственно. При этом матрица L_j описывает изменение фазы волны при её прохождении через j -й слой и может быть записана в виде:

$$L_j = \begin{pmatrix} \exp(-i\xi_j d_j) & 0 \\ 0 & \exp(i\xi_j d_j) \end{pmatrix},$$

где $\xi_j = 2\pi q_j / \lambda$, $q_j = (\tilde{n}_j^2 - n_0^2 \sin^2 \phi_0)^{0.5}$, n_0 — коэффициент преломления в среде, окружающей образец, λ — длина волны падающего света, ϕ_0 — угол его падения, n_j — коэффициент преломления в j -м слое (в случае поглощения света материалом комплексный $\tilde{n}_j = n_j + ik_j$), d_j — толщина j -го слоя.

Матрица переноса через границу соседних j -го и k -го слоя имеет вид

$$I_{jk} = \frac{1}{t_{jk}} \begin{pmatrix} 1 & r_{jk} \\ r_{jk} & 1 \end{pmatrix},$$

где r_{jk} и t_{jk} — френелевские коэффициенты отражения и пропускания, которые различны для волн с поперечной (s - или ТЕ-поляризация) и продольной (p - или ТМ-поляризация) поляризацией. В случае, когда k -й слой является квантовой ямой и его толщина сравнима с характерным размером волновой функции экситона, а частота света близка к частоте экситонного резонанса, то описывать такой слой посредством толщины и показателя преломления, вообще говоря, не всегда правильно. Здесь амплитудные коэффициенты отражения и пропускания света, падающего под углом на КЯ, экситонный резонанс в которой характеризуется резонансной частотой ω_0 , радиационным затуханием Γ_0 и нерадиационным затуханием Γ в случае ТЕ-поляризации даются выражением [12, 13]:

$$r_{jk} = \frac{i\Gamma_0 / \cos \phi_0}{\omega_0 - \omega - i(\Gamma_0 / \cos \phi_0 + \Gamma)},$$

$$t_{jk} = 1 + r,$$

где i — мнимая единица, ω — частота падающей световой волны. Матрица переноса через границу квантовой ямы в этом случае имеет вид [12]:

$$I_{jk} = \frac{1}{t_{jk}} \begin{pmatrix} 1 & -r_{jk} \\ r_{jk} & t_{jk}^2 - r_{jk}^2 \end{pmatrix},$$

При этом комплексные коэффициенты отражения r и пропускания t для многослойной структуры с учётом $E_{m+1}^- = 0$ могут быть найдены, используя компоненты матрицы переноса S из формулы (1), как

$$r = \frac{E_0^-}{E_0^+} = \frac{S_{21}}{S_{11}},$$

$$t = \frac{E_{m+1}^-}{E_0^+} = \frac{1}{S_{11}},$$

а энергетические коэффициенты отражения и пропускания могут быть получены, как $R = |r|^2$ и $T = |t|^2 |p_{m+1} / p_0|$ соответственно. В случае ТЕ-поляризованного света $p_0 = n_0 \cos \phi_0$ и $p_{m+1} = n_{m+1} \cos \phi_{m+1}$. Доля поглощенной энергии при необходимости может быть рассчитана в виде $A = 1 - R - T$.

Результаты и их обсуждение

При помощи метода матриц переноса был проведён расчёт спектров отражения поперечно поляризованной (ТЕ-поляризованной) световой волны для микрорезонатора с AlGaIn-микрополостью. Микрорезонатор полагался состоящим из двух брэгговских отражателей (DBR, disturbed Bragg reflector) и заключенной между ними AlGaIn-микрополости. Нижний брэгговский отражатель имеет 40,5 пар слоёв $\text{Al}_{0,85}\text{In}_{0,15}\text{N} / \text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}$ тол-

щиной 37,28 и 34,75 нм, соответственно. Верхний брэгговский отражатель (в отличие от первого полупроводникового) является диэлектрическим и состоит из 8 пар слоев $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ толщиной 41,8 и 59,24 нм, соответственно. Эти отражатели полностью отвечают условию $\lambda/4$ для света с длиной волны 350 нм (3,546 эВ). Микрополость имеет толщину 138,99 нм, выполнена из AlGaIn и является так называемой λ -полостью для света той же длины волны. Считалось, что микрорезонатор выращен на сапфировой подложке толщиной $5 \cdot 10^6$ нм, на которую нанесён тонкий слой AlN толщиной менее 1 нм, после этого расположен градиентный по x слой $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ толщиной 100 нм, затем снова очень тонкий слой AlN, после этого слой $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}$ толщиной 350 нм, затем слой AlN толщиной 15 нм, еще один слой $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}$ толщиной 350 нм, а затем уже сам микрорезонатор.

На рис. 1 представлены результаты расчёта электрического поля световой волны внутри исследуемой гетероструктуры и коэффициенты преломления её слоёв. Положительное направление оси z соответствует направлению первоначально распространения световой волны, точка $z = 0$ — верхней границе верхнего брэгговского отражателя. Расчёт проведён только в области полупроводниковой микрополости и нескольких первых периодов брэгговских отражателей при нормальном падении s -поляризованной световой волны единичной амплитуды длиной 350 нм (энергией 3,546 эВ). Спектральные законы дисперсии коэффициента преломления для различных слоёв образца, которые использовались при расчётах здесь и далее, были взяты нами из [14–16]. Анализ рис. 1 показывает, что при указанных условиях в микрополости микрорезонатора наблюдается характерное для стоячей волны собственной моды микрополости резонансное увеличение амплитуды электрического поля. Дли-

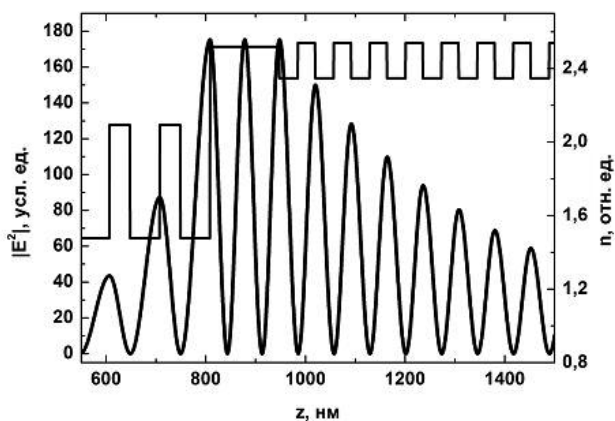


Рис. 1. Электрическое поле поперечно поляризованной световой волны и коэффициент преломления слоёв n в исследуемой многослойной гетероструктуре вблизи микрополости микрорезонатора.

на этой волны удовлетворяет условию λ -полости для волны падающего света 350 нм (3,546 эВ), а её антиноды лежат на границах микрополости.

Если поместить в микрополость симметрично относительно её середины десять КЯ AlGaIn/GaN и рассчитать спектр отражения световой волны всей гетероструктурой, включающей микрорезонатор и подложку, то картина угловой дисперсии энергетического коэффициента отражения изменится. Результаты расчётов спектров отражения исследуемого образца гетероструктуры представлены на рис. 2. Все КЯ полагались при этом одинаковыми: толщина 3 нм, расстояние между ними 11 нм, резонансная частота экситона 350 нм (3,546 эВ), радиационное затухание $\hbar\Gamma_0 = 0,45$ мэВ, нерadiационное затухание $\hbar\Gamma = 5,2$ мэВ, что соответствует реальным используемым нами в эксперименте материалам. На врезке рис. 2 приведены результаты расчёта спектра отражения для случая нормального падения световой волны. Здесь можно видеть две особенности в предполагаемой фотонной запрещенной зоне микрорезонатора, лежащие практически симметрично слева и справа от собственной моды микрополости 350 нм (3,546 эВ). Они соответствуют появлению верхней и нижней поляритонных веток. В основной части рисунка приведены положения этих особенностей для различных значений угла её падения. Анализ рис. 2 показывает, что угловая дисперсия верхней поляритонной ветки, соответствующей собственной локализованной моды микрополости, при отсутствии поглощения света в материалах микрорезонатора (условия проведения расчёта) имеет характерную для фотонной моды параболическую форму. Угловая же дисперсия нижней поляритонной ветки, соответствующей экситонному резонансу в КЯ, является отличной

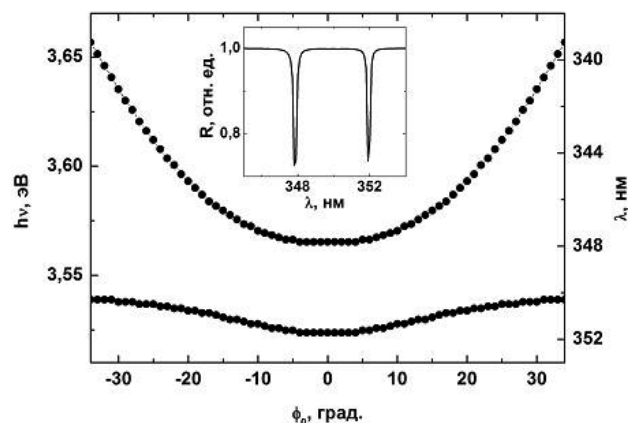


Рис. 2. Зависимость положения верхней и нижней поляритонных веток от угла падения световой волны ϕ_0 . На врезке: спектр отражения многослойной структуры вблизи собственной частоты локализованной моды микрополости при нормальном падении поперечно поляризованной световой волны.

от параболической. При этом можно наблюдать характерное явление антипересечения поляритонных веток [4–6, 17], а оба их пика в спектре отражения с увеличением угла падения смещаются в сторону области более низких длин волн электромагнитного спектра.

Таким образом, показано, что взаимодействие света длиной волны 350 нм с образцом описанной гетероструктуры (без квантовых ям в микрополости) ведёт к образованию локализованной резонансной моды, что позволяет использовать эту гетероструктуру в качестве микрорезонатора. А взаимодействие локализованной моды с экситонами КЯ (в случае их размещения в микрополости) приводит к появлению дуплетной структуры в спектре отражения, которая характерна для образования экситонных поляритонов. Поэтому многослойные образцы такого строения и состава могут быть перспективными для использования при экспериментальном изучении физических процессов, которые проявляют себя при взаимодействии световой волны с материалами слоёв микрорезонатора, в том числе и процессов, связанных с появлением экситонных поляритонов.

Заключение

При помощи математического моделирования с использованием метода матриц переноса получена угловая дисперсия энергетического коэффициента отражения для микрорезонатора, содержащего AlGaIn/GaN-квантовые ямы в AlGaIn-микрополости. При расчётах были использованы электрофизические параметры слоёв гетероструктуры, характерные для реальных полупроводниковых и диэлектрических материалов. Анализ результатов проведённого моделирования показал, что взаимодействие поляризованной в поперечном направлении световой волны с экситонами в квантовых ямах ведёт к образованию в спектре отражения двух особенностей, характерных для проявления экситонных поляритонов, поэтому микрорезонаторы такого состава могут быть использованы для экспериментального исследования поляритонных эффектов и экситонов в квантовых ямах.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить сотрудников Университета им. Отто фон Герике, г. Магдебург, Германия (Otto-von-Guericke-University Magdeburg, Germany) Ю. Христену (J. Christen) и А. Франке (A. Franke) за плодотворное обсуждение некоторых вопросов, связанных с постановкой задачи исследования, а также полученных результатов работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Германской службы академических обменов и Министерства образования и науки РФ, а также при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 12–02–97519).

Литература

1. Malpuech G., Kavokin A., Laussy F.P. // *Phys. Status Solidi A*. 2003. V. 195. P. 568.
2. Zamfirescu M., Kavokin A., Gil B. et al. // *Phys. Rev. B*. 2002. V. 65. P. 1205.
3. Sturm C., Hilmer H., Schmidt-Grund R., Grundmann M. // *New J. Phys.* 2009. V. 11. P. 3.
4. Виноградов Е.А. // *УФН*. 2002. Т. 172. № 12. С. 1371
5. Kavokin A. // *Appl. Phys. A*. 2007. V. 89, P. 241
6. Kavokin A., Malpuech G. *Cavity Polaritons*. Academic Press, 2003.
7. Malpuech G., Kavokin A., Di Carlo A., Baumberg J.J., // *Phys. Rev. B*. 2002. V. 65, No. 15. P. 3310.
8. Laussy F.P., Malpuech G., Kavokin A., Bigenwald P. // *Phys. Rev. Lett.* 2004. V. 93, No. 01. P. 6402.
9. Christopoulos S., G. von Högersthal B., Grundy A.J. et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2007. V. 98, No. 12. P. 6405
10. Поляков А.Н., Noltemeyer M., Hempel T. и др. // *Известия РАН. Серия физическая*. 2012. Т. 76. № 9. С. 1082
11. Born M., Wolf E. *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*. 6th ed. Pergamon Press, 1994.
12. Ивченко Е.Л., Кавокин А.В. // *ФТТ*. 1992. Т. 34. С. 815.
13. Ивченко Е.Л., Несвижский А.И., Йорда С. // *ФТТ*. 1994. Т. 36. С. 2118.
14. *Handbook of Optics: Devices, Measurements, and Properties*, 2nd edition, V. 2. McGraw-Hill, 1994.
15. *Handbook of Optics: Optical properties of materials, nonlinear optics, quantum optics*, 3rd edition, V. 4. McGraw-Hill, 2009.
16. Morkoç H. *Handbook of Nitride Semiconductors and Devices: GaN-based optical and electronic devices*. V. 3. Wiley-VCH, 2008.
17. Skolnick M.S., Fisher T.A., Whittaker D.M. // *Semiconductor Science and Technology*. 1998. V. 13. No. 7. P. 645

Excitonic polaritons in AlGaN microcavity: results of mathematical modeling

A.N. Polyakov and M.A. Stepovich

Tsiolkovsky Kaluga State University
26 Stepan Rasin str. 26, Kaluga, 248023, Russia
E-mail: andrei-polyakov@mail.ru

By means of mathematical modeling approaches, some excitonic polaritons which are showing as a result of interaction between a light wave and the microresonator, containing quantum wells in a AlGaN microcavity are considered. With using a transverse matrix method electrical field of light wave in microresonator and reflectivity spectrum were computed.

PACS: 71.36.+c, 78.20.Bh, 78.40.Fy, 78.66.Fd, 78.67.De

Keywords: microcavity, microresonator, exciton, quantum well, polariton, angle dispersion, reflectivity spectrum, gallium nitride.

Bibliography — 17 references

Received September 20, 2013