

Стимулированное излучение квантовых точек при оптической накачке

А.А.Андронов, Ю.Н.Ноздрин, А.В.Окомельков, А.П.Васильев, А.Е.Жуков, В.М.Устинов

Экспериментально исследовано стимулированное излучение массивов квантовых точек при оптической накачке, происходящих при комнатной температуре. Наблюдалось стимулированное излучение на межзонных переходах как с электронного уровня, соответствующего основному состоянию в квантовой яме ($\lambda \approx 1.31$ мкм), так и с двух вышележащих возбужденных уровней ($\lambda \approx 1.21$ и 1.12 мкм). С помощью засветки в форме полосы с изменяющейся длиной проведены измерения, на основе которых сделана оценка коэффициента усиления для этих переходов. Полученные коэффициенты усиления активной среды являются весьма большими и достигают $15-17$ см⁻¹ (для $\lambda \approx 1.31$ мкм). Обсуждается методика измерения коэффициентов усиления активной среды в случае больших его значений (не менее 10 см⁻¹). Обнаружено резкое подавление стимулированного излучения с возбужденных уровней при увеличении длины области засветки.

Ключевые слова: квантовые точки, стимулированное излучение, оптическая накачка.

1. Введение

Исследование стимулированного и лазерного излучения направлено, прежде всего, на получение монохроматических источников излучения с высокой спектральной плотностью и узкой диаграммой направленности. Однако в последнее время большой интерес проявляется к исследованию и более экзотических источников стимулированного излучения, таких как перестраиваемые по частоте лазеры или лазеры с возможным переключением рабочих частот (см., напр., [1]). Описанию экспериментального наблюдения работы именно таких источников и измерению коэффициентов усиления лазерного излучения массивов квантовых точек и посвящена настоящая работа. Используемый нами способ оптической накачки нелегированных структур позволяет исследовать характеристики излучения без дополнительных проблем, связанных с потерями в волноводе и контактных областях (что имеет место в случае токовой накачки).

2. Экспериментальные результаты

2.1. Стимулированное излучение массива квантовых точек

Нами исследовались нелегированные структуры, выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке из GaAs, состоящие из пяти рядов квантовых

точек, помещенных в GaAs-волновод толщиной 0.2 мкм, ограниченный слоем Al_{0.8}Ga_{0.2}As толщиной 1.5 мкм со стороны подложки и слоем Al_{0.3}Ga_{0.7}As толщиной 0.1 мкм со стороны поверхности структуры. Квантовые точки из InAs зарастивались слоем InGaAs для получения длины волны излучения $\lambda = 1.3$ мкм, соответствующей переходу из основного электронного состояния точек.

Спектры излучения исследовались на установке, в которой использовалась оптическая накачка излучением лазера LS-2137 на кристаллах YAG:Nd³⁺ с электрооптической модуляцией добротности и преобразованием длины волны излучения. Этот лазер позволяет осуществлять перестраиваемую импульсную накачку на длинах волн 400–2500 нм при длительности импульса излучения 6–8 нс и частоте повторения импульсов 10 Гц. Схема установки приведена на рис.1. Образцы накачивались по нормали к плоскости пленки, а излучение, выходящее из их торца, с помощью сферического зеркала проецировалось на входную щель монохроматора и регистрировалось фотодетектором. В эксперименте исследовалось стимулированное излучение узких полосок образцов, полученных с помощью механического пропила (с шероховатыми боковыми гранями) (см. вставку I на рис.1), и узких засвеченных полосок, полученных с помощью непрозрачных металлических экранов (см. вставку II на рис.1).

На первом этапе исследований использовались образцы больших размеров (~ 10 мм), для того чтобы продемонстрировать существование в них стимулированного излучения. На рис.2 изображены спектры стимулированного излучения точек при оптической накачке на $\lambda = 485$ нм с интенсивностью $P \sim 3 \times 10^4$ Вт/см². Спектры излучения были получены для образца с линейными размерами ~ 5 × 10 мм и сколотыми гранями. Запись проводилась без усреднения, при полностью открытых щелях (шириной 4 мм) монохроматора. На рис.2 отчетливо видны три спектральные линии, соответствующие переходам с трех низших уровней (основного и двух возбужденных) электронов, локализованных в квантовых точках. Вследствие того

А.А.Андронов, Ю.Н.Ноздрин, А.В.Окомельков. Институт физики микроструктур РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: okom@ipm.sci-nnov.ru

А.П.Васильев, А.Е.Жуков, В.М.Устинов. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Россия, 194021 С.-Петербург, Политехническая ул., 26; e-mail: vmust@beam.ioffe.ru

Поступила в редакцию 29 ноября 2009 г., после доработки – 12 мая 2010 г.

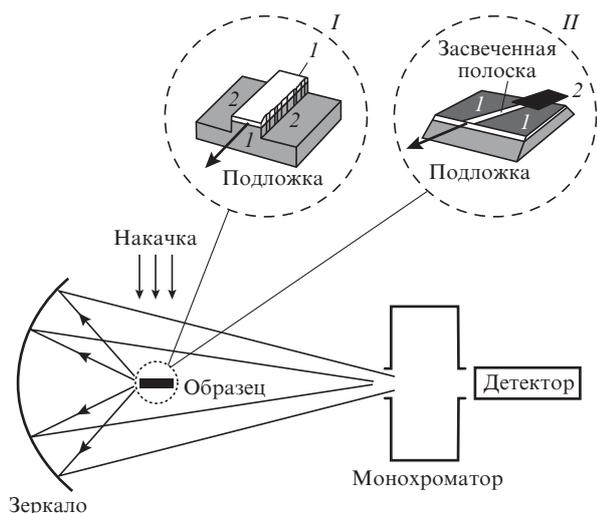


Рис.1. Схема экспериментальной установки. На вставке I схематически изображен образец, полученный пропилом вдоль граней 2 и сколом вдоль граней 1, а на вставке II – образец, на котором с помощью металлических экранов 1 сформирована узкая засвеченная полоска, длина которой изменялась перемещением дополнительного экрана 2. На вставках стрелками показано направление выхода излучения из образцов.

что щели монохроматора были полностью открыты для получения наибольшего сигнала, ширина этих спектральных линий полностью определялась разрешением монохроматора.

Следует отметить, что каждой линии стимулированного излучения соответствует свой порог оптической накачки. Так, основной линии излучения ($\lambda \approx 1.31$ мкм) отвечает порог $P \sim (3-5) \times 10^2$ Вт/см², а второму возбужденному состоянию ($\lambda \approx 1.12$ мкм) – $P \sim 10^4$ Вт/см². Вблизи порога, из-за нестабильности мощности накачки, флуктуации сигнала стимулированного излучения очень велики и могут достигать 100%. Наличие порога является одним из признаков стимулированного излучения. С увеличением мощности накачки флуктуации мощности стимулированного излучения уменьшаются.

Для создания источника направленного излучения нами с помощью механических методов пропила гетероструктур были изготовлены резонаторы в виде полос шириной 50–100 мкм и длиной несколько миллиметров. Спектр стимулированного излучения такого образца представ-

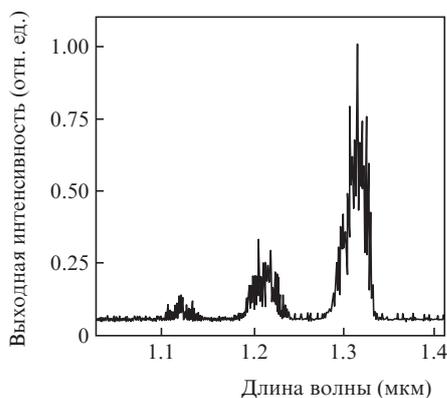


Рис.2. Спектры стимулированного излучения квантовых точек при оптической накачке на $\lambda = 485$ нм и интенсивности импульсов накачки $P \sim 3 \times 10^4$ Вт/см².

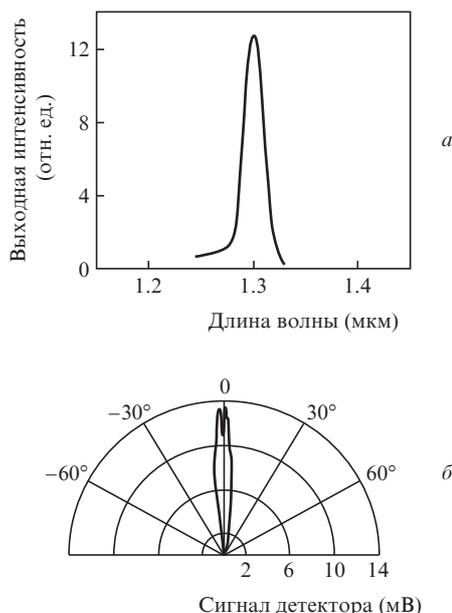


Рис.3. Спектр стимулированного излучения образца с изготовленным механическим способом резонатором (a) и диаграмма направленности излучения для этого образца в горизонтальной плоскости (b).

лен на рис.3,a). При механическом способе изготовления резонаторов (пропил) их боковая поверхность получается шероховатой, с характерными масштабами шероховатости не более 10 мкм. Наличие такой шероховатости боковой поверхности обеспечивает высокую добротность на основной резонаторной моде и низкую добротность для всех остальных мод. Торцы резонаторов изготавливались с помощью сколов. Созданные резонаторы обеспечивают высокую направленность получаемого лазерного излучения. С использованием этих резонаторов при импульсной оптической накачке на $\lambda = 1.06$ мкм было получено лазерное излучение на $\lambda = 1.31$ мкм и измерена диаграмма направленности. Она имеет характерные угловые ширины: несколько градусов в горизонтальной плоскости и несколько десятков градусов в вертикальной. Эта диаграмма направленности в горизонтальной плоскости показана на рис.3,b). Она построена для стимулированного излучения, выходящего из одного торца (скола) образца (что соответствует на рисунке углу, равному нулю). Угловая зависимость стимулированного излучения изображена в полярных координатах: по радиусу отложена величина сигнала с приемника. Интенсивность стимулированного излучения регистрировалась на расстоянии, много больше длины волны излучения и размера образца.

2.2. Измерение коэффициента усиления

Для определения коэффициента усиления применялась методика засветки в форме узких полос с изменением их длины. Использовались образцы с геометрией, показанной на вставке II к рис.1. Похожая методика была описана, например, в работе [2]. Проводя подобные измерения, особенно важно иметь в виду, что для таких систем коэффициенты усиления в наших экспериментах получаются довольно большими (до ~ 10 см⁻¹). Также следует учесть, что при оптической засветке в виде световой полоски, сформированной на пленке образца с помощью непрозрачного экрана, локальная температура во время засвет-

ки может довольно сильно повышаться (практически до 100°C). Это приводит к некоторому уменьшению ширины запрещенной зоны в области засвеченной полоски (во время импульса оптической накачки) и, следовательно, к некоторому увеличению длины волны стимулированного излучения по сравнению с длиной волны межзонных переходов в незасвеченной области. Вследствие этого неосвещенные области образца, окружающие полоску засветки, оказываются прозрачными (непоглощающими) для возникающего стимулированного излучения, и поэтому оно может свободно распространяться по всему образцу и отражаться от его границ.

С этим обстоятельством как раз и связаны трудности нахождения коэффициента усиления в таких системах. Дело в том, что в случае больших значений коэффициента усиления при его измерении важно избежать отражений от всех возможных границ, т. е. добиться возникновения «чисто» стимулированного излучения в среде. Однако полностью избежать отражений не удастся, поэтому необходимо обеспечить наименьшую величину отраженного сигнала, что может быть достигнуто при диффузном характере рассеяния волны на границе образца. С учетом этих требований, исследование коэффициента усиления проводилось с помощью следующей экспериментальной схемы. Использовались образцы довольно большого размера (~ 10 мм). Для того чтобы избежать зеркального отражения волн от границ образца, его края искусственно делались шероховатыми и с некоторым «скосом» – утоньшением пленки на краю (см. вставку II на рис.1). С помощью непрозрачных экранов на таком образце формировались световые полоски засветки с шириной 100–300 мкм и различной длиной, обычно от 0.5 мм до 7–10 мм. Возникающее стимулированное излучение вследствие нагрева образца легко выходило наружу даже в том случае, если край полоски засветки находился не на торце образца. Дополнительно, во избежание переотражений стимулированного излучения, направление полоски засветки было повернуто относительно нормали к границе образца.

На рис.4 показаны спектры излучения для разных длин освещенной полоски, полученные по описанной методике для структуры с квантовыми точками. В данном случае исследовалась структура с линейными размерами в плоскости ~ 10 мм. Ширина полоски засветки (полученная с помощью непрозрачных экранов) составляла 200 мкм. Все грани образца были сделаны шероховатыми, со скосом (пленки и подложки) примерно под 45°. Наблюдаемая ширина спектральной линии стимулированного излучения была довольно большой, что может быть связано с неоднородным уширением, вызванным неоднородностями образца. Экспериментально это подтверждалось таким образом. Из разных мест выращенной структуры были выколоты образцы для наблюдения стимулированного излучения. В разных образцах частоты стимулированного излучения различались на 0.5%–2%.

На рис.5 приведены зависимости максимальной интенсивности излучения для трех спектральных линий от длины полоски засветки l . Максимальный коэффициент усиления достигается при таких l , при которых стимулированное излучение еще далеко от насыщения (далеко от области линейного роста интенсивности излучения с длиной l), т. е. в области экспоненциального роста интенсивности с увеличением длины полоски засветки. Оценки, выполненные в предположении экспоненциального роста

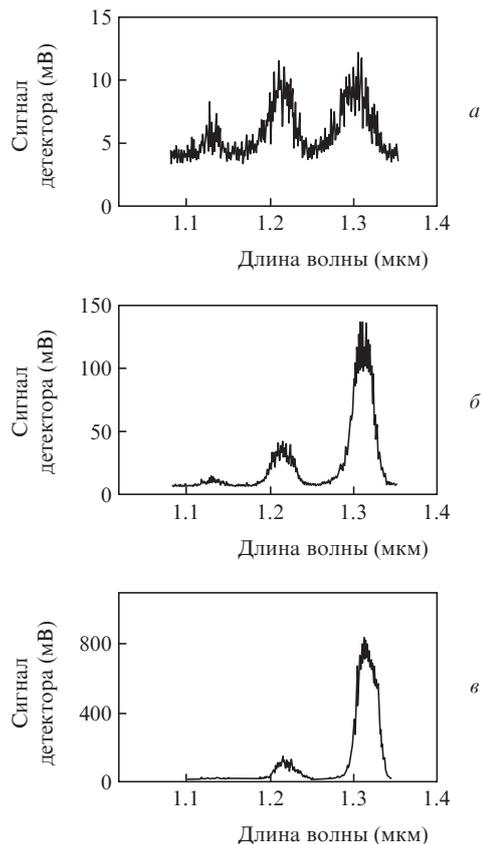


Рис.4. Спектры излучения образца при длине полоски засветки $l = 3.5$ (а), 4.5 (б) и 8 мм (в) и спектральном разрешении монохроматора 19 нм.

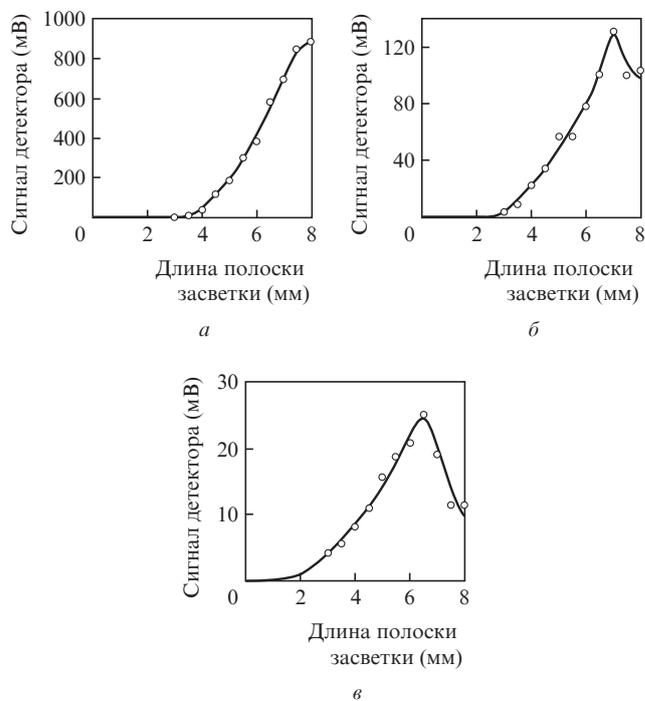


Рис.5. Зависимости максимального значения сигнала для трех спектральных линий с $\lambda = 1.31$ (а), 1.21 (б) и 1.12 мкм (в) от длины полоски засветки l .

интенсивности стимулированного излучения и отсутствия отражения на границе образца, показывают, что максимальный коэффициент усиления для спектральной ли-

нии с $\lambda \approx 1.31$ мкм (рис.5,а) достигает 26 см^{-1} при длине $l \sim 3.5\text{--}4$ мм и комнатной температуре. Для других спектральных линий с $\lambda \approx 1.21$ мкм (рис.5,б) и ~ 1.12 мкм (рис.5,в) максимальные коэффициенты усиления составляют ~ 19 и 7 см^{-1} соответственно.

Вообще говоря, предположение об отсутствии обратного отражения волны на границе образца является не вполне корректным. В эксперименте отражение всегда присутствует. Наименьшее обратное отражение от границы будет иметь место в случае диффузного рассеяния волны на этой границе. Именно такой случай мы и пытались реализовать. Учет отражения волны в диффузном приближении приводит к уменьшению коэффициента усиления от 26 см^{-1} до $15\text{--}17 \text{ см}^{-1}$. Это значение коэффициента усиления было дополнительно подтверждено в следующем эксперименте. Нами было выколото несколько образцов различной длины. На образцах длиной более ~ 0.8 мм стимулированное излучение удавалось получить, а на образцах меньшей длины – нет. Это дает также значения коэффициента усиления $\sim 15 \text{ см}^{-1}$.

При оценке экспоненциальной зависимости коэффициента усиления от длины засвеченной полоски следует учитывать, что внутри нее разные волны излучения проходят различное расстояние. Поэтому, строго говоря, для точного определения коэффициента усиления нужно было бы записать интегральные выражения, учитывающие различную длину пробега для разных волн. Однако для оценки максимального коэффициента усиления активной среды вполне достаточно рассмотреть участок зависимости с экспоненциальным нарастанием сигнала, где основной вклад в рост интенсивности дают волны, пробегающие всю длину полоски засветки. Поясним это на примере.

Рассмотрим зависимость на рис.5,а. При длине полоски засветки $l < 3.5$ мм принимаемый сигнал чрезвычайно мал. С увеличением l от 3.5 до 4 мм сигнал экспоненциально возрастает. Коэффициент усиления при этом оказывается практически постоянным в данном интервале длин засветки, а при дальнейшем увеличении l начинают сказываться эффекты насыщения излучения, и коэффициент усиления довольно резко уменьшается. Именно в этой области необходимо учитывать, что существуют волны, пробегающие засвеченные области различной длины. В настоящей работе мы ограничились оценкой максимально возможного коэффициента усиления.

В экспериментах было обнаружено резкое подавление стимулированного излучения с возбужденных уровней с ростом длины полоски засветки при фиксированной интенсивности накачки. Из сравнения зависимостей, приведенных на рис.5, видно, что стимулированные излучения трех указанных уровней не являются независимыми. При достижении больших значений сигнала для спектральной

линии с $\lambda \approx 1.31$ мкм возникает «гашение» двух других спектральных линий, обусловленных межзонными переходами из возбужденных состояний квантовых точек, причем сначала «гашение» линии, связанной с переходами с третьего уровня, а затем – со второго. Такое «гашение» излучения с верхних электронных уровней квантовых точек, скорее всего, вызвано уменьшением населенности дырок вследствие насыщения перехода с первого электронного уровня. Важную роль могут, в принципе, играть и освобождение уровней основного электронного состояния точек под действием стимулированного излучения, и переходы электронов с верхних уровней в основное состояние. Резкое проявление «гашения» с ростом длины области засветки может означать, что «включается» новый процесс релаксации электронов, находящихся на возбужденных и основном уровнях квантовых точек. Отметим также, что продолжающийся при этом рост интенсивности стимулированного излучения из основного состояния при увеличении длины области засветки указывает на то, что вклад потерь в волноводе в развитие генерации излучения в данном случае еще мал.

3. Заключение

В настоящей работе нами экспериментально исследовано стимулированное излучение полупроводниковых массивов квантовых точек при оптической накачке и комнатной температуре. Наблюдалось стимулированное излучение на межзонных переходах как с электронного уровня, соответствующего основному состоянию квантовых точек ($\lambda \approx 1.31$ мкм), так и с двух вышележащих возбужденных уровней ($\lambda \approx 1.21$ и 1.12 мкм). С помощью засветки полосы с изменяющейся длиной измерены значения коэффициента усиления для таких переходов. Измеренные при этом коэффициенты усиления активной среды для основного уровня являются весьма большими и достигают $15\text{--}17 \text{ см}^{-1}$. Предложена методика измерения коэффициента усиления активной среды в случае больших его значений (не менее 10 см^{-1}).

Настоящая работа поддержана грантом РФФИ № 07-02-00935-а, программой фундаментальных исследований ОФН РАН № III.7 «Физические и технологические исследования полупроводниковых лазеров, направленные на достижение предельных параметров», а также грантом Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ № НШ–2786.2008.2.

1. Андронов А.А., Ноздрин Ю.Н., Окомельков А.В., Яблонский А.Н., Мармалюк А.А., Рябоштан Ю.Л. *Квантовая электроника*, **39** (3), 247 (2009).
2. Negro L.D., Bettotti P., Cazzanelli M., Pacifici D., Pavesi L. *Opt. Commun.*, **229**, 337 (2004).