

06:07

Лазерная генерация в субмонослойных структурах InAs/AlGaAs без внешнего оптического ограничения

© Б.В. Воловик, А.Ф. Цацульников, Н.Н. Леденцов,
М.В. Максимов, А.В. Сахаров, А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков,
А.Р. Ковш, В.М. Устинов, П.С. Копьев, Ж.И. Алферов,
И.Э. Козин, М.В. Белоусов, D. Vimborg

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
Институт физики, С.-Петербургский государственный университет,
Петродворец
Institut für Festkörperphysik, Technische Universität Berlin,
Hardenbergstr. 36, D-10623 Berlin, Germany

Поступило в Редакцию 13 февраля 1998 г.

Получены и исследованы структуры с набором плоскостей с субмонослойными внедрениями InAs в матрице AlGaAs. Мы наблюдали лазерную генерацию при оптическом возбуждении. Показано, что лазерная генерация осуществляется через основное состояние экситонов, локализованных на островках InAs, и может быть реализована без внешнего оптического ограничения активной области широкозонными слоями с меньшим показателем преломления. Низкая пороговая плотность возбуждения показывает, что подобные структуры могут использоваться для создания низкопороговых инжекционных лазеров видимого диапазона, экситонных волноводов и самосогласованных микрорезонаторов.

Введение

Исследования процессов роста в системе InAs–GaAs показали, что осаждение субмонослойных (СМС) InAs покрытий приводит к спонтанному образованию упорядоченного массива островков высотой в один монослой (МС) с характерной шириной около 4 nm и с малой дисперсией по латеральным размерам [1,2]. Как следует из работ [3–5], СМС структуры обладают уникальными оптическими свойствами. Было отмечено значительное увеличение энергии связи экситона вследствие

латерального квантования [3]. Кроме того, отмечались высокая эффективность люминесценции и большая сила осциллятора экситона даже при сверхмалых средних толщинах слоя InAs [4]. Также было продемонстрировано снятие правил отбора по импульсу [5]. Позднее было показано, что в структурах A^2B^6 с субмонослоями CdSe/ZnMgSSe локализация экситонов на островках и снятие правил отбора по импульсу позволяют реализовать лазерную генерацию через основное состояние экситона в СМЛ сверхрешетках (СМЛ СР) [6]. Была реализована лазерная генерация в структурах без внешнего оптического ограничения широкозонными слоями с меньшим показателем преломления, за счет модуляции коэффициента преломления в области экситонного резонанса [7].

До настоящего времени не сообщалось о наблюдении подобного явления в системе A^3B^5 , где малая масса электрона делает энергию локализации экситонов на СМЛ островках весьма малой (менее 50 eV [4] для InAs СМС в GaAs). Мы предложили и реализовали структуры с InAs СМЛ островками в матрице AlGaAs, в которых за счет увеличения энергии локализации экситонов в островках удалось реализовать лазерную генерацию в структурах без внешнего оптического ограничения. Лазерная генерация появляется при низких плотностях оптического возбуждения, что открывает широкие перспективы для использования эффекта в лазерах видимого диапазона для улучшения оптического ограничения, экситонных волноводах и самосогласованных микрорезонаторах, т. е. вертикально излучающих лазерах, где модуляция коэффициента преломления в области экситонного резонанса в КТ позволяет достичь самосогласованной подстройки моды резонатора и полосы усиления.

Эксперимент

Структуры выращивались методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на полуизолирующих подложках GaAs (100) в установке RIBER 32P с твердотельным источником As. Рост проводился в стандартных для МПЭ условиях обогащения As. В случае структуры, подробно исследованной в данной работе, на подложке выращивался буферный слой GaAs толщиной 0.3 μm . Затем был выращен слой $\text{Al}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{As}$ толщиной 0.7 μm . После этого для ограничения носителей выращивался

тонкий (10 nm) слой $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$. Далее, после слоя $\text{Al}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{As}$ (20 nm) выращивалась активная область, которая состояла из 20 сверхтонких квантовых ям GaAs толщиной 1 nm, в середину каждой из которых осаждалось 0.5 монослоя InAs. Ямы разделялись барьерами $\text{Al}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{As}$ толщиной 50 Å. Затем был выращен слой $\text{Al}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{As}$ толщиной 100 nm и тонкий (10 nm) слой $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$. Температура роста структуры равнялась 600°C, а при росте активной области температура понижалась до 485°C с целью избежать сегрегации и переиспарения атомов In с поверхности.

Люминесценция возбуждалась Ar^+ лазером ($\lambda = 514.5$ nm, $P = 500$ W/cm²), импульсным азотным лазером ($\lambda = 337$ nm, мощность в импульсе 1 MW/cm²) и галогеновой лампой, свет которой пропусклся через монохроматор. Сигнал люминесценции регистрировался охлаждаемым фотоумножителем.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 показаны спектры фотолюминесценции (ФЛ), возбуждения люминесценции (СВЛ) и оптического отражения от указанного образца. Видно, что при слабом уровне возбуждения при возбуждении светом с энергией кванта выше запрещенной зоны $\text{Al}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{As}$ в спектре присутствует один пик, который связан с излучательной рекомбинацией экситонов, локализованных на островках InAs. Отметим, что этот пик значительно сдвинут в длинноволновую сторону относительно энергии оптического перехода, ожидаемого для квантовой ямы GaAs толщиной 1 nm. Это показывает, что экситоны сильно локализованы на островках InAs. В спектре возбуждения ФЛ есть две особенности, обозначенные на рисунке как QD1 и QW. Отметим, что эти линии полностью совпадают с экситонными особенностями, наблюдаемыми в спектре отражения, причем особенность, связанная с QW, является существенно менее уширенной. Положение особенностей QD1 и QW в СВЛ не меняется при изменении энергии детектирования. Мы связываем эти особенности с состояниями, обусловленными экситонами, локализованными на островках InAs, и экситонными состояниями в сверхузкой GaAs квантовой яме (QW). Данная интерпретация хорошо согласуется со спектральным положением пиков и их полушириной. В спектре ФЛ при резонансном возбуждении с энергией кванта ниже ширины запрещенной

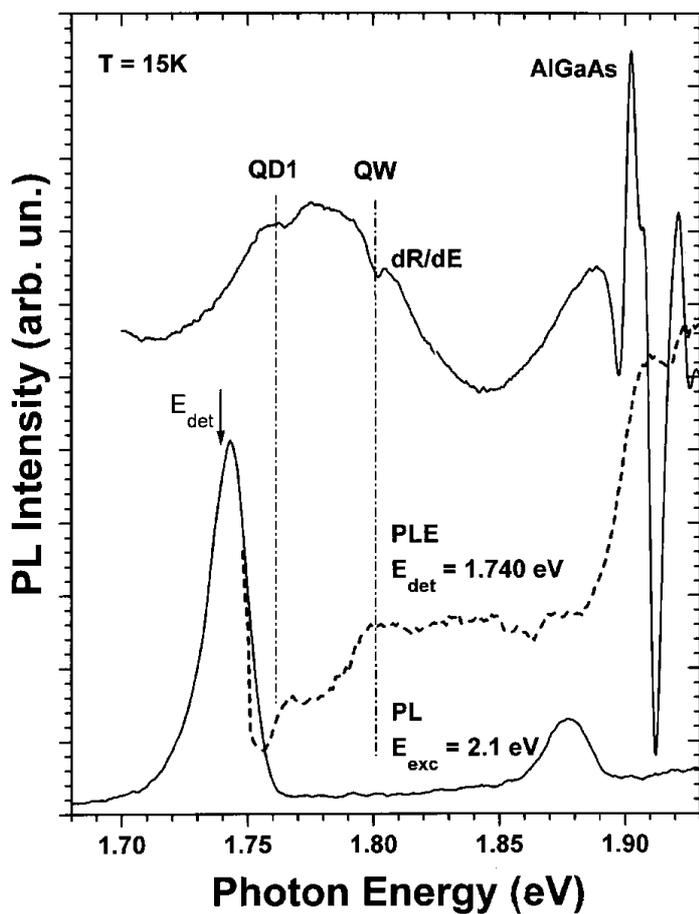


Рис. 1. Спектры фотолуминесценции, возбуждения луминесценции и оптического отражения исследуемой структуры.

зоны QW наблюдаются две линии, одна из которых (QD2, 1.729 eV) существенно сдвинута в длинноволновую сторону от энергии QD1, и другой пик, вблизи энергии, соответствующей QD1, при 1.750 eV (рис. 2, *a*). При нерезонансном возбуждении при малых плотностях

возбуждения линия QD1 возбуждается хуже, что связано, по-видимому, с тем, что носители с большой величиной импульса в плоскости GaAs квантовой ямы лучше захватываются на островках с большей энергией локализации (QD2). При этом, однако, при больших плотностях возбуждения доминирующей в спектре всегда является линия QD1 (рис. 2, *b*). Похожие эффекты отмечались нами в субмонослойных структурах CdSe/ZnSe [8].

При дальнейшем повышении плотности возбуждения линия смещается к положению, близкому к особенности QD1 в спектре отражения (рис. 2, *b*). При этом пик QD1 продолжает доминировать в спектре ФЛ и насыщения состояний QD1 не происходит, что свидетельствует об их высокой плотности. При высоких плотностях возбуждения при наблюдении с торца резонатора наблюдается линия стимулированного излучения.

Для исследования эффекта лазерной генерации был выколот резонатор длиной $L = 1$ mm. На рис. 3, *a* показана зависимость интегральной интенсивности люминесценции от плотности возбуждения. Видно, что при плотности 800 W/cm² интенсивность резко возрастает, что связано с возникновением стимулированного излучения при энергии кванта 1.750 eV (рис. 3, *b*). Отметим, что в пересчете на инжекционную накачку величина пороговой плотности 800 W/cm² соответствует пороговому току ~ 200 A/cm², что, вследствие неизвестной величины доли носителей, гибнущих у поверхности в силу приповерхностного характера возбуждения азотным лазером, является верхней границей для порогового тока. Таким образом, структуры с InAs/AlGaAs субмонослоями могут быть использованы для создания низкопороговых инжекционных лазеров видимого диапазона, даже в отсутствие внешнего оптического ограничения (средняя разница в составе по Al между СМЛ СР и ограничивающими слоями всего 5%). Схема структуры представлена на вставке к рис. 3, *c*.

На рис. 3, *c* представлена температурная зависимость пороговой плотности возбуждения. Видно, что начиная с температуры ~ 70 K пороговая плотность возрастает экспоненциально, и при аппроксимации зависимости по формуле $P = P_0 \times \exp(T/T_0)$ можно определить $T_0 = 30$ K. Такое поведение пороговой плотности можно объяснить термическим выбросом носителей из островков. Мы наблюдали лазерную генерацию до температуры 170 K. Повышение температурной стабильности излучения возможно при увеличении энергии локализации,

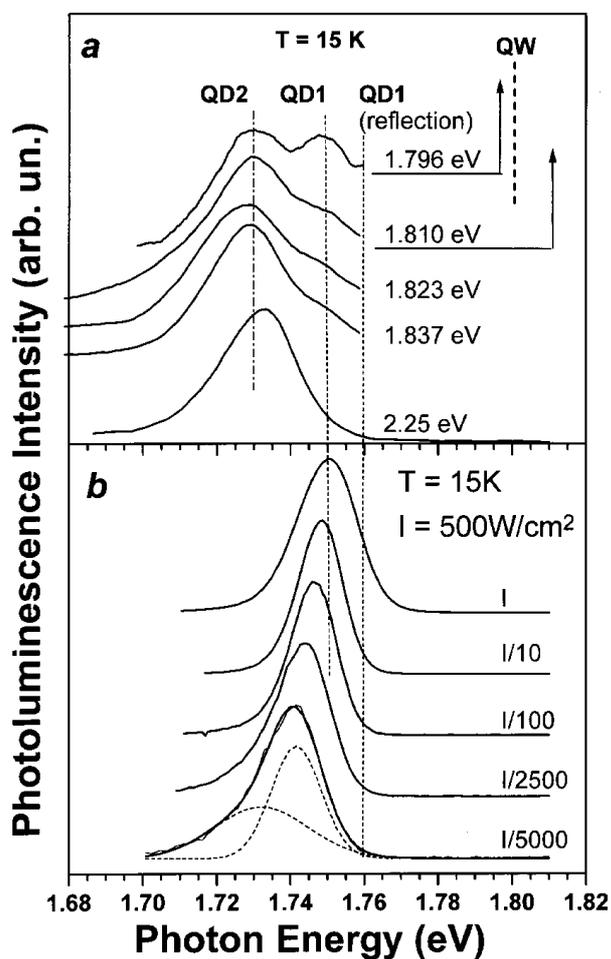


Рис. 2. *a* — спектры фотолюминесценции при различной энергии возбуждающего света. Энергии возбуждения указаны около спектров. Положение линий QD1 (reflection) и QW взято из спектра оптического отражения; *b* — спектры фотолюминесценции при различных плотностях возбуждения. Люминесценция возбуждалась Ag^+ лазером. Пунктирными линиями показано разложение спектра на две гауссовы кривые.

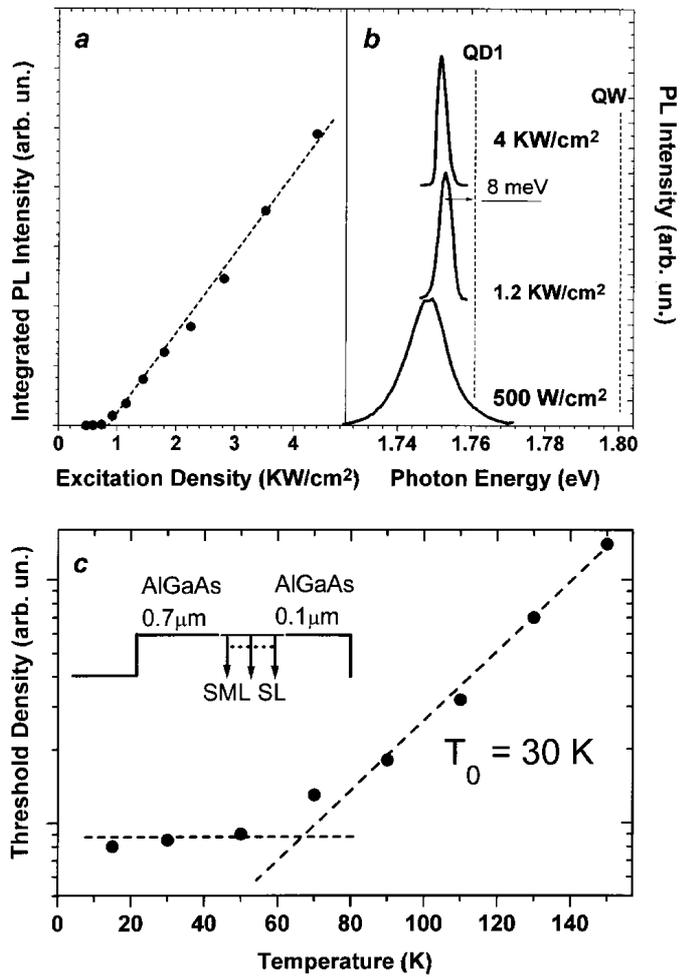


Рис. 3. *a* — зависимость интегральной интенсивности фотолуминесценции с торца от плотности возбуждения; *b* — спектры фотолуминесценции с торца при разных плотностях возбуждения. Величина плотности возбуждения указана около спектров. Положение линий QD1 и QW взято из спектра оптического отражения; *c* — зависимость пороговой плотности возбуждения от температуры. Величина T_0 получена при аппроксимации по формуле $P = P_0 \times \exp(T/T_0)$. На вставке показана схема структуры.

что возможно при использовании более широкозонных ограничивающих слоев или при использовании эффекта вертикально-коррелированного роста островков [9].

Заключение

Нами продемонстрирована лазерная генерация при оптической накачке в структурах с субмонослойными внедрениями InAs в матрице AlGaAs в отсутствие внешнего оптического ограничения. Лазерная генерация возникает при низких плотностях возбуждения, что делает подобные структуры перспективными для создания низкопороговых инжекционных лазеров видимого диапазона, экситонных волноводов и самосогласованных микрорезонаторов.

Данная работа поддерживается Российским фондом фундаментальных исследований, научной программой "Физика твердотельных наноструктур" и фондом Фольксваген. Б.В. Воловик выражает благодарность фонду Сороса.

Список литературы

- [1] Wang P.D., Ledentsov N.N., Sotomayor Torres C.M., Kop'ev P.S., Ustinov V.M. // APL. 1994. V. 64. P. 1526.
- [2] Bressler-Hill V., Lorke A., Varma S., Petroff P.M., Pond K., Weinberg W.H. // Phys. Rev. B. 1994. V. 50. P. 8479.
- [3] Wang P.D., Ledentsov N.N., Sotomayor Torres C.M., Yassievich I.N., Pakhomov A., Egorov A.Yu., Kop'ev P.S., Ustinov V.M. // Phys. Rev. B. 1994. V. 50. P. 1604.
- [4] Belousov M.V., Ledentsov N.N., Maximov M.V., Wang P.D., Yassievich I.N., Faleev N.N., Kozin I.A., Ustinov V.M., Kop'ev P.S., Sotomayor Torres C.M. // Phys. Rev. B. 1995. V. 51. P. 14 346.
- [5] Sirenko A.A., Ruf T., Ledentsov N.N., Egorov A.Yu., Kop'ev P.S., Ustinov V.M., Zhukov A.E. // Solid State Commun. 1996. V. 97. P. 169.
- [6] Ledentsov N.N., Krestnikov I.L., Maximov M.V., Ivanov S.V., Sorokin S.L., Kop'ev P.S., Alferov Zh.I., Bimberg D., Ledentsov N.N., Sotomayor Torres C.M. // APL. 1996. V. 69. P. 1343, ibid APL. 1997. V.70. P. 2766.
- [7] Krestnikov I.L., Ivanov S.V., Kop'ev P.S., Ledentsov N.N., Maximov M.V., Sakharov A.V., Sorokin S.V., Rosenauer A., Gerthsen D., Sotomayor Torres C.M., Bimberg D., Alferov Zh.I. // Materials Science and Engineering B (в печати).

- [8] Крестников И.Л., Максимов М.В., Иванов С.В., Леденцов Н.Н., Сорокин С.В., Цацульников А.Ф., Люблинская О.Г., Воловик Б.В., Копьев П.С., Sotomayor Torres С.М. // ФТП. 31 (2). С. 166–170.
- [9] Krestnikov I.L., Maximov M.V., Sakharov A.V., Kop'ev P.S., Alferov Zh.I., Ledentsov N.N., Bimberg D., Sotomayor Torres С.М. // 8th Int. Conf. on II–VI Compounds. August 25–29, Grenoble, France (J. Cryst. Growth, в печати).