

УДК 535.3

РЕЗОНАНСНАЯ БРЭГГОВСКАЯ СТРУКТУРА GaN/AlGaN

© 2023 г. А. А. Иванов¹, В. В. Чалдышев¹ *, Е. Е. Заварин¹, А. В. Сахаров¹,
В. В. Лундин¹, А. Ф. Цацульников²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

“Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе Российской академии наук”, Санкт-Петербург, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

“Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук”,
Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: chald.gvg@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 05.12.2022 г.

После доработки 23.12.2022 г.

Принята к публикации 27.02.2023 г.

Измерены спектры отражения от резонансной брэгговской структуры с 30 квантовыми ямами GaN/AlGaN при комнатной температуре. Численное моделирование с использованием метода матриц переноса дало количественную точную подгонку экспериментальных результатов. Определены параметры излучательного и безызлучательного уширения экситона в квантовых ямах GaN/AlGaN.

DOI: 10.31857/S0367676523701545, EDN: VNGBLG

ВВЕДЕНИЕ

Периодические структуры, в которых диэлектрический отклик хотя бы одного композиционного материала в зависимости от частоты имеет полюс на некоторой резонансной частоте, принято называть оптически активными или резонансными фотонными кристаллами. Примером одномерного резонансного фотонного кристалла является резонансная брэгговская структура (РБС). РБС — это периодическая последовательность квантовых ям (КЯ), разделенных туннельно-непрозрачными барьерами, с периодом допускающим брэгговскую дифракцию вблизи энергии возбуждения экситонов в КЯ. В таких системах экситоны играют роль дипольно-активных возбуждений, которые становятся радиационно связанными и демонстрируют эффект сверхизлучения. В пределе бесконечно длинной периодической структуры характер взаимодействия света с веществом изменяется, трансформируя сверхизлучательную моду в поляритонную запрещенную зону [1].

Первые экспериментальные реализации РБС осуществлялись на основе CdTe КЯ [2–5]. Значительный успех в области эпитаксии III–As позволил создание РБС на основе GaAs КЯ [6–11] с количеством периодов значительно превосходящим РБС с КЯ на основе CdTe. В полупроводниках с относительно узкой шириной запрещенной зоны таких как, например, GaAs (4.1 эВ), энергия связи экситона оказывается существенно меньше

тепловой энергии при комнатной температуре ($k_B T \sim 26$ мЭВ). По этой причине наблюдать формирование экситон-поляритонной моды в РБС на основе таких полупроводниковых материалов удастся исключительно при криогенной температуре. Поскольку для любых практических приложений критически важно, чтобы квазидвумерные экситоны были стабильны в широком температурном диапазоне вплоть до комнатной температуры, вышеупомянутые системы материалов оказываются бесперспективными.

Изготовление РБС на базе материалов семейства GaN с широкой запрещенной зоной и значительно большей экситонной энергией связи в сравнении с традиционными материалами III–V позволило впервые наблюдать формирование сверхизлучающей экситон-поляритонной моды при комнатной температуре в РБС из 60 КЯ InGaN/GaN [12].

Несмотря на то, что РБС с КЯ InGaN/GaN демонстрирует экситон-поляритонные эффекты при комнатной температуре, для достижения значительного усиления требуется большое число КЯ. Так в работах [13, 14] представлены теоретические и экспериментальные результаты исследования РБС со 100 КЯ InGaN/GaN. Было обнаружено, что наличие небольшого пространственного беспорядка $\sim 1.5\%$ приводит к значительным ухудшениям резонансных оптических свойств такой РБС. В работе [15] было более детально изучен процесс влияния беспорядка на оптические свойства РБС с 100 КЯ InGaN/GaN. Авторы при-

шли к выводу, что существует критическое отклонение от точной периодичности, когда отражение от одиночной сверхизлучающей экситон-поляритонной моды, сформированной системой из 100 КЯ InGaN/GaN, трансформируется в многомодовый спектр. Это критическое отклонение оказалось обратно пропорциональным числу периодов РБС. То есть, наличие небольшого отклонения от строгой периодичности РБС может быть пренебрежимо мало для РБС с 60 КЯ InGaN/GaN, но в то же время быть существенным для РБС со 100 и более КЯ.

В силу описанных выше ограничений на число периодов РБС появляется потребность в поиске новых систем материалов, параметры которых позволяют преодолеть такие ограничения. Главным кандидатом на сегодняшний день является система КЯ GaN/AlGaN. Можно ожидать, что параметры квазидвумерных экситонов в такой РБС окажутся лучше, чем в КЯ InGaN/GaN. Данное соображение обусловлено тем, что КЯ GaN являются бинарным соединением, в то время как в КЯ InGaN сильно выражен эффект фазовой сепарации, приводящий к образованию флуктуаций состава [16] и большому неоднородному уширению экситонного резонанса.

В данной работе мы представляем результаты экспериментального исследования резонансного оптического отклика образца из 30 квантовых ям GaN, расположенных в периодической последовательности и разделенных барьерами AlGaN, так чтобы брэгговский резонанс электромагнитных волн мог быть реализован на частоте экситонов в КЯ. Изменяя угол падения света на структуру, мы исследуем модификацию спектров отражения в зависимости от отстройки брэгговского резонанса от частоты возбуждения экситонов в КЯ. Применяя метод матриц переноса для моделирования оптических свойств РБС с КЯ GaN/AlGaN, мы определяем параметры экситонов в КЯ.

ОБРАЗЕЦ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Так как структура предназначалась для оптических исследований, в том числе в геометрии “на просвет”, был выбран дизайн с широкозонным оптическим окном [17]. Непосредственно на сапфировой подложке был выращен нелегированный слой $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ толщиной 1 микрон, после чего был выращен легированный кремнием слой $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{N}$ толщиной 400 нанометров и нелегированная структура, состоящая из 30 квантовых ям GaN толщиной 3 нм и барьеров $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{N}$ номинальной толщины 69 нм. Относительно небольшая толщина легированного слоя определяется тем, что при росте слоев AlGaN:Si возникают большие упругие напряжения [18], приводящие к изгибу структуры и способные вы-

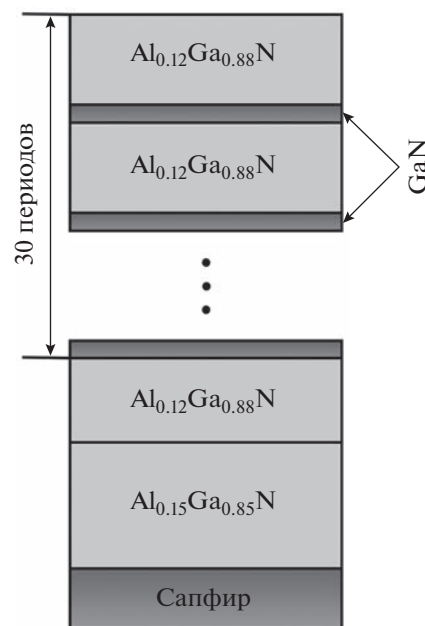


Рис. 1. Дизайн структуры.

зывать ее растрескивание. После окончания эпитаксии на поверхность структуры в том же реакторе был осажден слой Si_3N_4 толщиной ~6 нм, при этом толщина последнего барьера пропорционально была уменьшена для сохранения той же оптической толщины. При росте МКЯ структуры целенаправленно были установлены распределения потока несущего газа для создания неоднородности по толщине барьеров ~15% по площади подложки, при этом содержание алюминия в барьере и толщина КЯ изменялись незначительно.

Спектры оптического отражения измерялись для различных углов падения света. Измерения проводились для *s*- и *p*-поляризаций при комнатной температуре. В качестве источника света использовалась дейтериевая лампа фирмы “Hamamatsu Photonics K.K.” модели L6565, которая позволяет получить излучение в видимом и ближнем ультрафиолетовом диапазонах. Свет от источника пропускаться через поляризатор, в качестве которого применялась призма Глана–Тейлора, и с помощью линз из кварцевого стекла фокусировался на образце. Для транспорта света от образца к спектрометру использовалось оптическое волокно Ocean Optics типа “solarization resistant”. Регистрация спектров осуществлялась спектрометром Ocean Optics HR4000.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 представлены экспериментальный (черная сплошная линия) и расчетные спектры отражения света с учетом экситонного вклада (красная штрихпунктирная линия) и без него (си-

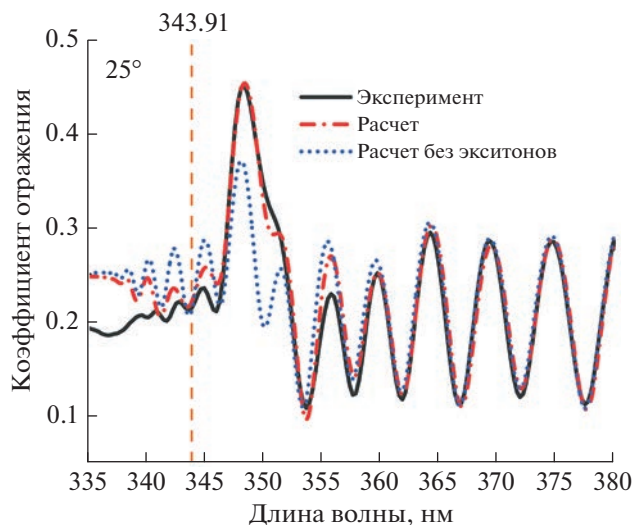


Рис. 2. Спектры отражения света от РБС из 30 КЯ GaN/AlGaIn, падающего под углом 25° . S-поляризация, комнатная температура. Сплошная черная линия — эксперимент, штрих-пунктирная красная линия — расчет, точечная синяя линия — расчет без учета экситонного вклада, оранжевая штриховая линия — спектральное положение экситонного резонанса, полученное из расчета.

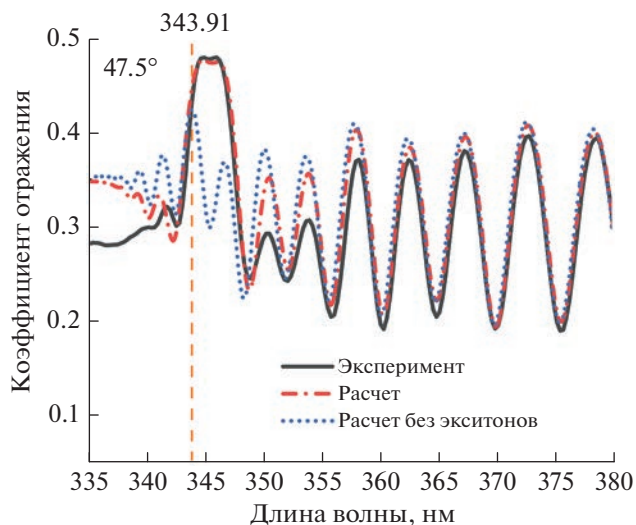


Рис. 3. Спектры отражения света от РБС из 30 КЯ GaN/AlGaIn, падающего под углом 47.5° . S-поляризация, комнатная температура. Сплошная черная линия — эксперимент, штрих-пунктирная красная линия — расчет, точечная синяя линия — расчет без учета экситонного вклада, оранжевая штриховая линия — спектральное положение экситонного резонанса, полученное из расчета.

няя точечная линия). Все спектры получены для s-поляризованного света, падающего на структуру под углом 25° при комнатной температуре. Спектральное положение экситонного резонанса продемонстрировано оранжевой штриховой линией (343.91 нм).

Поскольку падающий свет исходит из окружающего воздуха, а антиотражающее покрытие не использовалось, в спектрах отражения наблюдается фоновое отражение, зависящее от угла падения света согласно хорошо известным формулам Френеля. Во всех представленных спектрах наблюдаются осцилляции Фабри–Перо, затухающие при приближении к краю фундаментального поглощения $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{N}$. Осцилляции Фабри–Перо формируются в результате интерференции света, отраженного от границ всей эпитаксиальной системы, включающей в себя РБС и буферные слои. Край фундаментального поглощения $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{N}$ проявляется небольшой особенностью в спектрах отражения в области ~ 337 нм. В спектре отражения наблюдается доминирующая особенность на длине волны 348.4 нм, обусловленная брэгговской дифракцией света в РБС.

Теоретический анализ резонансных оптических свойств реально выращенных РБС с целью нахождения параметров экситонов в КЯ основывается на использовании метод матриц переноса (характеристических матриц) [14]. Зависимость показателя преломления AlGaIn от состава при комнатной температуре использовалось согласно работе [19]. Матрица переноса через КЯ строится

на основе формул экситонного отражения и пропускания [20]. Фоновое значение диэлектрической проницаемости GaN КЯ задавалось вещественным числом, не зависящим от длины волны света.

Из сравнения экспериментального и расчетного спектра (рис. 2) можно сделать вывод, что описанная выше модель позволяет довольно точно описать резонансный оптический отклик РБС с 30 КЯ GaN/AlGaIn. Сравнение спектров с учетом и без экситонного вклада позволяет сделать вывод, что существует как модуляция отражения, вызванная контрастом показателя преломления в GaN/AlGaIn РБС, так и периодической решеткой экситонов. Поскольку экситонный резонанс довольно широкий по сравнению с брэгговским, то даже при таком рассогласовании длины волны резонансов наблюдается усиление амплитуды резонансного пика.

Так как длина волны брэгговского резонанса зависит от угла падения света, в то время как положение экситонного резонанса остается неизменным (если не учитывать слабый эффект пространственной дисперсии), появляется возможность исследования перестройки двойного резонанса. Так на рис. 3 продемонстрированы спектры отражения, когда угол падения света равен 47.5° . В этом случае длины волн экситонного и брэгговского резонансов совпадают, что приводит к увеличению амплитуды и полуширины резонансной полосы отражения. Сравнение спектров с учетом и без учета экситонного вклада поз-

воляет сделать вывод о существенности вклада в амплитуду и ширину резонансной полосы отражения при комнатной температуре. Помимо количественных изменений пренебрежение экситонным вкладом в резонансное оптическое отражение РБС приводит к качественным различиям формы резонанса в области двойного экситонно-брэгговского резонанса. Совокупность экспериментальных и модельных результатов, полученных для различных углов падения, убедительно свидетельствует о том, что в образце формируется сверхизлучающая экситон-поляритонная мода.

Наиболее подходящие параметры расчетов, представленных на рис. 2 и 3: параметр радиационного затухания определен равным 0.4 ± 0.02 мэВ, а параметр нерадационного затухания при комнатной температуре — 40 ± 5 мэВ. Важно обратить внимание, что при равных параметрах нерадационного затухания при комнатной температуре, радиационное затухание экситонов в КЯ GaN оказалось в два раза больше по сравнению с экситонами в КЯ InGaN [15, 21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерены спектры отражения от РБС с 30 КЯ GaN, расположенных в периодической последовательности и разделенных туннельно-непрозрачными барьерами AlGaN. Продемонстрировано существенное усиление резонансной полосы отражения при комнатной температуре, когда условие брэгговской дифракции электромагнитных волн выполнено на частоте экситонов в КЯ. Верифицирована модель позволяющая описать экспериментальные данные и найти параметры экситонов в КЯ. Отношение радиационного затухания экситона к нерадационному в РБС GaN/AlGaN в два раза больше чем в InGaN/GaN [15, 21]. Данный факт позволяет предполагать, что РБС с КЯ GaN/AlGaN имеют наилучшие параметры для использования в нанопотонике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ивченко Е.Л., Несвижский А.И., Йорда С. // ФТП. 1994. Т. 36. № 7. С. 2118.
2. Kochereshko V.P., Pozina G.R., Ivchenko E.L. et al. // Superlattices Microstruct. 1994. V. 15. No. 4. P. 471.
3. Ивченко Е.Л., Кочерешко В.П., Платонов А.В. и др. // ФТП. 1997. Т. 39. № 11. С. 2072; Ivchenko E.L., Kochereshko V.P., Platonov A.V. et al. // Phys. Solid State. 1997. V. 39. No. 11. P. 1852.
4. d'Aubigné Y.M., Wasiela A., Mariette H., Dietl T. // Phys. Rev. B. 1996. V. 54. No. 19. P. 14003.
5. Sadowski J., Mariette H., Wasiela A. et al. // Phys. Rev. B. 1997. V. 56. No. 4. Art. No. R1664.
6. Hayes G.R., Staehli J.L., Oesterle U. et al. // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 83. No. 14. P. 2837.
7. Hübner M., Prineas J.P., Ell C. et al. // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 83. No. 14. P. 2841.
8. Prineas J.P., Ell C., Lee E.S. et al. // Phys. Rev. B. 2000. V. 61. No. 20. P. 13863.
9. Goldberg D., Deych L.I., Lisyansky A.A. et al. // Nature. Photon. 2009. V. 3. P. 662.
10. Chaldyshev V.V., Chen Y., Poddubny A.N. et al. // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 98. No. 7. Art. No. 073112.
11. Чалдышев В.В., Кунделев Е.В., Никитина Е.В. и др. // ФТП. 2012. Т. 46. № 8. С. 1039. Chaldyshev V.V., Kundeleev E.V., Nikitina E.V. et al. // Semiconductors. 2012. V. 46. No. 8. P. 1016.
12. Chaldyshev V.V., Bolshakov A.S., Zavarin E.E. et al. // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 99. No. 25. Art. No. 251103.
13. Ivanov A.A., Chaldyshev V.V., Zavarin E.E. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2020. V. 1697. Art. No. 012153.
14. Иванов А.А., Чалдышев В.В., Заварин Е.Е. и др. // ФТП. 2021. Т. 55. № 9. С. 733; Ivanov A.A., Chaldyshev V.V., Zavarin E.E. et al. // Semiconductors. 2021. V. 55. No. 1. P. S49.
15. Ivanov A.A., Chaldyshev V.V., Ushanov V.I. et al. // Appl. Phys. Lett. 2022. V. 121. No. 4. Art. No. 041101.
16. Цацульников А.Ф., Лундин В.В., Заварин Е.Е. и др. // ФТП. 2012. Т. 46. № 10. С. 1357; Tsatsulnikov A.F., Lundin W.V., Zavarin E.E. et al. // Semiconductors. 2012. V. 46. No. 10. P. 1281.
17. Sakharov A.V., Lundin W.V., Usikov A.S. et al. // MRS Internet J. Nitride Semicond. Res. 1998. V. 3. No. 1. Art. No. 28.
18. Dadgar A., Veit P., Schulze F. et al. // Thin Solid Films. 2007. V. 515. No. 10. P. 4356.
19. Tisch U., Meyler B., Katz O. et al. // J. Appl. Phys. 2001. V. 89. No. 5. P. 2676.
20. Ивченко Е.Л. // ФТП. 1991. Т. 33. № 8. С. 2388.
21. Bolshakov A.S., Chaldyshev V.V., Zavarin E.E. et al. // J. Appl. Phys. 2017. V. 121. No. 13. Art. No. 133101.

GaN/AlGaN resonant Bragg structure

A. A. Ivanov^a, V. V. Chaldyshev^{a, *}, E. E. Zavarin^a, A. V. Sakharov^a, W. V. Lundin^a, A. F. Tsatsulnikov^b

^aIoffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 194021 Russia

^bSubmicron Heterostructures for Microelectronics Research & Engineering Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 194021 Russia

*e-mail: chald.gvg@mail.ioffe.ru

Reflection spectra from a resonant Bragg structure with 30 GaN/AlGaN quantum wells have been measured at room temperature. Numerical modeling using the method of transfer matrices gave a quantitatively accurate fit of the experimental results. Defined radiative and non-radiative broadening parameters of the exciton in GaN/AlGaN quantum wells.